

Trasporto merci pericolose

Prima parte: dati storici di incidente

di Valerio Cozzani, Sarah Bonvicini, Leonardo Vanni, Gigliola Spadoni e Severino Zanelli

La domanda di sicurezza nel trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose rende necessario valutare il rischio cui risulta esposta la popolazione a causa del transito di questa tipologia di merci in aree residenziali contigue a zone industriali. Lo sviluppo di un'analisi di rischio implica una formulazione omogenea del problema in tutte le sue fasi ed una riduzione, per quanto possibile, delle incertezze presenti nei dati in ingresso.

Il recepimento della Direttiva Europea 96/82/EC ("Seveso II") da parte della legislazione italiana, attraverso il dl 334/99, prevede l'adozione di criteri per la pianificazione territoriale e l'esecuzione di analisi di rischio integrate nelle aree in cui sono presenti elevate concentrazioni di stabilimenti industriali per la produzione, per il trattamento e per lo stoccaggio di sostanze pericolose. In questo modo, parallelamente alla valutazione del rischio dovuto agli impianti fissi, è richiesta, sia pure in forma indiretta, anche una quantificazione dei rischi dovuti al trasporto di merci pericolose.

Lo sviluppo di un'analisi di rischio implica necessariamente una formulazione omogenea del problema in tutte le sue fasi, che sono state riassunte in modo schematico nella Tabella 1. È evidente, in questo contesto, la necessità di ridurre, per quanto possibile, le incertezze presenti nei dati in ingresso. Tale esigenza è avvertita in modo particolare quando si effettuano studi di rischio su diverse modalità di trasporto o su impianti e trasporti contemporaneamente, al fine di rendere possibili e significativi l'analisi e il confronto dei risultati.

Tra i dati caratterizzati da maggiore incertezza vi sono quelli relativi alla frequenza d'incidente ed alla probabilità di rilascio della sostanza pericolosa trasportata a seguito del coinvolgimento del mezzo in un incidente. La necessità di avere stime attendibili di queste grandezze è conseguenza diretta del fatto che incidono in modo direttamente proporzionale sugli indici di rischio, in particolare se l'analisi di rischio è condotta in modo quantitativo allo scopo di stimare il rischio individuale ed il ri-



schio sociale [1]. Questo studio è stato principalmente dedicato all'analisi dei valori di frequenza d'incidente e di rilascio nel trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose. Da una parte si sono passate in rassegna alcune fonti di dati storici disponibili nella letteratura tecnica, cercando di evidenziare le caratteristiche e l'affidabilità dei dati riportati, dall'altra si sono messi in luce i fattori d'incertezza presenti nei dati e ne sono state discusse le cause.

La finalità del lavoro è di fornire un contributo per l'individuazione di valori di frequenza di incidente e di rilascio affidabili da impiegarsi nelle analisi di rischio nel trasporto di merci pericolose sul territorio italiano. Tra questi vi sono la frequenza d'incidente propria della strada o della ferrovia e la probabilità di rilascio della sostanza in seguito al coinvolgimento in un incidente, che costituiscono l'oggetto del presente studio. Il lavoro è diviso in due parti; nella prima vengono presentati i dati storici di incidentalità reperibili nella letteratura tecnica, mentre nella seconda si analizzano le principali cause della variabilità presente nei dati in questione.

Valutazione della frequenza di rilascio

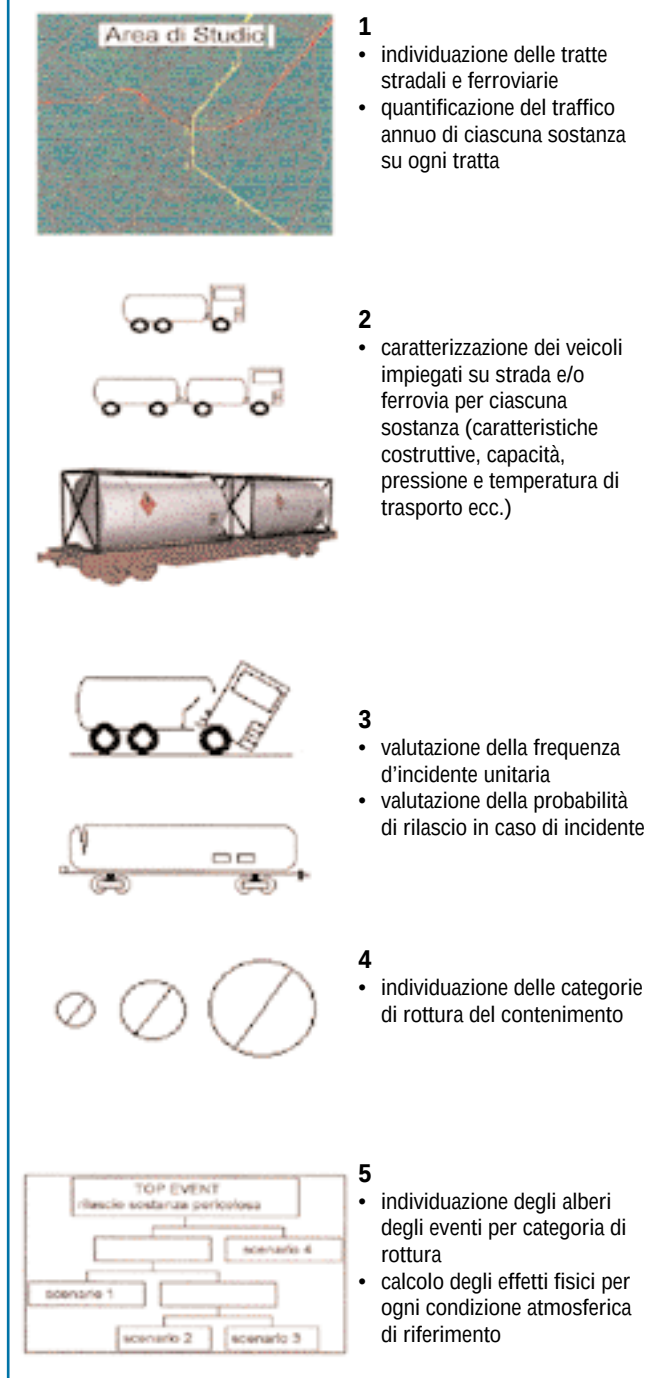
Definizioni fondamentali

In questo studio si è fatto riferimento esclusivamente ai rilasci che avvengono mentre il veicolo è in marcia su un percorso. Non sono stati presi in considerazione quindi gli incidenti che avvengono durante le operazioni, pur connesse al trasporto, diverse dal viaggio stesso, quali le fasi di carico e scarico, la sosta nei parcheggi e nelle stazioni ferroviarie, le manovre di smistamento all'interno degli scali ferroviari.

Si sono inoltre analizzati solamente i rilasci conseguenti al coinvolgimento del veicolo in un incidente, in quanto, come evidenziato altrove [4, 5] i rilasci durante la marcia non dovuti

V. Cozzani, S. Zanelli, Dip. di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali - Università di Pisa - v.cozzani@ing.unipi.it; S. Bonvicini, G. Spadoni, Dip. di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali - Università di Bologna; L. Vanni, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici - Cnr.

Tabella 1 - Fasi principali per la valutazione quantitativa del rischio nel trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose



ad incidente sono spesso riconducibili a perdite parziali ed in genere di limitata entità da valvole e bocchelli, con conseguenze del tutto modeste se non trascurabili.

Nel seguito dunque con il termine "rilasci" si intenderanno i rilasci di sostanze pericolose originati dal coinvolgimento del mezzo in un incidente. La grandezza di riferimento normalmente utilizzata per la valutazione quantitativa del numero di incidenti attesi che coinvolgano il rilascio della sostanza trasportata è la frequenza di rilascio. La *frequenza di rilascio* è definita come il numero di incidenti attesi che causino il rilascio di una data so-

stanza su una data tratta stradale in un tempo di riferimento (tipicamente un anno). Si esprime dunque come il rapporto tra il numero di incidenti attesi ed il tempo di riferimento (rilasci/anno). La metodologia comunemente seguita per quantificare la frequenza di rilascio (f_{ril}) su un percorso omogeneo consiste nell'esprimere questa grandezza come prodotto di tre termini: l'intensità del traffico veicolare (i_{tr}), la frequenza di rilascio unitaria (f_{ru}) e la lunghezza della tratta (L).

L'*intensità del traffico* veicolare di sostanze pericolose sul tratto è data dal numero di veicoli di interesse che transitano su di esso in un tempo di riferimento, tipicamente pari ad un anno. Si esprime quindi come il rapporto tra il numero di veicoli transitati ed il tempo in cui sono transitati (veicoli/anno).

La *frequenza di rilascio unitaria* rappresenta il numero di rilasci attesi che un singolo veicolo subisce a seguito d'incidenti per unità di lunghezza del percorso. Si esprime perciò come "rilasci/km percorso dal veicolo". L'utilità d'introdurre tale fattore consiste nella sua sostanziale indipendenza dal valore dell'intensità del traffico, che viene invece principalmente influenzato dalle caratteristiche del veicolo e dal tipo di strada (o ferrovia) percorsa. Per ogni tratta stradale o ferroviaria si avrà dunque:

$$f_{ril} = i_{tr} \cdot f_{ru} \cdot L \quad (1)$$

Poiché si considerano solamente i rilasci dovuti ad incidente, la frequenza di rilascio unitaria può essere espressa come prodotto di una *frequenza di incidente unitaria* (f_{iu} , espressa in "incidenti/km percorso dal veicolo") per una *probabilità di rilascio* condizionata al verificarsi dell'incidente (p_{ril} , adimensionale):

$$f_{ru} = f_{iu} \cdot p_{ril} \quad (2)$$

Riorganizzando le precedenti formule si ottiene la seguente espressione per la stima della frequenza di rilascio su una determinata tratta:

$$f_{ril} = f_{inc} \cdot p_{ril} = i_{tr} \cdot f_{iu} \cdot L \cdot p_{ril} \quad (3)$$

L'equazione (3) rappresenta la relazione fondamentale per il calcolo della frequenza dei rilasci dovuti ad incidente nel trasporto di sostanze pericolose. In essa la lunghezza del tratto L e l'intensità del traffico veicolare i_{tr} dipendono dal particolare segmento stradale o ferroviario preso in esame. In particolare, il valore di i_{tr} può essere rilevato con specifiche indagini sui flussi della sostanza pericolosa di interesse nell'area in esame. Viceversa la frequenza d'incidente unitaria e la probabilità di rilascio possono in generale essere desunti dall'elaborazione di dati storici, se possibile relativi alla tratta in esame, ma più tipicamente raccolti su ampie aree geografiche per tempi pari ad alcuni anni a causa della necessità di disporre di campioni statisticamente significativi.

Considerazioni specifiche per il trasporto ferroviario

Anche in base a quanto riportato in letteratura [4], nel trasporto ferroviario si possono distinguere due tipologie di incidente. Una prima classe di incidenti, quali quelli dovuti ad errori umani ed a guasti della linea ferroviaria (per esempio il deragliamento di uno o più vagoni per mancato funzionamento di uno scambio), ha una frequenza dipendente dalla distanza percorsa dal treno. Una seconda classe di incidenti, quali quelli dovuti ai malfunzionamenti del materiale rotabile (per esempio il deragliamento di uno o più vagoni per guasto di un vagone), ha

Tabella 2 - Frequenze incidentali unitarie nel trasporto ferroviario di sostanze pericolose

Rif.	dati Europa+Usa		dati Europa		dati Usa		n. in Fig. 2*
	f_{iuv}	f_{iut}	f_{iuv}	f_{iut}	f_{iuv}	f_{iut}	
[1]	5,00·10 ⁻⁸		5,00·10 ⁻⁸				1
[2]	1,15·10 ⁻⁸	3,00·10 ⁻⁸	1,15·10 ⁻⁸	3,00·10 ⁻⁸			2
[3]	6,60·10 ⁻⁸		6,60·10 ⁻⁸				3
[6]	1,68·10 ⁻⁷	8,40·10 ⁻⁷			1,68·10 ⁻⁷	8,40·10 ⁻⁷	4
[5]	4,68·10 ⁻⁷				4,68·10 ⁻⁷		5
[25]	7,00·10 ⁻⁸		7,00·10 ⁻⁸				
[21]	1,00·10 ⁻⁷		1,00·10 ⁻⁷				
[23]	9,40·10 ⁻⁷				9,40·10 ⁻⁷		6
[24]		1,18·10 ⁻⁶		1,18·10 ⁻⁶			7
[22]		8,80·10 ⁻⁷		8,80·10 ⁻⁷			
[22]		6,00·10 ⁻⁶				6,00·10 ⁻⁶	
Media							
geom.	1,09·10 ⁻⁷	6,91·10 ⁻⁷	4,84·10 ⁻⁸	3,15·10 ⁻⁷	4,20·10 ⁻⁷	2,24·10 ⁻⁶	
Max/Min	81,7	200,0	8,7	39,3	5,6	7,1	

* vedi seconda parte

una frequenza dipendente dalla distanza percorsa dai singoli vagoni. Un approccio rigoroso alla valutazione della frequenza degli incidenti ferroviari dovrebbe quindi essere basato sulla disponibilità di due diversi valori di frequenza d'incidente: una frequenza d'incidente unitaria che tenga conto della prima tipologia di incidenti e riconducibile alla distanza percorsa dal treno (f_{iudT} , espressa in "incidenti del treno/km percorso dal treno") e una frequenza d'incidente unitaria che tenga conto della seconda tipologia di incidenti e riconducibile alla distanza percorsa dai vagoni (f_{iudV} , espressa in "incidenti del vagone/km percorso dal vagone"). Il valore della frequenza di rilascio su ogni tratta ferroviaria risulta dato dalla somma del contributo delle due classi di incidente. Dal punto di vista matematico questo si traduce nella seguente relazione:

$$f_{ril} = (i_{tv} \cdot f_{iudV} + i_{tt} \cdot f_{iudT} \cdot n_{vm} \cdot p_{cv}) \cdot p_{ril} \cdot L \quad (4)$$

dove i_{tv} e i_{tt} sono, rispettivamente, l'intensità del traffico dei vagoni e dei treni che trasportano una sostanza pericolosa sulla tratta (espressi rispettivamente come "vagoni/anno" e "treni/anno"), n_{vm} è il numero medio di vagoni per treno che trasportano la sostanza pericolosa, p_{cv} la probabilità di coinvolgimento di ciascun vagone nell'incidente e p_{ril} la probabilità di rilascio dal vagone in seguito al verificarsi di un incidente (supposta uguale per le due classi d'incidenti). Inoltre poiché vale la seguente relazione:

$$i_{tv} = i_{tt} \cdot n_{vm} \quad (5)$$

sostituendo la (5) nella (4) si ottiene l'equazione (6):

$$f_{ril} = (f_{iudV} + f_{iudT} \cdot p_{cv}) \cdot i_{tv} \cdot p_{ril} \cdot L \quad (6)$$

Questo approccio teorico rigoroso non è tuttavia seguito nella pratica, principalmente per l'assenza di dati storici sufficientemente dettagliati sugli incidenti ferroviari. Infatti, in generale, non sono disponibili dati di frequenza di incidente distinti secondo le due classi di incidenti, ma si ha un solo valore di fre-

quenza espresso o come "incidenti del vagone/km percorso dal vagone" (f_{iuv}) o come "incidenti del treno/km percorso dal treno" (f_{iut}) che comprende presumibilmente entrambe le tipologie di incidente. I due valori sono ovviamente diversi tra loro, ed inoltre, poiché più di un vagone può essere coinvolto in un incidente, non sono confrontabili se non in modo approssimato, cioè effettuando delle ipotesi sul numero medio di vagoni contenenti la sostanza in esame per treno e sul numero medio di vagoni coinvolti nell'incidente.

Dati storici per il trasporto ferroviario

Nel presente lavoro si sono esaminate alcune delle fonti della letteratura tecnica che riportano dati sulle frequenze di incidente, sulle probabilità di rilascio e sulle frequenze di rilascio. I dati raccolti pur non rappresentando la totalità di quelli disponibili, costituiscono un insieme di notevole ampiezza e significatività per una prima revisione ed analisi critica del problema.

Frequenza di incidente unitaria nel trasporto ferroviario

I dati reperiti in letteratura sono riassunti in Tabella 2.

Nella Tabella 2 i dati sono suddivisi a seconda che la frequenza incidentale sia espressa come "incidenti del vagone/km percorso dal vagone" (f_{iuv}) o come "incidente del treno/km percorso dal treno" (f_{iut}). Il rapporto tra il valore massimo ed il valore minimo dei dati, riportato in Tabella (max/min), permette di valutare l'ordine di grandezza della dispersione dei dati.

In questa, come pure nelle tabelle seguenti, è riportato anche il valore della media geometrica dei dati reperiti. Questo rappresenta in realtà soltanto il punto centrale dell'intervallo dei valori presenti, ma consente di evidenziare efficacemente il contributo di tutti i termini, la cui variabilità può estendersi ad oltre due ordini di grandezza. Va però sottolineato che in alcune tabelle questo valore è stato ottenuto effettuando la media su un numero estremamente limitato di dati, quindi non può essere assunto quale valore statistico significativo. Si può osservare dalla Tabella 2 come il rapporto tra il valore massimo e minimo di ogni categoria di dati sia superiore a 100, ovvero a due ordini di grandezza, considerando in modo congiunto i dati europei e quelli americani. Disaggregando i dati si può notare invece come la dispersione dei dati specifici delle due aree geografiche si riduca a meno di un ordine di grandezza, confermando quindi l'influenza delle caratteristiche della rete ferroviaria sulla frequenza incidentale. Da questi risultati si evince che è improprio applicare alla realtà europea, e nello specifico, a quella italiana, dati storici provenienti da fonti americane.

Probabilità di rilascio nel trasporto ferroviario

I fattori fondamentali che influenzano la probabilità di rilascio a seguito d'incidente sono la velocità del vagone al momento dell'impatto ed il tipo di contenitore, che ne determina la resistenza meccanica. Al fine di poter confrontare i dati ottenuti dalle diverse fonti, seguendo i criteri illustrati in dettaglio altrove [20] sono state definite tre categorie di velocità (bassa, media, alta) e due tipologie di contenitori (in pressione, non in pressione). Raramente in letteratura sono riportati dati disaggregati in funzione della velocità consentita sul binario, mentre

Tabella 3 - Probabilità di rilascio (condizionata ad incidente del vagone) nel trasporto ferroviario di sostanze pericolose

Rif.	p_{ril}	$p_{ril}(P)$	$p_{ril}(NP)$	$p_{ril}(NP)/p_{ril}(P)$	n. in Fig. 2*
[1]		0,033	0,100	3,0	1
[2]		0,010	0,050	5,0	2
[3]	0,560				3
[8]		0,080	0,290	3,6	4
[9]	0,033				
[5]		0,117			5
[23]		0,080			6
[24]		0,041			7
Media geom.	0,136	0,046	0,113	3,8	
Max/Min	17,0	11,7	5,8	1,67	

* vedi seconda parte

pure che consentono di risalire immediatamente ad essa, fornendo stime sia per la frequenza di incidente unitaria che per la probabilità di rilascio. In Tabella 4 sono state riportate le frequenze di rilascio unitarie f_{ruv} per contenitori non differenziati, $f_{ruv}(P)$ per contenitori in pressione, $f_{ruv}(NP)$ per contenitori non in pressione. Inoltre, sulla base delle considerazioni sopra esposte sono stati separati i dati provenienti da fonti europee da quelli provenienti da fonti americane.

Dall'analisi della Tabella 4 si evidenzia una notevole dispersione dei dati riguardanti la frequenza di rilascio unitaria nel contesto europeo, mentre la variabilità dei dati nordamericani è molto più contenuta.

Dati storici per il trasporto stradale

spesso sono effettuate distinzioni basate sul tipo di contenitore. A questo riguardo è intuitivo che un recipiente in pressione abbia pareti più spesse e sia progettato con criteri più cautelativi di un recipiente non in pressione. A questo consegue anche una resistenza meccanica maggiore agli urti ed alle sollecitazioni provocate da un incidente. Purtroppo il grado di dettaglio e l'esiguità dei dati storici a disposizione non consentono di ottenere dati statisticamente significativi per categorie specifiche di recipienti (ad esempio cisterne per trasporto di cloro o cisterne per il trasporto di ammoniaca). A causa delle maggiori quantità di sostanza trasportate sulle reti ferroviarie Europee e Americane, i dati relativi alla categoria dei recipienti in pressione sono principalmente relativi a cisterne analoghe a quelle impiegate per il trasporto di GPL, mentre i dati relativi alla categoria dei recipienti non in pressione sono prevalentemente riconducibili a cisterne impiegate per il trasporto di benzina o gasolio. Dunque i valori della probabilità di rilascio condizionata ad incidenti reperibili in letteratura si possono considerare soddisfacenti per le ferrocisterne adibite al trasporto di benzina o GPL, ma non certamente per cisterne progettate per il trasporto di sostanze particolari. I dati di probabilità di rilascio reperiti dalle diverse fonti, riassunti in Tabella 3, mostrano un'elevata dispersione, oscillando tra 0,01e 0,56. La variazione delle probabilità di rilascio è quindi pari circa ad un fattore 17,0 se non si introducono distinzioni tra tipologie di recipienti. Separando invece i dati dei recipienti in pressione da quelli dei recipienti non in pressione, la variabilità si riduce ad un fattore pari, rispettivamente, a 11,7 e 5,8. In ogni caso, a conferma di quanto detto in precedenza, si può notare dalla Tabella come per tutte le fonti che riportano dati disaggregati per tipologia di contenitore, la probabilità di rilascio da recipienti non in pressione risulti maggiore di un fattore compreso tra 3 e 5 rispetto alla probabilità di rilascio da recipienti in pressione.

La variazione delle probabilità di rilascio è quindi pari circa ad un fattore 17,0 se non si introducono distinzioni tra tipologie di recipienti. Separando invece i dati dei recipienti in pressione da quelli dei recipienti non in pressione, la variabilità si riduce ad un fattore pari, rispettivamente, a 11,7 e 5,8. In ogni caso, a conferma di quanto detto in precedenza, si può notare dalla Tabella come per tutte le fonti che riportano dati disaggregati per tipologia di contenitore, la probabilità di rilascio da recipienti non in pressione risulti maggiore di un fattore compreso tra 3 e 5 rispetto alla probabilità di rilascio da recipienti in pressione.

Frequenza di rilascio unitaria nel trasporto ferroviario

Sono stati presi in considerazione solamente i dati relativi alle fonti che riportano direttamente il valore della frequenza di rilascio unitaria op-

Frequenza di incidente unitaria nel trasporto stradale

Le diverse fonti di dati storici reperite hanno in generale suddiviso i dati secondo categorie di strade non omogeneamente definite. Per poter confrontare i dati è stato quindi necessario un lavoro preliminare di armonizzazione delle categorie di riferimento per la classificazione dei dati storici.

I fattori ritenuti fondamentali in letteratura [4] per la quantificazione della frequenza d'incidente unitaria nel trasporto su strada sono rappresentati essenzialmente dalla velocità media, dal numero delle corsie per ogni senso di marcia e dalle caratteristiche del percorso (per esempio dalla presenza di curve, incroci ecc.).

I dati reperiti dalle diverse fonti consultate non sono però stati suddivisi sulla base di questi fattori, ma risultano in generale riferiti a tipologie di strade le cui caratteristiche, pur non omogeneamente definite dalle diverse fonti, sono comunque riconducibili agli elementi elencati.

Al fine di potere confrontare i dati reperiti da fonti diverse sono quindi state individuate categorie di riferimento a cui fare corrispondere le varie tipologie di strada definite da queste, seguendo criteri esposti più dettagliatamente altrove [20].

Le categorie di strada sono state definite in base alle seguenti caratteristiche:

Tabella 4 - Frequenza unitaria di rilascio del vagone nel trasporto ferroviario di sostanze pericolose

Rif.	dati Europa			dati Usa		
	$f_{ruv}(P)$	$f_{ruv}(NP)$	f_{ruv}	$f_{ruv}(P)$	$f_{ruv}(NP)$	f_{ruv}
[10]	$2,50 \cdot 10^{-9}$	$6,30 \cdot 10^{-8}$				
[1]	$1,65 \cdot 10^{-9}$	$5,00 \cdot 10^{-9}$				
[2]	$1,15 \cdot 10^{-10}$	$5,75 \cdot 10^{-10}$				
[3]			$3,7 \cdot 10^{-8}$			
[4]				$1,34 \cdot 10^{-8}$		$4,87 \cdot 10^{-8}$
[5]				$5,48 \cdot 10^{-8}$		
[23]				$7,52 \cdot 10^{-8}$		
[24]	$1,21 \cdot 10^{-8}$					
[22]	$1,10 \cdot 10^{-8}$			$1,10 \cdot 10^{-8}$		
[22]				$7,50 \cdot 10^{-8}$		
[26]			$4,10 \cdot 10^{-9}$		$4,19 \cdot 10^{-9}$	
Media geom.	$2,29 \cdot 10^{-9}$	$6,24 \cdot 10^{-9}$	$1,23 \cdot 10^{-8}$	$3,40 \cdot 10^{-8}$	$4,19 \cdot 10^{-9}$	$4,87 \cdot 10^{-8}$
Max/Min	105,2	109,6	9,0	6,8	/	/

Tabella 5 - Frequenza incidentale unitaria nel trasporto stradale di sostanze pericolose in funzione della tipologia di strada e di ambiente

Rif.	A_{ex}	A_{urb}	A_{ex+urb}	B_{ex}	B_{ex+urb}	$A_{ex} + B_{ex}$	$A_{urb} + B_{urb}$	Tutte	n. in Fig. 3*
[1]								$7,00 \cdot 10^{-6}$	1
[2]	$3,00 \cdot 10^{-7}$	$4,20 \cdot 10^{-6}$		$4,30 \cdot 10^{-8}$				$3,90 \cdot 10^{-7}$	2
[11]								$8,20 \cdot 10^{-7}$	
[12]						$3,30 \cdot 10^{-7}$	$3,10 \cdot 10^{-7}$		
[3]	$4,00 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$		$1,50 \cdot 10^{-7}$					3
[8]	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$		$6,60 \cdot 10^{-7}$		$4,60 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$		8
[4]	$3,98 \cdot 10^{-7}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$		$1,36 \cdot 10^{-6}$					9
[13]			$2,50 \cdot 10^{-7}$		$7,50 \cdot 10^{-7}$				
[27]			$1,19 \cdot 10^{-7}$		$6,00 \cdot 10^{-8}$			$9,40 \cdot 10^{-8}$	
[28]			$1,15 \cdot 10^{-7}$	$3,65 \cdot 10^{-7}$					
[25]								$6,70 \cdot 10^{-7}$	
[23]								$1,60 \cdot 10^{-6}$	6
[29]								$8,70 \cdot 10^{-7}$	
[30]								$5,49 \cdot 10^{-6}$	
[31]								$2,86 \cdot 10^{-6}$	
[32]								$8,00 \cdot 10^{-7}$	
Media geom.	$2,82 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$2,76 \cdot 10^{-7}$	$2,12 \cdot 10^{-7}$	$3,87 \cdot 10^{-7}$	$6,35 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	
Max/Min	33	8,4	2,2	31,6	12,5	1,6	3,7	74,5	

* vedi seconda parte

Probabilità di rilascio nel trasporto stradale

Come già nel caso del trasporto ferroviario, anche per il trasporto stradale i dati reperibili in letteratura sono spesso distinti in base al tipo di recipiente:

- in pressione;
- non in pressione.

I dati raccolti sono riassunti in Tabella 6.

Si può notare come, mentre la probabilità di rilascio per recipienti generici presenta un'elevata incertezza (pari ad un fattore 23,1, cioè a più di un ordine di grandezza), la variabilità delle probabilità di rilascio per le due categorie di recipienti è più contenuta ed in particolare è inferiore ad un fattore 5,0 in entrambi i casi, se si trascura il dato di Pages e Hubert [21] per i recipienti in pressione.

- numero di corsie per ogni senso di marcia: a) singola corsia (A), b) doppia corsia (B);
- caratteristiche della zona attraversata: a) zona urbana (urb), b) zona extraurbana (ex).

La suddivisione è stata effettuata avendo come riferimento la rete stradale italiana, ovvero includendo nella categoria A le strade statali e provinciali e nella categoria B le autostrade. I criteri definiti hanno perciò consentito di individuare le seguenti categorie di strade: a singola corsia urbana A_{urb} , a singola corsia extraurbana A_{ex} , a doppia corsia urbana B_{urb} e a doppia corsia extraurbana B_{ex} . Si può notare come la suddivisione proposta corrisponda indirettamente a valori diversi di velocità (poiché una strada a più corsie in generale ha un limite di velocità più alto di una strada a singola corsia) e a diversi regimi di marcia (approssimativamente stazionario su una strada a doppia, corsia specie in zone extraurbane, altamente variabile in ambiente urbano).

I dati relativi alla frequenza d'incidente unitaria, suddivisi nelle categorie stradali di riferimento, sono riportati nella Tabella 5.

Si può notare come i dati forniti dalle diverse fonti per la frequenza incidentale abbiano una variabilità contenuta entro un ordine di grandezza per tutte le categorie individuate, raggiungendo invece quasi due ordini di grandezza quando si consideri il valore medio per tutte le categorie di strada. Ciò conferma la necessità di utilizzare dati di frequenza di incidente specifici per categoria di strada e di ambiente attraversato, anziché valori mediati su tutte le classi.

Frequenza di rilascio unitaria nel trasporto stradale

Anche per il caso del trasporto stradale si sono esaminati i dati relativi alle fonti che riportano direttamente il valore della frequenza di rilascio unitaria oppure consentono di risalire imme-

Tabella 6 - Probabilità di rilascio condizionata ad incidente nel trasporto stradale

Rif.	p_{ril}	$p_{ril}(P)$	$p_{ril}(NP)$	$p_{ril}(NP)/p_{ril}(P)$	n. in Fig. 3**
[1]		0,033	0,100	3,0	1
[2]		0,023	0,070	3,0	2
[11]	0,115				
[12]		0,037			
[3]	0,600				3
[8]		0,080	0,190	2,4	8
[4]	0,081*				9
[5]		0,016			5
[14]		0,075			
[13]	0,143	0,081	0,188	2,3	
[15]	0,395				
[16]			0,210		
[17]	0,174				
[18]		0,081			
[8]	0,033				
[33]	0,429				
[19]		0,052			
[21]		0,260			
[23]		0,113			6
Media geom.	0,172	0,050#	0,139	2,7	
Max/min	18,2	7,1#	3,0	1,3	

* valore mediato tra valori specifici per tipologia di strada; # valore ottenuto trascurando [21]

** vedi seconda parte

Tabella 7 - Frequenza unitaria di rilascio nel trasporto stradale

Tipo di contenitore	Fonte	A_{ex}	B_{ex}	$A_{ex}+B_{ex}$	A_{urb}	tutte
contenitori non in pressione $f_{ru}(NP)$	[1]					$7,00 \cdot 10^{-7}$
	[2]	$2,10 \cdot 10^{-8}$	$3,01 \cdot 10^{-9}$		$2,94 \cdot 10^{-7}$	$2,73 \cdot 10^{-8}$
	[8]	$2,51 \cdot 10^{-7}$		$7,71 \cdot 10^{-8}$	$2,05 \cdot 10^{-7}$	
	[10]					$2,10 \cdot 10^{-8}$
	Media geom.	$2,10 \cdot 10^{-8}$	$3,01 \cdot 10^{-9}$	$9,16 \cdot 10^{-8}$	$2,94 \cdot 10^{-7}$	$8,45 \cdot 10^{-8}$
	Max/Min	11,9	/	/	1,4	33,3
contenitori in pressione $f_{ru}(P)$	[1]					$2,31 \cdot 10^{-7}$
	[2]	$6,90 \cdot 10^{-9}$	$9,89 \cdot 10^{-10}$		$9,66 \cdot 10^{-8}$	$8,97 \cdot 10^{-9}$
	[8]	$1,06 \cdot 10^{-7}$		$3,25 \cdot 10^{-8}$	$8,64 \cdot 10^{-8}$	
	[10]					$4,80 \cdot 10^{-10}$
	[12]			$1,22 \cdot 10^{-8}$		
	Media geom.	$6,90 \cdot 10^{-9}$	$9,89 \cdot 10^{-10}$	$2,10 \cdot 10^{-8}$	$9,66 \cdot 10^{-8}$	$1,52 \cdot 10^{-8}$
	Max/Min	15,4	/	3,4	/	481,3
contenitori generici f_{ru}	[3]	$2,40 \cdot 10^{-8}$	$9,00 \cdot 10^{-8}$	$3,72 \cdot 10^{-8}$		
	[4]	$3,58 \cdot 10^{-8}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$		$8,37 \cdot 10^{-8}$	
	[21]					$1,30 \cdot 10^{-7}$
	[23]					$1,81 \cdot 10^{-7}$
	Media geom.	$2,93 \cdot 10^{-8}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$3,72 \cdot 10^{-8}$	$8,37 \cdot 10^{-8}$	$1,53 \cdot 10^{-7}$
	Max/Min	1,5	1,3	/	/	1,4

diatamente ad essa a partire dalla frequenza di incidente unitaria e dalla probabilità di rilascio. I dati sono riassunti nella Tabella 7. Occorre notare come la maggior parte delle fonti non riporti contemporaneamente dati di frequenza d'incidente distinti per categorie di strada e dati di probabilità di rilascio distinti per tipologia di contenitore. Ad una prima analisi, i dati riportati presentano perciò una notevole dispersione.

Nomenclatura

i_{tr}	intensità del traffico (veicoli/anno)
i_{tt}	intensità del traffico riferita al numero di treni (treni/anno)
i_{tv}	intensità del traffico riferita al numero di vagoni (vagoni/anno)
f_{iu}	frequenza d'incidente unitaria (incidenti/km percorso dal veicolo)
f_{iudT}	frequenza unitaria degli incidenti che dipendono dalla distanza percorsa dal treno (incidenti del treno/km percorso dal treno)
f_{iudV}	frequenza unitaria degli incidenti che dipendono dalla distanza percorsa dal vagone (incidenti del vagone/km percorso dal vagone)
f_{iut}	frequenza d'incidente unitaria riferita al treno (incidenti/km percorso dal treno)
f_{iuv}	frequenza d'incidente unitaria riferita al vagone (incidenti/km percorso dal vagone)
f_{ril}	frequenza di rilascio (rilasci/anno)
f_{ru}	frequenza di rilascio unitaria (rilasci/km percorso dal veicolo)
f_{rut}	frequenza di rilascio unitaria riferita al treno (rilasci/km percorso dal treno)
f_{ruv}	frequenza di rilascio unitaria riferita al vagone (rilasci/km percorso dal vagone)
L	lunghezza della tratta ferroviaria o stradale (km)
NP	contenitore non in pressione
n_{vm}	numero medio di vagoni del treno
P	contenitore in pressione
p_{cv}	probabilità media di incidente del vagone condizionata all'incidente del treno
p_{ril}	probabilità di rilascio condizionata al verificarsi dell'incidente
R	rapporto tra frequenza o probabilità di rilascio ferroviaria in funzione della velocità e valore medio

Bibliografia

- [1] D. Egidi, F.P. Foraboschi *et al.*, *Reliability Eng. System Safety*, 1995, **49**, 75.
- [2] L.H. Brockhoff, A risk management model for transport of dangerous goods, Eur 14675 En, Commission of the European Communities, Luxembourg, 1992.
- [3] R. Bubbico, S. Di Cave, G. Dore, B. Mazzarotta, Atti del Convegno Nazionale Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali Vgr 98, Pisa, 1998, Dcmn, Pisa, 64.
- [4] Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis, AiChe, New York 1995.
- [5] F.F. Saccomanno, J.H. Shortreed, *J. Transportation Eng.* 1993, **119**, 177.
- [6] Us Federal Railroad Administration, Railroad Accident/Incident Database, Fra Office of Safety, Washington Dc, 1999.
- [7] M. Nicolet-Monnier, A.V. Gheorghe, Quantitative risk assessment of hazardous materials transport system, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
- [8] F.P. Lees, Loss prevention in the process industries, Butterworth-Heinemann, London, 1996.
- [9] M. Van Aerde, A.M. Stewart, F.F. Saccomanno, *J. Hazardous Materials* 1988, **20**, 375.
- [10] Advisory Committee on Dangerous Substances, Major Hazard Aspects of the Transport of Dangerous Substances, HM stationery Office, London, 1991.
- [11] A. Bertelle, P. Haastrup, Trasporto di merci pericolose: elementi di valutazione per l'assicuratore, Il Sole 24ore Libri, Milano, 1996.
- [12] S.B. Russell, T. F. Kempe in F.F. Saccomanno, K. Cassidy, Transport of dangerous goods: assessing the risk, Irr, Waterloo, 1993.
- [13] S. Lassarre, K. Fedra, E. Weigkrecht, *J. Transportation Eng.* 1993, **119**, 200.
- [14] D.W. Harwood, J.G. Viner, E.R. Russell, Characteristics of accidents and incidents in highway transportation of hazardous materials, Tr 1264, Transportation Research Board, Washington Dc, 1989.
- [15] G. Marsili, L. Lauria, M.E. Soggiu, Proc. Annual Meeting of the Society for Risk Analysis, Amsterdam, 1995, Sra Europe, Amsterdam, 254.
- [16] H. Sherali, L. Brinzendine *et al.*, *Transportation Science*, 1997, **31**, 237.
- [17] A.G. Hobeika, S. Kim, R. Sethuraman, *J. Transportation Eng.*, 1993, **119**, 226.
- [18] A.A. Lovett, J.P. Parfitt, J.S. Brainard, *Risk Analysis*, 1997, **17**, 625.
- [19] G. Tiemessen, J.P. Zweeden, Proc. 9th Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion, Barcelona 1998, Editorial Signo, Barcelona, 299.
- [20] L. Vanni, Aggiornamento della valutazione del rischio nelle aree industriali e portuali di Livorno e Piombino, Tesi di Laurea in Ingegneria Chimica, Università di Pisa, Pisa 2000.
- [21] P. Pages, P. Hubert, Methods available for the assesment of risk related to the transport of dangerous substance, Centre d'etude sur l'evaluation de la protection dans le domaine nucleaire, Lyon, 1989.