

LA METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO NEL TRASPORTO FERROVIARIO DI MERCI PERICOLOSE

Valerio Cozzani¹, Giacomo Antonioni¹, Sarah Bonvicini¹,
Gigliola Spadoni¹, Paolo Genovesi², Valerio Giovine²

(1) Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali
Università degli Studi di Bologna, Viale Risorgimento n.2, 40138 Bologna
(2) Rete Ferroviaria Italiana SpA, Piazza della Croce Rossa n.1, 00161 Roma
gigliola.spadoni@mail.ing.unibo.it

SOMMARIO

Il trasporto di merci pericolose in ferrovia non è soggetto a particolari restrizioni di circolazione, in quanto la sicurezza è affidata alla struttura ed alla verifica dei veicoli (RID), nonché al corpo normativo che regola l'esercizio ferroviario. Ciononostante è opportuno definire una procedura di valutazione del rischio legato al trasporto di merci pericolose, per avere un riferimento oggettivo di confronto di effetti tra i vari scali ed itinerari ferroviari, nonché tra varie modalità di trasporto.

1. INTRODUZIONE

La valutazione del rischio legato al trasporto ferroviario di merci pericolose richiede il consolidamento, lo sviluppo e la validazione di metodologie e di strumenti di valutazione. Sono state perciò approfondite le metodologie disponibili per effettuare le valutazioni di rischio su tratte ferroviarie ed in scali ferroviari interessati dalla movimentazione di merci pericolose.

Per ciascuna fase dell'analisi di rischio sono state esaminate le tecniche di analisi normalmente utilizzate ed i parametri necessari ad una valutazione quantitativa del rischio.

E' stata condotta un'estesa validazione delle metodologie e dei parametri selezionati basata su confronti con dati statistici, dove disponibili, o su valutazioni comparative.

L'obiettivo finale è stato raggiunto con lo sviluppo di una procedura unificata da utilizzare nelle valutazioni e la definizione di un insieme di valori di riferimento per i parametri necessari alla valutazione quantitativa del rischio.

La disponibilità di una procedura e di un insieme di valori di riferimento rappresenta una premessa necessaria per rendere riproducibili e confrontabili i valori ottenuti per i diversi indici di rischio, nonché per assicurare ad una valutazione quantitativa del rischio la necessaria trasparenza.

2. PROCEDURA DI RIFERIMENTO PER LA QUANTIFICAZIONE DEI RISCHI

La procedura di quantificazione dei rischi nel trasporto ferroviario di sostanze pericolose adottata è stata ormai definita da alcuni anni a livello internazionale. E' sintetizzabile in alcuni passi fondamentali che consistono nell'identificazione e quantificazione – in termini di frequenze attese e di effetti fisici delle conseguenze - degli eventi incidentali iniziatori e degli scenari incidentali che ne derivano. Dalla ricomposizione quantitativa dell'insieme degli scenari incidentali si ottengono infine le misure di rischio complessive utili per valutare l'esposizione della popolazione. La procedura si può schematizzare in 6 fasi.

Il punto di partenza dell'analisi è rappresentato dall'individuazione delle tratte ferroviarie di interesse, dal censimento dei flussi di sostanze pericolose e dalla raccolta delle informazioni metereologiche e demografiche relative al territorio di interesse ("l'area di impatto" dello studio). Nel trasporto di sostanze pericolose, la presenza di queste sul territorio si può idealmente descrivere con una serie di archi, su cui transitano in maniera discontinua quantità discrete di sostanze. Quindi le sorgenti di rischio in generale sono lineari: solo nel caso di stazionamento e manovra di carri contenenti sostanze pericolose in scali ferroviari si possono avere sorgenti puntuali di rischio legate al trasporto ferroviario. Per definire le sorgenti di rischio è necessario valutare per ciascuna tratta ferroviaria dell'area la quantità di ciascuna merce pericolosa che vi transita ed il tipo di carri impiegati per il trasporto.

La seconda fase è costituita dalla caratterizzazione dei carri impiegati per il trasporto di sostanze pericolose. L'esatta identificazione dei mezzi impiegati nel trasporto di ciascuna sostanza pericolosa è necessaria per tre ragioni principali:

- valutazione del numero delle sorgenti legate a ciascun treno circolante
- valutazione della resistenza della cisterna alla rottura
- individuazione delle condizioni fisiche della sostanza trasportata e della massima quantità rilasciabile.

Nel caso di trasporto ferroviario, il numero di sorgenti associate a ciascun treno è pari al numero di vagoni che lo compongono. La resistenza della cisterna inoltre incide in modo determinante sulla probabilità di rilascio in caso di incidente. La resistenza di una cisterna è determinata dalla specifica progettazione meccanica impiegata nella sua costruzione, che deve rispondere alle norme internazionali RID. Per questo motivo è importante raccogliere dati sufficienti per la caratterizzazione del contenimento. Sono inoltre parametri fondamentali per una corretta stima dei rischi i dati relativi alle condizioni fisiche della sostanza trasportata ed alla quantità presente.

La terza fase della procedura di analisi consiste nella stima delle frequenze di incidente e di rilascio. Per tutte le sorgenti legate al trasporto di sostanze pericolose, analogamente al caso degli impianti fissi, gli eventi incidentali di rilievo sono costituiti dal rilascio accidentale di sostanze tossiche o di energia (irraggiamento da incendio, sovrappressione da esplosione). Tali rilasci possono essere causati o da un malfunzionamento proprio del sistema di contenimento o da una rottura del contenimento per un incidente ferroviario. La prima tipologia di rilascio accidentale è del tutto analoga a quella che si può verificare in un impianto fisso, come ad esempio la perdita da una valvola di intercettazione delle tubazioni di carico del carro, ed ha rilevanza particolare solo nel caso degli scali ferroviari, in cui si può avere un tempo di stazionamento elevato delle cisterne. Durante il viaggio, questa tipologia di rilascio ha invece un'importanza nettamente inferiore rispetto alla seconda, legata agli incidenti ferroviari e quindi specifica del rischio legato al trasporto ferroviario di sostanze pericolose [1,2]. La valutazione della frequenza di tali rilasci viene preceduta dalla valutazione della frequenza degli incidenti e dalla probabilità che essi diano luogo ad un rilascio, in quanto non tutti gli incidenti comportano necessariamente la perdita di contenimento.

La quarta fase consiste nella definizione delle categorie di rottura. Infatti, una volta valutata la frequenza del rilascio di una determinata sostanza pericolosa lungo una tratta si deve passare ad una classificazione del possibile rilascio in base alla sua gravità. Vengono individuate un certo numero di "categorie di rottura"; a ciascuna viene associata una sezione di rottura, espressa come la dimensione di un foro ideale attraverso il quale avviene la fuoriuscita della sostanza. Comunemente vengono impiegate due o tre categorie di rottura, a cui far corrispondere rilasci lievi, gravi o catastrofici. Quest'ultima categoria viene spesso utilizzata per rappresentare rilasci di tipo istantaneo dell'intero contenuto della cisterna. L'utilizzo delle categorie di rottura è necessario per riuscire a modellare con un numero finito e limitato di scenari le conseguenze fisiche del rilascio, che sono legate alla portata effettiva di fuoriuscita a seguito dell'incidente, e che quindi richiederebbero di considerare un numero praticamente infinito di situazioni.

La quinta fase è relativa alla valutazione delle conseguenze del rilascio mediante la modellazione degli effetti fisici. Questa è analoga a quella condotta abitualmente per l'analisi di rischio degli impianti fissi. Gli strumenti da utilizzare in questa fase, costituiti da alberi degli eventi e modelli di analisi delle conseguenze, sono gli stessi utilizzati per gli impianti fissi ed ormai consolidati.

L'ultima fase, la ricomposizione e valutazione degli indici di rischio, segue invece le procedure per la valutazione del rischio d'area. A causa della complessità dei calcoli necessari in questa fase, in particolare nella valutazione della vulnerabilità del territorio e nella rappresentazione degli indici di rischio puntuali, questa richiede l'utilizzo di software specifici.

Le metodologie da impiegare nelle fasi 1 e 6 dell'analisi sono ormai consolidate e direttamente derivate da quelle sviluppate nell'ambito degli studi di rischio d'area, a cui si rimanda per eventuali approfondimenti [3-5].

L'analisi delle caratteristiche dei carri utilizzati per il trasporto di sostanze pericolose, stabilite dalla normativa RID, sono ampiamente discusse anche nei documenti prodotti nell'ambito del "Piano Operativo Merci Pericolose", a cui si rimanda per approfondimenti.

Nel seguito vengono approfonditi solo gli aspetti legati alle fasi 3, 4 e 5 della procedura.

3. PARAMETRI DI RIFERIMENTO PER LA VALUTAZIONE

3.1 Rilasci dalle cisterne durante il viaggio

La frequenza di rilascio è funzione di due parametri fondamentali: la frequenza d'incidente unitaria (frequenza annua con cui si verifica un incidente, riferita ad 1 km percorso da un singolo vagone), che è un valore statistico e come tale fortemente legato all'origine dei dati su cui la statistica è stata condotta; e la probabilità di rilascio, ad incidente avvenuto, anch'essa di derivazione statistica. L'importanza della definizione di incidente, la distinzione o meno tra incidenti che hanno coinvolto carri generici, carri merci, carri merci per il trasporto di sostanze pericolose, il numero di dati raccolti, l'origine geografica dei dati sono

soltanto alcuni degli elementi cui prestare attenzione nell'analisi di dati storici, di cui interessano qualità e quantità. La relazione che lega la frequenza di rilascio ai parametri fondamentali è la seguente:

$$f_r = L \cdot i_{tr} \cdot f_u \cdot P_{ri} \cdot P_c \quad (1)$$

dove f_r è la frequenza di rilascio, L è la lunghezza della tratta, i_{tr} è l'intensità traffico, f_u la frequenza di incidente unitaria, P_{ri} la probabilità di rilascio a seguito dell'incidente e P_c la probabilità della categoria di rottura. I valori numerici considerati per l'incidentalità, derivanti da indagine statistica internazionale e nazionale, sono riportati in tabella 1. Per quanto riguarda le categorie di rottura, ferme restando le considerazioni illustrate in precedenza, i valori adottati per diametro equivalente e probabilità relativamente agli incidenti durante il viaggio sono anch'essi riportati in tabella 1.

Parametro	Caratteristica	Tipo di Contenimento	Valore	
Frequenze				
frequenza di incidente unitaria		tutti	$5 \cdot 10^{-8}$ (ev/anno)	
probabilità di rilascio		atmosferico	0.100	
		in pressione	0.033	
Categorie di rottura				
numero	diametri equivalenti	tutti	3	
categoria di rilascio	pozza - lieve	atmosferico	10 (m) / 50mm	
	pozza - grave	atmosferico	20 (m) / 100mm	
	catastrofico	atmosferico	40 (m)	
	lieve	in pressione	30 (mm)	
	grave	in pressione	76 (mm)	
	catastrofico	in pressione		
probabilità categoria di rottura	lieve	atmosferico	0.820	
	grave	atmosferico	0.164	
	catastrofico	atmosferico	0.016	
	lieve	in pressione	0.820	
	grave	in pressione	0.164	
	catastrofico	in pressione	0.016	
Scenari incidentali				
rilascio continuo*	pool-fire	atmosferico	0.15	
	flash-fire	atmosferico	---	
	UVCE	atmosferico	---	
	dispersione	atmosferico	0.85	
	pool-fire	in pressione	---	
	flash-fire	in pressione	0.35	
	UVCE	in pressione	0.10	
	dispersione	in pressione	0.35	
	jet-fire	in pressione	0.20	
	rilascio istantaneo*	pool-fire	atmosferico	0.15
		flash-fire	atmosferico	---
		UVCE	atmosferico	---
dispersione		atmosferico	0.85	
pool-fire		in pressione	---	
flash-fire		in pressione	0.50	
UVCE		in pressione	0.13	
dispersione		in pressione	0.17	
fireball		in pressione	0.20	

Tabella 1: Parametri di riferimento per rilasci dovuti ad incidente durante il viaggio (*per infiammabili).

3.2 Rilasci dovuti alla movimentazione delle cisterne negli scali

Gli incidenti che possono coinvolgere merci pericolose in scali ferroviari si possono suddividere in alcune tipologie principali:

- collisione con carri fermi durante la manovra
- incidenti durante la composizione del treno

- deragliamento di un carro in manovra

E' evidente come queste tipologie di incidenti abbiano frequenze attese di incidente principalmente dipendenti dal numero di singoli carri movimentati nello scalo. In termini metodologici è possibile adottare per il loro calcolo un approccio statistico o applicare tecniche specifiche. La disponibilità di dati statisticamente significativi relativi al numero di incidenti e numero medio di carri movimentati ogni anno per alcuni scali italiani, ha permesso di calcolare la frequenza unitaria di incidente. Questa è risultata compresa tra $1 \cdot 10^{-5}$ e $7 \cdot 10^{-5}$ eventi/anno per gli scali analizzati, con un valor medio pari a $4 \cdot 10^{-5}$ eventi/anno. Il ridotto numero di incidenti non ha permesso invece di ottenere dati statisticamente significativi per la probabilità di rilascio rispetto agli scali italiani. E' stato possibile però ottenere una stima per la probabilità di rilascio a seguito di incidente in scali ferroviari da fonti europee. Questa si differenzia con la tipologia di cisterna ed in particolare dovrà essere ritenuta più alta per le cisterne atmosferiche (tipiche del trasporto di liquidi) costruttivamente più deboli di quelle in pressione (utilizzate per gas liquefatti) ed è risultata pari a 0.10 per le cisterne atmosferiche e a 0.01 per le cisterne in pressione. Per modellare le conseguenze fisiche del rilascio è necessario definire le categorie di rottura da considerare nell'analisi. Per gli incidenti negli scali ferroviari sono state definite due categorie di rottura, avendo ritenuto trascurabile la categoria di rottura catastrofica, poiché trattasi in genere di urti con limitata energia cinetica. La tabella 2 riporta i diametri assunti per le categorie di rottura e le relative probabilità considerate nell'analisi.

Parametro	Caratteristica	Tipo di Contenimento	Valore
<i>Frequenze</i>			
frequenza di incidente unitaria		tutti	$4 \cdot 10^{-5}$ (ev/vagone)
probabilità di rilascio		atmosferico	0.10
		in pressione	0.01
<i>Categorie di rottura</i>			
numero	diametri equivalenti	tutti	2
categoria di rilascio	pozza – lieve	atmosferico	10 (m) / 50mm
	pozza – grave	atmosferico	20 (m) / 100mm
	Lieve	in pressione	30 mm
	Grave	in pressione	76 mm
probabilità categoria di rottura	Lieve	atmosferico	0.82
	Grave	atmosferico	0.18
	Lieve	in pressione	0.82
	Grave	in pressione	0.18
<i>Scenari incidentali</i>			
rilascio continuo	pool-fire	atmosferico	0.15
	flash-fire	atmosferico	---
	UVCE	atmosferico	---
	dispersione	atmosferico	0.85
	pool-fire	in pressione	---
	flash-fire	in pressione	0.35
	UVCE	in pressione	0.10
	dispersione	in pressione	0.35
	jet-fire	in pressione	0.20

Tabella 2: Parametri di riferimento per rilasci dovuti ad incidente durante la composizione del treno.

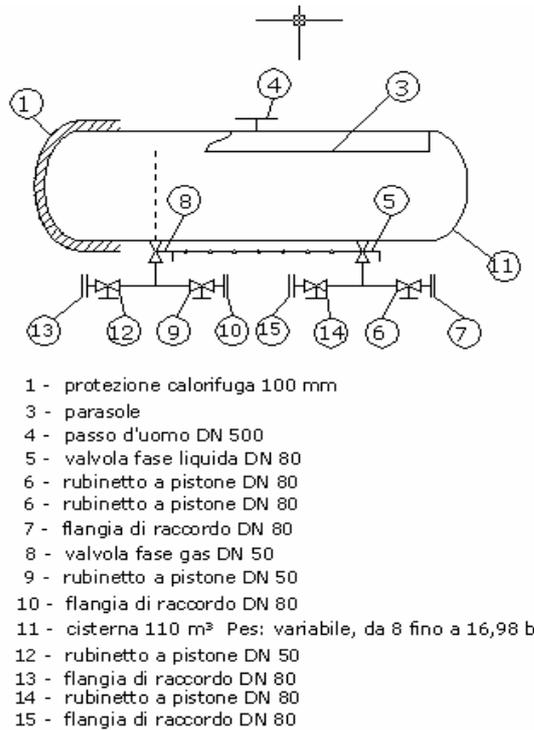


Figura 1: Schema tecnico di riferimento di una cisterna utilizzata per gas liquefatti in pressione

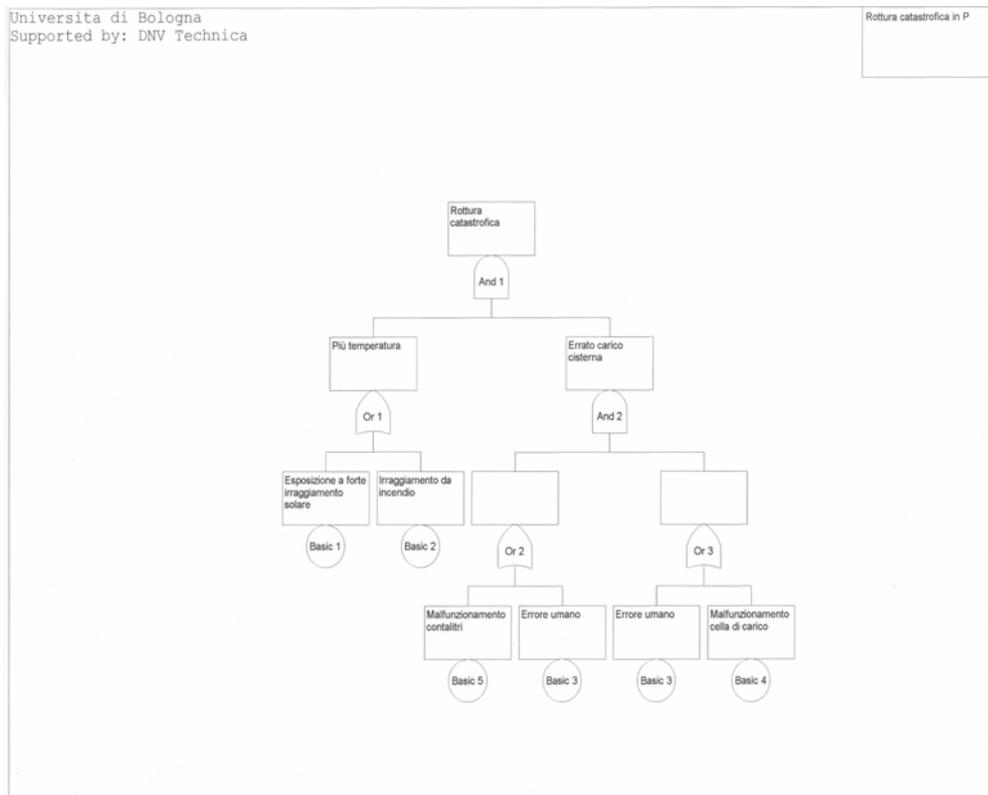


Figura 2: Albero dei guasti per la rottura catastrofica di una cisterna in pressione

3.3 Rilasci dovuti a guasto del contenimento delle cisterne negli scali

La valutazione del rischio dovuto ai rilasci causati da guasto dei sistemi di contenimento dei carri negli

scali ferroviari è stata affrontata sviluppando una metodologia specifica che, attraverso l'identificazione dei guasti possibili ne rendesse possibile la stima delle frequenze attese. La metodologia è stata derivata dalle procedure tipiche utilizzate per l'analisi di rischio in impianti chimici. L'analisi è stata effettuata con la seguente metodologia:

- reperimento di dati sulle cisterne e definizione di schemi di riferimento
- identificazione degli eventi incidentali attraverso analisi di operabilità
- valutazione delle frequenze attese attraverso alberi di guasto

Parametro	Caratteristica	Tipo di Contenimento	Valore
Categorie di rilascio			
numero	diametri equivalenti	tutti	3
categoria di rilascio	pozza – lieve	atmosferico	10 (m) / 50mm
	pozza – grave	atmosferico	20 (m) / 100mm
	catastrofico	atmosferico	40 (m)
(12% sez.) (95% sez.)	lieve	in pressione	30 (mm)
	grave	in pressione	76 (mm)
	catastrofico	in pressione	
frequenza di rottura	lieve	atmosferico	$5 \cdot 10^{-3}$
	grave	atmosferico	$5 \cdot 10^{-6}$
	catastrofico	atmosferico	$5 \cdot 10^{-7}$
	lieve	in pressione	$1 \cdot 10^{-3}$
	grave	in pressione	$1 \cdot 10^{-6}$
	catastrofico	in pressione	$1 \cdot 10^{-7}$
Scenari incidentali			
rilascio continuo	pool-fire	atmosferico	0.15
	flash-fire	atmosferico	---
	UVCE	atmosferico	---
	dispersione	atmosferico	0.85
	pool-fire	in pressione	---
	flash-fire	in pressione	0.35
	UVCE	in pressione	0.10
	dispersione	in pressione	0.35
	jet-fire	in pressione	0.20
	rilascio istantaneo	pool-fire	atmosferico
flash-fire		atmosferico	---
UVCE		atmosferico	---
dispersione		atmosferico	0.85
pool-fire		in pressione	---
flash-fire		in pressione	0.50
UVCE		in pressione	0.13
dispersione		in pressione	0.17
fireball		in pressione	0.20

Tabella 3: Parametri di riferimento per rilasci dovuti a guasto della cisterna durante la sosta.

Le tipologie di rilascio credibili a seguito di guasti delle cisterne utilizzate per il trasporto ferroviario di sostanze pericolose sono state individuate applicando l'analisi di operabilità a schemi di riferimento (vedi fig. 1) definiti per le diverse tipologie di cisterne. Sono stati individuati quattro Top Events (molto lieve: trafileamento da valvole o da guarnizioni; lieve: cedimento di guarnizioni; grave: errata apertura di valvole; rottura catastrofica). Attraverso l'applicazione della tecnica degli alberi di guasto (vedi fig.2) sono poi state derivate le frequenze attese dei rilasci, tenendo in debito conto i risultati dell'analisi di sensitività. La tabella 3 riporta le frequenze attese ottenute ed i diametri equivalenti assunti per il rilascio. Nella tabella non compare il rilascio "molto lieve", in quanto le portate di rilascio valutate sono assolutamente insufficienti a dare luogo ad un incidente rilevante.

3.4 Alberi degli eventi e scenari incidentali

A seguito delle analisi relative ai rilasci, sono stati assunti alberi degli eventi uguali per le diverse tipologie di rilascio considerate (da incidente o guasto del contenimento). Per i gas liquefatti infiammabili (e tossici) sono stati definiti gli alberi degli eventi riportati nelle figure 3 e 4. Nelle figure 5 e 6 si riportano le scelte effettuate con riferimento ai liquidi infiammabili. Si noti che, in base alle valutazioni quantitative effettuate, sono state ritenute trascurabili le probabilità degli scenari relativi a VCE e flash- fire nel caso del rilascio di combustibili liquidi. Nel caso di rilascio di sostanze solo tossiche, l'unico scenario di interesse è la dispersione.

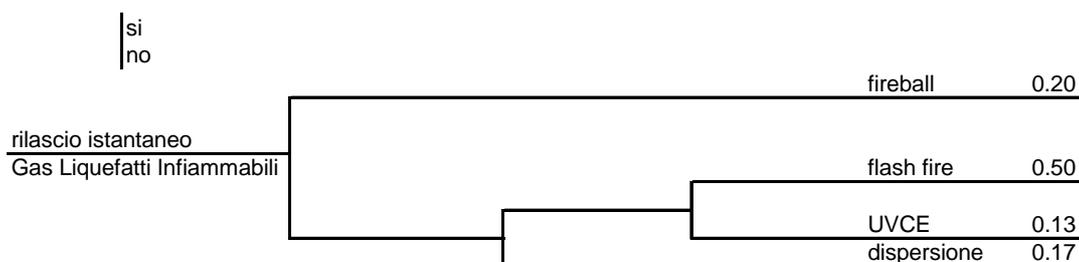


Figura 3: albero degli eventi per un rilascio istantaneo di gas liquefatti infiammabili



Figura 4: albero degli eventi per un rilascio continuo di gas liquefatti infiammabili

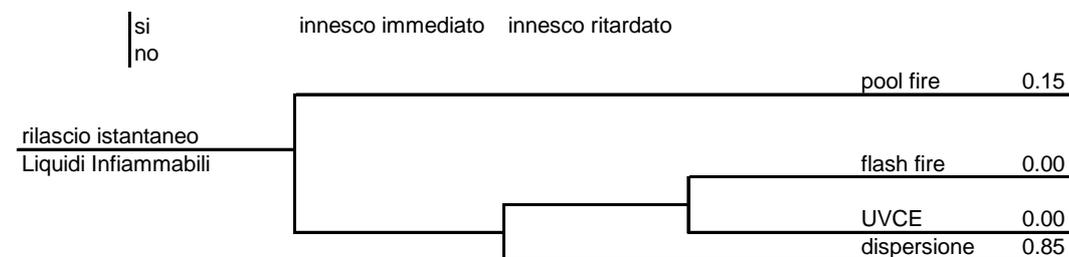


Figura 5: albero degli eventi per un rilascio istantaneo di liquidi infiammabili

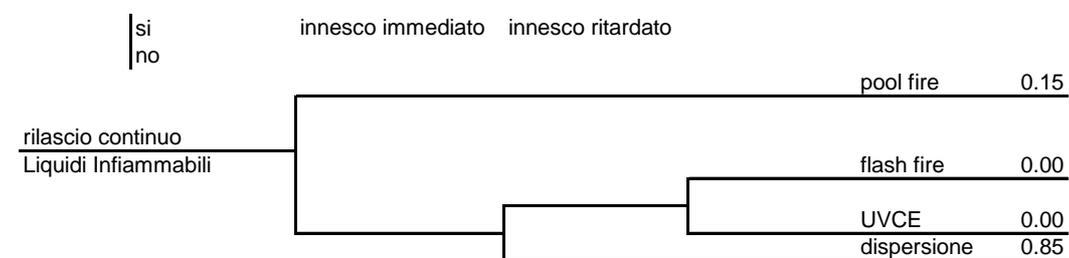


Figura 6: albero degli eventi per un rilascio continuo di liquidi infiammabili

3.5 Valutazione dei parametri di riferimento per l'analisi di rischio nel trasporto di sostanze pericolose

In base alle considerazioni illustrate si sono individuati i parametri che l'analista deve definire per poter effettuare una valutazione quantitativa del rischio dovuto al trasporto ferroviario di sostanze pericolose

(tabelle 1-3). In letteratura non esiste ancora alcun accordo nella definizione dei diversi parametri, anzi, studi recenti [1,2,6] hanno dimostrato che fonti diverse suggeriscono valori a volte discordanti di alcuni ordini di grandezza. E' stato perciò effettuato un esteso lavoro di analisi di incertezza e di sensitività che ha permesso di ottenere i valori di riferimento riportati nelle tabelle per i diversi parametri numerici. Il lavoro è stato basato sia sull'analisi comparativa dei parametri riportati in letteratura dai diversi autori, che sulla valutazione dell'intervallo di variazione dei diversi indici di rischio in funzione dei valori dei parametri usati nella valutazione. I parametri riportati nelle tabelle costituiscono quindi valori di riferimento che possono essere utilizzati per rendere omogenei e confrontabili i risultati delle TRA (Transport Risk Analysis).

4. APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA ALL'ANALISI DI CASI REALI

4.1 L'attraversamento ferroviario di Messina

La procedura messa a punto è stata validata attraverso l'applicazione a casi reali. Per la loro rappresentatività, sono qui riportati i risultati ottenuti per l'attraversamento ferroviario di Messina e per lo scalo ferroviario di Livorno Calambrone.

Nel caso di Messina, la tratta ferroviaria di interesse, mostrata in dettaglio in figura 7, comprende gli ultimi 7 km del tratto litoraneo della linea ferroviaria Catania–Messina, fino all'abitato di Messina ed alle stazioni di Messina Centrale e Messina Marittima.

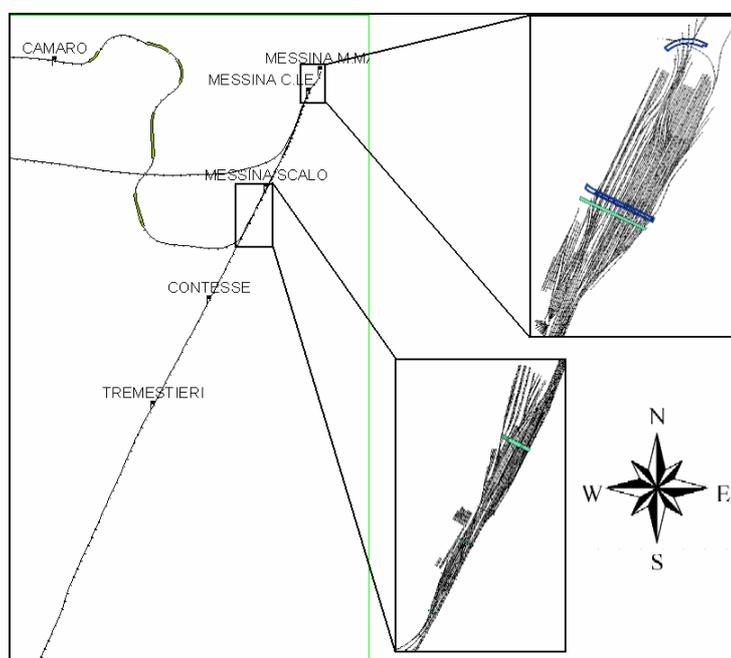


Figura 7: dettaglio della rete ferroviaria nell'area di interesse

Nell'analisi è stato considerato il solo attraversamento della città da parte dei convogli. Non è stata considerata la presenza dello scalo ferroviario, nè il rischio specifico derivante dalle operazioni di imbarco su traghetto delle sostanze pericolose. Sull'area di interesse sono stati reperiti i dati relativi a densità e distribuzione della popolazione, nonché ai centri di vulnerabilità.

Nella tabella 4 sono riassunti i flussi accorpati di sostanze pericolose movimentati nell'anno 2001 sulle diverse linee dell'area di interesse.

Linea	Ammoniaca (43t/carro)	Liquidi Infiammabili (54t/carro)	Cloro (45 t/carro)	GPL (45t/carro)	Ossido di Etilene (56 t/carro)
Priolo – Messina	-	288	100	1256	16
Palermo – Messina	1	6	-	32	-

Tabella 4: sostanze pericolose movimentate nel 2001 sulla rete ferroviaria dell'area di interesse

Per effettuare le valutazioni è stato utilizzato il software TRAT-GIS [7,8]. I risultati ottenuti per il rischio locale sono indicati in figura 8. E' evidente che, con i parametri utilizzati per le valutazioni, in tutta l'area i valori di rischio restano inferiori a 10^{-7} eventi/anno. Le valutazioni effettuate inoltre non mostrano centri di aggregazione della popolazione con valori di rischio locale degni di attenzione e cioè tali da dover considerare l'opportunità di mitigazioni specifiche. Il benzene, e le sostanze liquide infiammabili assimilate, di fatto danno un contributo trascurabile al rischio locale: i valori di rischio dovuti al trasporto di queste sostanze sono infatti dell'ordine di 10^{-10} eventi/anno già a 30 metri dalla linea, a causa delle modeste conseguenze degli scenari incidentali. Analogamente, e quindi trascurabile, è il contributo dell'ossido di etilene e delle sostanze assimilate, che è dello stesso ordine di grandezza a circa 60 metri dalla linea, a causa del basso numero di cisterne trasportate. Nelle immediate vicinanze della linea, il principale contributo al rischio locale deriva dal trasporto di GPL, mentre a distanze maggiori prevale il contributo del trasporto di cloro.

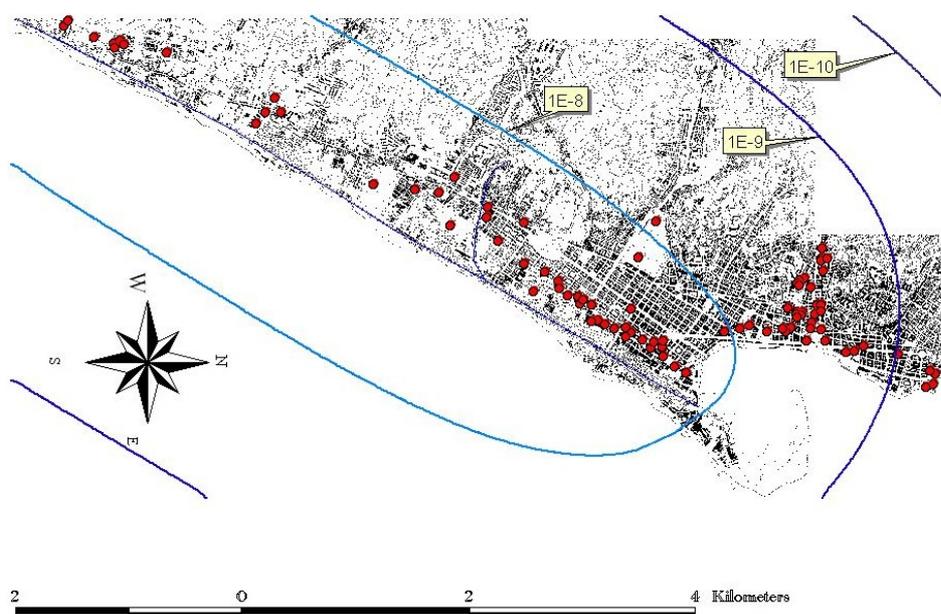


Figura 8: rischio locale dovuto al trasporto di sostanze pericolose nella rete ferroviaria dell'area di Messina

I risultati ottenuti per il rischio sociale sono riportati in figura 9. La curva F-N resta sempre al di sotto dei valori limite di accettabilità, sia secondo i criteri inglesi che secondo quelli olandesi. Il confronto tra le curve relative al trasporto delle diverse sostanze conferma che è del tutto trascurabile, ai fini del rischio sociale, il contributo degli infiammabili e dell'ossido di etilene, entrambi di due-tre ordini di grandezza inferiori rispetto ai valori complessivi. Per N inferiore a 200 sono invece comparabili i contributi del trasporto di GPL e di cloro, mentre per valori superiori di N prevale decisamente il contributo del trasporto di cloro, la cui curva di rischio sociale coincide con quella totale.

4.2 Lo scalo di Livorno-Calambrone

Lo scalo ferroviario Livorno Calambrone, situato a nord rispetto alla città di Livorno e a sud dell'area industriale, ha un'estensione in lunghezza di circa 790 metri, ed è dedicato quasi esclusivamente alla movimentazione merci, non essendo stazione di fermata per nessuno dei treni passeggeri della direttrice, che incrociano i binari dello scalo soltanto negli scambi di ingresso allo scalo stesso. La tabella 5 mostra le quantità di sostanze movimentate nello scalo di Livorno Calambrone nel 2002. Le valutazioni di rischio sono state effettuate utilizzando il software Aripa-GIS. Per le cisterne è stato assunto un tempo massimo di permanenza nello scalo pari a 2 ore.

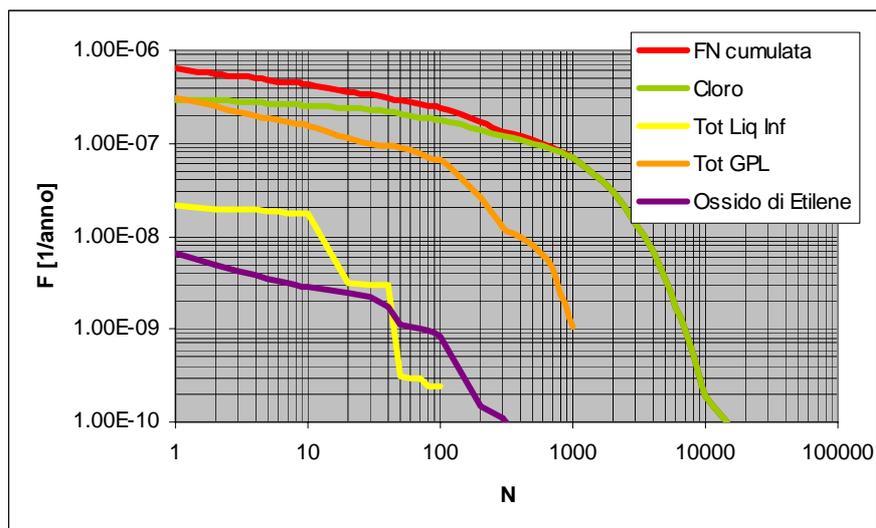


Figura 9: rischio sociale dovuto al trasporto di sostanze pericolose nella rete ferroviaria dell'area di Messina

Categoria di Accorpamento	Movimentazione [carri/anno]
GPL	1388
INFIAMMABILI LIQUIDI	1242
ACRILONITRILE	30

Tabella 5: Sostanze pericolose movimentate nello scalo di Livorno-Calambrone nell'anno 2002.

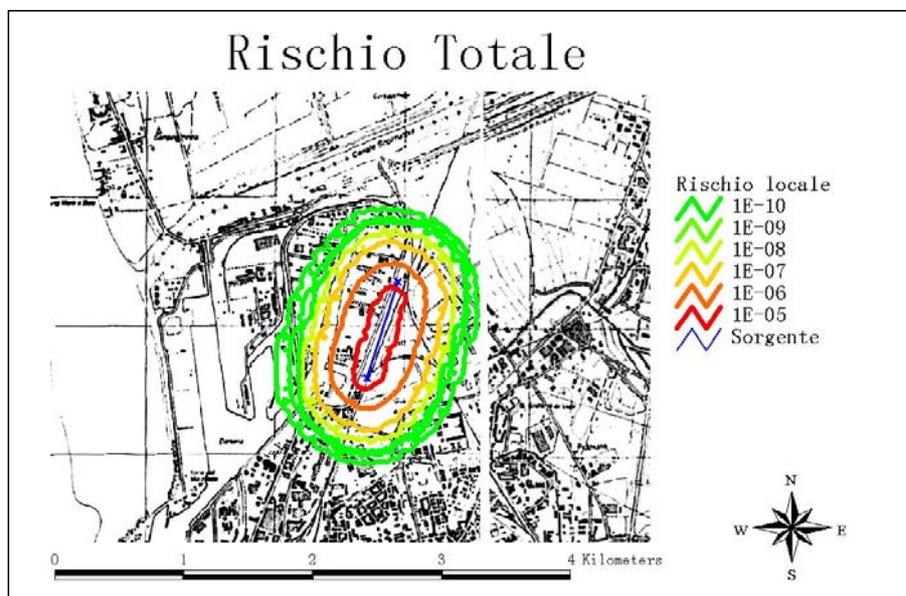


Figura 10: rischio locale per lo scalo di Livorno-Calambrone.

La figura 10 mostra i risultati ottenuti per il rischio locale. Dall'analisi dei risultati si può evidenziare come il rischio locale si estenda in un'area ristretta intorno allo scalo ferroviario. Ad una distanza di 120 metri dallo scalo si raggiungono valori di rischio pari a 10^{-5} eventi/anno. Valori di rischio pari a 10^{-6} eventi/anno sono raggiunti a 320 metri, e si estendono sopra l'area industriale limitrofa allo scalo, fino al canale industriale all'interno del porto. Ad una distanza di circa 700 metri dallo scalo il rischio locale diventa del tutto

trascurabile (10^{-9} - 10^{-10} eventi/anno).

Il rischio sociale, rappresentato dalla curva F-N in figura 11, non genera preoccupazioni, in quanto le frequenze incidentali complessive sono ridotte, mentre tutti gli incidenti generano valori contenuti di N a causa della bassa densità di popolazione presente nei dintorni dello scalo. Non vi è nessun impatto con centri di vulnerabilità frequentati dalla popolazione residente, che risultano distanti rispetto allo scalo ferroviario. In termini di importanza delle sostanze, le mappe di rischio locale ed individuale e le curve F-N mostrano chiaramente come il GPL abbia un'influenza maggiore sul rischio rispetto alle altre sostanze. Lo scenario più importante risulta il flash fire associato ad un rilascio grave, con un raggio di danno (associato ad una concentrazione della nube pari a $\frac{1}{2}$ del limite inferiore di infiammabilità) pari a circa 260 metri. Gli scenari incidentali associati all'acrilonitrile hanno conseguenze non trascurabili e raggi di danno anche maggiori (l'IDLH è raggiunto a distanze superiori ad 1km in condizioni F2), ma il loro effetto sul rischio è ridotto dalle basse frequenze incidentali, dovute alla limitata movimentazione di questa sostanza all'interno dello scalo.

Sulla base dell'analisi effettuata, considerando un tempo medio di sosta di due ore, il rischio dovuto alla movimentazione delle sostanze pericolose nello scalo di Livorno-Calambone appare sotto controllo e lo scalo compatibile con il territorio circostante. I risultati ottenuti mostrano però che il tempo medio di sosta delle cisterne all'interno dello scalo ha un'influenza fondamentale sui valori degli indici di rischio.

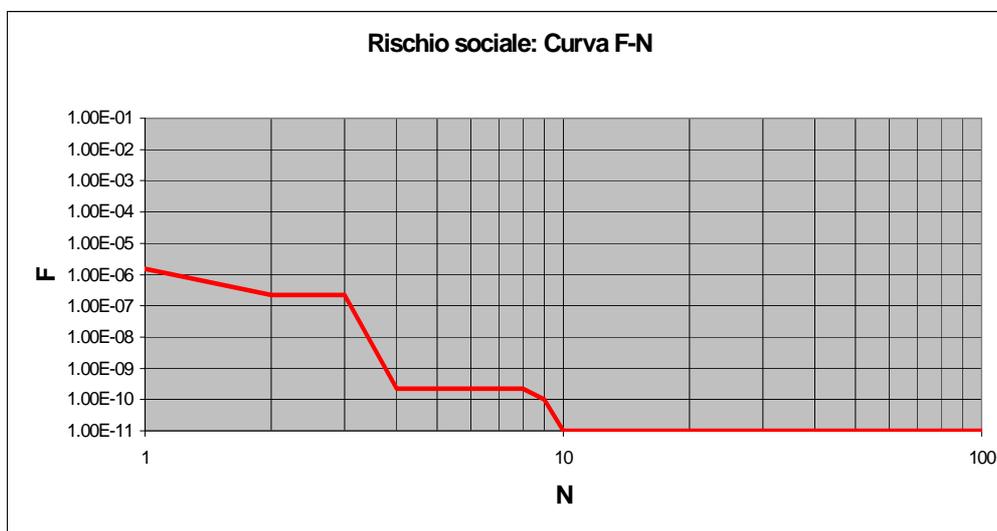


Figura 11: rischio sociale per lo scalo di Livorno-Calambrone.

5. CONCLUSIONI

E' stata definita una metodologia di riferimento per la valutazione del rischio nel trasporto ferroviario di sostanze pericolose. La metodologia è applicabile all'analisi del rischio sia per attraversamenti ferroviari che per scali in cui avviene la movimentazione di sostanze pericolose. Un'estesa analisi di sensitività ha permesso di ottenere valori di riferimento per i parametri da utilizzare nell'analisi, al fine di ottenere valutazioni omogenee nello studio di aree diverse. La metodologia è stata applicata con successo all'analisi del rischio legato al trasporto di sostanze pericolose in varie aree italiane. I risultati ottenuti dalle applicazioni mostrano che i rischi nel trasporto ferroviario di sostanze pericolose derivano principalmente dal trasporto di gas tossici liquefatti in pressione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Cozzani, S. Bonvicini, L. Vanni, G. Spadoni, S. Zanelli: "Trasporto di sostanze pericolose, parte seconda: incertezze nei dati storici di incidente". *La Chimica e l'Industria* 83(9):69-75 (2001)
- [2] V. Cozzani, S. Bonvicini, L. Vanni, G. Spadoni, S. Zanelli: "Trasporto di sostanze pericolose, parte seconda: incertezze nei dati storici di incidente". *La Chimica e l'Industria* 83(10):64-69 (2001)
- [3] S. Bonvicini, L. Vanni, V. Cozzani: "The importance of modeling assumptions in hazardous

- material transportation risk analysis". Proc. Eur.Conf. Safety and Reliability, MG: Torino 2001; p.577-584
- [4] P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni, "New detailed numerical procedures for calculating risk measures in hazardous materials transportation", *J. Loss Prev.Proc.Industries* 12(6):507-515 (1999)
 - [5] CCPS, Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis, AIChE, New York, 1995
 - [6] ACDS, Major Hazard Aspect of the Transport of Dangerous Substances, Advisory Committee on Dangerous Substances, HSC, London, 1991
 - [7] P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni: "Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology". *J. Hazardous Materials* 71:293 (2000)
 - [8] M.F. Milazzo, R. Lisi, G. Maschio, G. Antonioni, S. Bonvicini, G. Spadoni, "HazMat transport through Messina town: from risk analysis suggestion for improving territorial safety" *J. Loss Prev. Proc. Industries* 15:347 (2002)