



# TT & T

DIPARTIMENTO DI ELETTROTECNICA

CENTRO PER LO SVILUPPO  
DEL POLO DI PIACENZA

# 4

2002  
agosto

## TRASPORTI e TRAZIONE

Rivista di scienza, tecnica, economia e pianificazione dei trasporti



*Il frazionamento obbligato della rete dei trasporti milanese  
in vista dell'affidamento del servizio alle imprese private.  
Questioni di legittimità costituzionale della legge regionale*

*Aldo Bardusco*

*Modelli arima univariati e multivariati per lo studio  
della domanda di trasporto aereo (Prima parte)*

*Giuseppe Reitano*

*L'evacuazione urbana in condizioni di emergenza sismica*

*Umberto Petrucelli*

*Tariffe e sussidi nei servizi ferroviari passeggeri locali*

*Stefano Erba*





Centro per lo Sviluppo  
del Polo di Piacenza

Dipartimento di Elettrotecnica



TRASPORTI e TRAZIONE

Rivista di scienza, tecnica, economia e pianificazione dei trasporti

SOCI  
FONDATORI



AZIENDA TRASPORTI MILANESE S.p.A.



FERROVIE  
NORD  
MILANO  
spa

**Direttore responsabile**

prof. ing. Francesco Perticaroli

**Vice Direttore**

prof. ing. Dario Zaninelli

**Direzione Amministrativa**

prof. ing. Francesco Perticaroli

**Comitato di Redazione**

prof. arch. Sandra Bonfiglioli, dr. ing. Roberto Maja,  
prof. ing. Renato Manigrasso, prof. ing. Francesco Perticaroli,  
prof. ing. Claudio Podestà, prof. arch. Marco Ponti,  
prof. ing. Enrico Tironi, prof. ing. Dario Zaninelli

**Comitato di Consulenza**

dr. ing. Mauro Moretti, dr. ing. Giorgio Spatti,  
dr. ing. Diego Vecchio

**Redazione e Amministrazione**

Dipartimento di Elettrotecnica - Politecnico di Milano  
P.zza Leonardo da Vinci, 32 - 20133 Milano  
Tel. 02 23993790 • 02 23993742 - Fax 02 23993703  
e.mail: rivista.tt@ctec.polimi.it

**Edizione**

Metafora Srl  
Via Catania, 8 - 20133 Milano  
Tel. 02 71040091 • 02 45485095 - Fax 02 45485097

**Amministratore Delegato**

dr. Sergio Vicario

**Redazione editoriale e Abbonamenti**

Metafora Srl  
Claudia Milan (responsabile) - Tel. 02 71040091  
e.mail: cmilan@metafora.fastwebnet.it

**Pubblicità**

dr. ing. Franco Menconi  
Tel. e Fax 02 48707842 - Cell. 349 2553773

**Tariffa Abbonamenti 2002**

€ 41,00 (1 copia € 7,00)  
Per studenti  
€ 20,00 (1 copia € 3,50)

La pubblicazione o ristampa degli articoli della rivista  
deve essere autorizzata per iscritto  
dalla Direzione

Registrazione del Tribunale di Milano  
N. 355 del 23 maggio 1988  
Sped. in abb. post. 70%, comma D  
D.C./D.C.I. Novara  
Taxe perçue (tariffa riscossa)  
CRP Novara C.P.O.

Finito di stampare nel mese di settembre 2002  
da Nuova Tipografia San Gaudenzio S.p.A. (Novara)

## SOMMARIO

Anno 15 - Numero 4 - agosto 2002

### 122 EDITORIALE

Renato Manigrasso

### 123 IL FRAZIONAMENTO OBBLIGATO DELLA RETE DEI TRASPORTI MILANESE IN VISTA DELL'AFFIDAMENTO DEL SERVIZIO ALLE IMPRESE PRIVATE. QUESTIONI DI LEGITTIMITA COSTITUZIONALE DELLA LEGGE REGIONALE

Aldo Bardusco

Università degli Studi di Milano Bicocca

### 130 MODELLI ARIMA UNIVARIATI E MULTIVARIATI PER LO STUDIO DELLA DOMANDA DI TRASPORTO AEREO (PRIMA PARTE)

Giuseppe Reitani

Dipartimento di Ingegneria Edile e del Territorio - Università di Pavia

### 144 L'EVACUAZIONE URBANA IN CONDIZIONI DI EMERGENZA SISMICA

Umberto Petruccelli

D.A.P.I.T. - Università della Basilicata, Potenza

### 153 TARIFFE E SUSSIDI NEI SERVIZI FERROVIARI PASSEGGERI LOCALI

Stefano Erba

DiAP Dipartimento di Architettura e Pianificazione - Politecnico di Milano

### 165 NOTIZIARIO

Questa rivista Le è stata inviata tramite abbonamento: l'indirizzo  
in nostro possesso verrà utilizzato per l'invio di questa e altre  
riviste o per l'invio di proposte di abbonamento. Ai sensi della  
legge n. 675/96 è nel diritto del ricevente richiedere la cessazione  
dell'invio e/o l'aggiornamento dei dati in nostro possesso.

**In copertina:** Imbocco nord della galleria di Vasto, aperta all'esercizio nello scorso mese di luglio  
(vedi Notiziario). A sinistra la vecchia linea costiera, che costituisce il binario dispari tra le stazioni  
di Porto di Vasto e Vasto S. Salvo. A destra il nuovo binario pari, in galleria (foto RFI SpA).

# L'EVACUAZIONE URBANA IN CONDIZIONI DI EMERGENZA SISMICA

Umberto Petruccelli

D.A.P.I.T. Università della Basilicata - Potenza

*Problema di notevole complessità, nell'ambito dello studio della mobilità, è quello dell'evacuazione urbana spontanea o programmata a causa di un evento catastrofico previsto o appena verificatosi. Le difficoltà di analisi sono connesse ad una domanda molto concentrata con caratteristiche (origine, destinazione ed orario di partenza) non note a priori e condizionate dal panico e che utilizza una rete talvolta danneggiata dall'evento stesso o impegnata dai veicoli di soccorso, la cui mobilità riveste comunque carattere prioritario.*

*Il lavoro qui presentato analizza i problemi della programmazione e gestione dell'evacuazione urbana con riferimento alla letteratura internazionale specifica. La memoria è articolata in quattro paragrafi: il primo tratta gli aspetti generali evidenziando le differenze fra evacuazione programmata e spontanea; il secondo ed il terzo esaminano rispettivamente i modelli rappresentativi del fenomeno e l'influenza del comportamento della popolazione; l'ultimo paragrafo discute la possibilità di migliorare il funzionamento della rete stradale attuando specifiche regolazioni della circolazione.*

## Aspetti generali del problema

Per effetto di un evento calamitoso il sistema di trasporto può trovarsi a funzionare in condizioni molto diverse da quelle ordinarie: la domanda di trasporto assume, in un tempo più o meno breve, distribuzione e caratteristiche del tutto particolari e l'offerta infrastrutturale viene ad essere talvolta limitata in conseguenza dell'evento stesso.

Una prima suddivisione fra gli eventi catastrofici consente di distinguere tra eventi naturali quali terremoti, alluvioni, uragani e quelli conseguenti ad incidenti occorsi in attività antropiche più o meno a rischio, quali fughe di gas radioattivi o tossici da impianti nucleari o chimici, crollo di dighe, rotture di argini.

Generalmente è possibile ridurre l'esposizione al rischio della popolazione con misure di sicurezza attive e passive: fra le prime ricadono quelle in grado di ridurre la probabilità che l'evento si manifesti o la sua entità e fra le altre quelle in grado di contenerne gli effetti sulle persone e sulle cose. E' evidente tuttavia che, nei confronti di alcune calamità naturali quali i terremoti e gli uraga-

*The urban spontaneous or planned evacuation due to an expected or just happened disaster is a very complex problem in the transportation study. The intricacies are related to a very intense transportation demand with a priori unknown and dependent on panic features (origin, destination and start time); this demand utilizes a road network sometimes damaged in the same disaster or taken by emergency vehicles that have top priority.*

*This work examines the problems of the urban evacuation planning and management related to the international literature about this subject. The paper is divided into four sections: the first one deals with the generalities underlining the differences in planned and spontaneous evacuation; the second and third sections treat about the evacuation models and the people's behavior relevance on them respectively; the last section discusses the possibility of the road network performances improvement by specific traffic controls.*

ni, non si è ad oggi in grado di adottare misure di sicurezza attive.

Si è soliti coordinare un insieme di misure ed interventi di sicurezza passiva attraverso un piano di emergenza o di protezione civile nell'ambito del quale è spesso prevista l'evacuazione. Questa operazione in effetti evita solo i danni alle persone e si presenta come l'ultima delle misure attuabili quando non si è in grado di garantire diversamente l'incolumità della popolazione. Si tratta di un'operazione piuttosto complessa e delicata che può facilmente dar luogo ad imprevisti ed incidenti. Essa è tanto più difficile e rischiosa quanto minore è il tempo a disposizione per realizzarla e quanto meno è coordinata nei tempi e nelle modalità di svolgimento.

E' desiderio comune di quanti sono costretti ad abbandonare la propria abitazione di allontanarsi insieme alla propria famiglia utilizzando la propria automobile che costituisce un riparo dalle intemperie ed un mezzo di trasporto abbastanza capiente per portare con sé generi di prima necessità. Pertanto lo spostamento contemporaneo di tanti veicoli a fronte di una capacità stradale limitata soprattutto in alcuni elementi della rete è causa

di estesi fenomeni di saturazione e di lunghi accodamenti a cui consegue un prolungamento sensibile dei tempi di svuotamento.

Più semplice può risultare l'evacuazione prima dell'evento catastrofico allorché questo sia prevedibile con sufficiente anticipo. In questo caso infatti si ha a disposizione un intervallo di tempo di diverse ore per allontanare la popolazione che d'altra parte, non trovandosi in condizioni di panico, è più facilmente indirizzabile; è possibile quindi ipotizzare uno scaglionamento spontaneo o imposto delle partenze che può dar luogo a flussi pressoché stazionari durante il tempo di fuga. L'ulteriore semplificazione di questo tipo di scenario di evacuazione è costituita dalla possibilità di impegnare in linea di principio l'intera capacità della rete stradale che non ha ancora subito danni e non è ancora impegnata dai mezzi di soccorso.

I terremoti differiscono tra l'altro dagli altri eventi disastrosi per l'attuale impossibilità di prevederne con sufficiente attendibilità e precisione il verificarsi della prima scossa e di quelle di assestamento. Ciò ha come conseguenza che un'eventuale evacuazione non può che avvenire dopo il sisma, con evidenti complicazioni.

Lo studio dell'evacuazione si articola nei seguenti passi:

- delimitazione dell'area a rischio e del relativo confine;
- determinazione della durata del rischio, cioè del periodo successivo all'evento durante il quale non sarà possibile ritornare nell'area interessata dal disastro;
- individuazione delle destinazioni di fuga e delle attrezzature ivi necessarie (sulla base dei dati di cui ai punti precedenti);
- determinazione del tempo intercorrente fra l'allarme e l'evento;
- verifica della probabilità che l'evacuazione possa avvenire nel tempo di cui al punto precedente in assenza di imprevisti in modo spontaneo o coordinato.

Molto complessa si presenta l'individuazione degli scenari domanda/offerta rappresentativi dell'evacuazione in seguito a sisma. In questo caso infatti l'evacuazione vera e propria, individuabile con lo spostamento dalla propria abitazione ad un luogo sicuro fuori dall'area a rischio, è spesso preceduta da uno o più spostamenti, finalizzati a riunire la famiglia, difficilmente schematizzabili. Lo studio dell'evacuazione dopo l'evento sismico richiede tra l'altro la conoscenza di altre variabili non trasportistiche per la determinazione della rete infrastrutturale di offerta consistenti essenzialmente nella vulnerabilità da sisma diretta (propria) ed indiretta (per effetto del crollo dei fabbricati prospicienti e della rottura dei sottoservizi) degli archi e dei nodi della rete.

La non prevedibilità del sisma rende comunque più complessa la stima del tempo di evacuazione in auto non coordinata in quanto è necessario tener conto della non stazionarietà dei flussi che impegnano la rete. Sia per gli eventi prevedibili che per quelli non prevedibili, un'ulteriore complicazione è costituita dall'impossibilità di trascurare un certo numero di imprevisti che condi-

zionano sensibilmente l'evacuazione, quali il mancato rispetto, da parte di un'aliquota della popolazione, delle indicazioni e degli obblighi imposti, il verificarsi di incidenti stradali anche non gravi, l'inefficienza di alcuni veicoli.

L'analisi dei trasporti in condizioni di rischio naturale o tecnologico è nata intorno all'inizio degli anni '70 ed ha visto negli USA un significativo impegno successivamente al 1979, a seguito dell'incidente all'impianto nucleare di Three Mile Island [13]. La necessità allora imposta dal Governo Federale Americano di stimare il tempo di evacuazione di un'area avente un raggio di 10 miglia da ciascun impianto nucleare spinse la ricerca a sviluppare diverse metodologie specifiche.

Minore impegno è stato dedicato alla ricerca relativa all'evacuazione conseguente in particolare ad un evento sismico. Diverse sono le motivazioni: oltre alla difficoltà, a cui si è già accennato, di mettere a punto scenari di domanda verosimili e rappresentativi, sicuramente hanno pesato le difficoltà ed i rischi connessi all'attuazione di una evacuazione in condizioni di panico; peraltro l'incolumità della popolazione in presenza di un sisma, a differenza di altre catastrofi naturali o tecnologiche, si può garantire più facilmente assicurando, con tecnologie consolidate, la resistenza a sisma degli edifici e delle infrastrutture.

E' presumibile quindi che il motivo principale per cui la ricerca internazionale ha dedicato pochissima attenzione ai problemi di evacuazione a seguito di eventi sismici consista nell'opportunità, ormai generalmente riconosciuta, di evitare, ove possibile, questa misura estrema garantendo la sicurezza della popolazione all'interno degli edifici opportunamente resi antisismici. Tuttavia l'impossibilità di escludere il verificarsi di un evento sismico di intensità sensibilmente superiore a quella prevista nella zona e l'esistenza in alcuni paesi come l'Italia di un patrimonio edilizio per la maggior parte non antisismico, che sembra destinato a rimanere tale, determina l'opportunità di predisporre, all'interno del piano di protezione civile, l'evacuazione di quartieri o settori urbani o di intere città.

In sintesi un'evacuazione successiva ad un evento sismico si differenzia da un'evacuazione precedente un altro evento disastroso previsto per i seguenti aspetti, alcuni dei quali sono approfonditi più avanti in questa memoria:

- indeterminazione del tempo a disposizione della popolazione per mettersi al riparo;
- maggiore concentrazione della domanda con conseguenti più estesi fenomeni di saturazione;
- maggiore complessità degli scenari di domanda da analizzare;
- possibile riduzione dell'offerta per effetto della eventuale non operatività di alcuni elementi della rete stradale;
- necessità di garantire contemporaneamente la mobilità dei mezzi operativi e di soccorso;

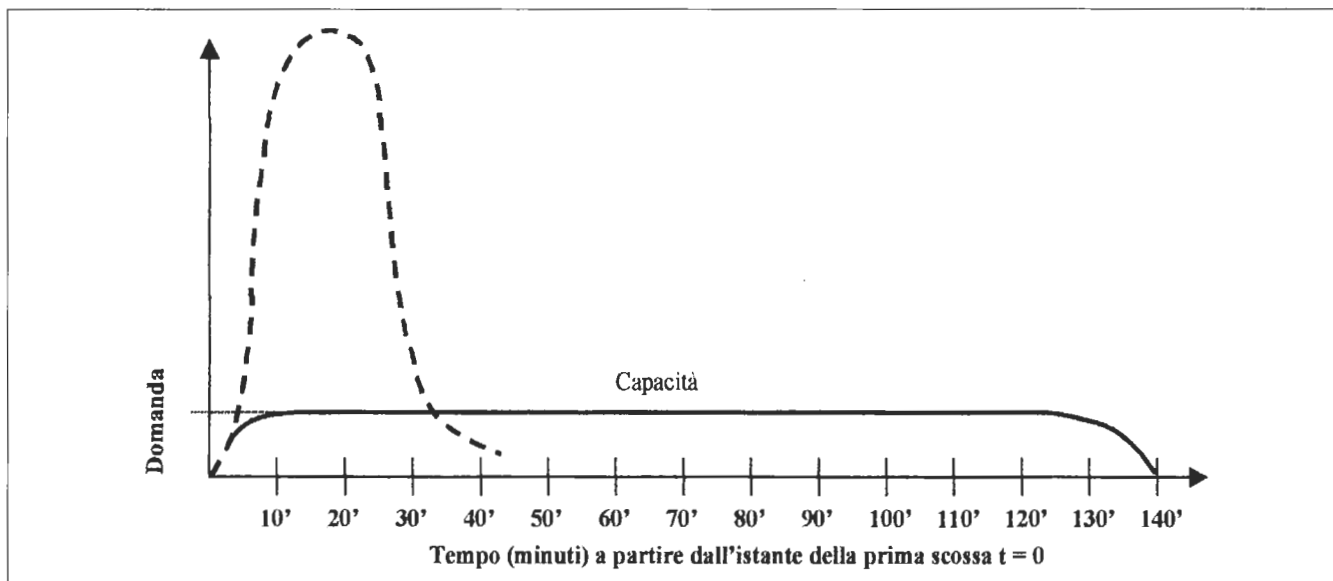


Fig. 1 - Andamento qualitativo della domanda di evacuazione spontanea e cadenzata.

- maggiore difficoltà di coordinare ed indirizzare l'evacuazione;
- modificazione dei comportamenti ordinari per effetto del panico;
- maggiore probabilità che si verifichino imprevisti o incidenti stradali;
- difficile attuazione di misure e schemi speciali di regolazione della circolazione.

## I modelli rappresentativi

Il problema dell'evacuazione urbana consiste nell'analisi di scenari domanda / offerta attesi in questo ambito. In sostanza si tratta di verificare la rete di trasporto sotto il carico prodotto da una evacuazione, stimando alcuni parametri descrittivi del funzionamento del sistema quali il tempo necessario allo svuotamento, i flussi presenti durante questo tempo su ciascun elemento della rete, le velocità commerciali, i punti critici (colli di bottiglia) ed eventualmente il loro funzionamento.

Lo studio si presenta piuttosto complesso soprattutto nell'ipotesi di evacuazione non coordinata. In questo caso, non potendosi cadenzare le partenze, è da attendersi una forte concentrazione delle stesse nei minuti immediatamente successivi alla prima scossa con il conseguente formarsi di un'onda di flusso di entità molto elevata che non consente al sistema di raggiungere un funzionamento stazionario, cioè caratterizzato da un flusso pressoché costante in un intervallo abbastanza ampio. In effetti ad una domanda che presenta un picco molto marcato corrisponderanno comunque valori del flusso non superiori alla capacità poiché gli archi della rete funzioneranno da aree di accumulo per i veicoli accodati che probabilmente causeranno il blocco di molte intersezioni; di conseguenza aumenteranno notevolmente i tempi di svuotamento rispetto a quelli previsti e la rete risulterà impercorribile ai mezzi di soccorso.

Il diagramma di Figura 1 illustra sotto l'aspetto qualitativo il problema: in particolare la curva tratteggiata rappresenta il flusso che si otterrebbe su un elemento della rete a seguito di una evacuazione non coordinata qualora tutti gli elementi della rete presentassero capacità infinita o comunque non inferiore alla domanda da cui sono investiti; la curva a tratto continuo è invece rappresentativa del flusso reale, pari alla capacità che potrebbe stabilirsi su un elemento della rete qualora gli accodamenti conseguenti ad una domanda di gran lunga superiore all'offerta non causassero il blocco delle intersezioni; la stessa curva è rappresentativa del flusso che si può realizzare in una evacuazione coordinata in cui le partenze sono opportunamente cadenzate così che i flussi non superino le capacità. L'evacuazione non coordinata non consente di considerare la domanda costante in un intervallo di tempo abbastanza ampio da poter ritenere il sistema in funzionamento stazionario e costringe ad affrontare lo studio di un transitorio.

Interessante è il diagramma morfologico degli approcci al generico problema dell'evacuazione di emergenza proposto da alcuni studiosi [1]. Questi evidenziano tra l'altro i limiti dell'approccio simulativo che, sebbene sia in grado di rappresentare bene il sistema reale, richiede il trattamento di una enorme mole di dati e soprattutto non consente di estendere i risultati ottenuti ad un altro sistema.

Altri studiosi [10] hanno individuato fra i modelli di evacuazione esistenti tre categorie: a rapporto di dissipazione, ad analisi di capacità manuale ed a microsimulazione di traffico. La prima elabora una formula per la stima del tempo di evacuazione in funzione della dimensione dell'area e della densità di popolazione; alla seconda categoria di modelli appartengono alcune tecniche per attribuire la popolazione alla rete tenendo conto della capacità delle strade; i modelli di micro simulazione descrivono invece il processo di evacuazione sulla rete a

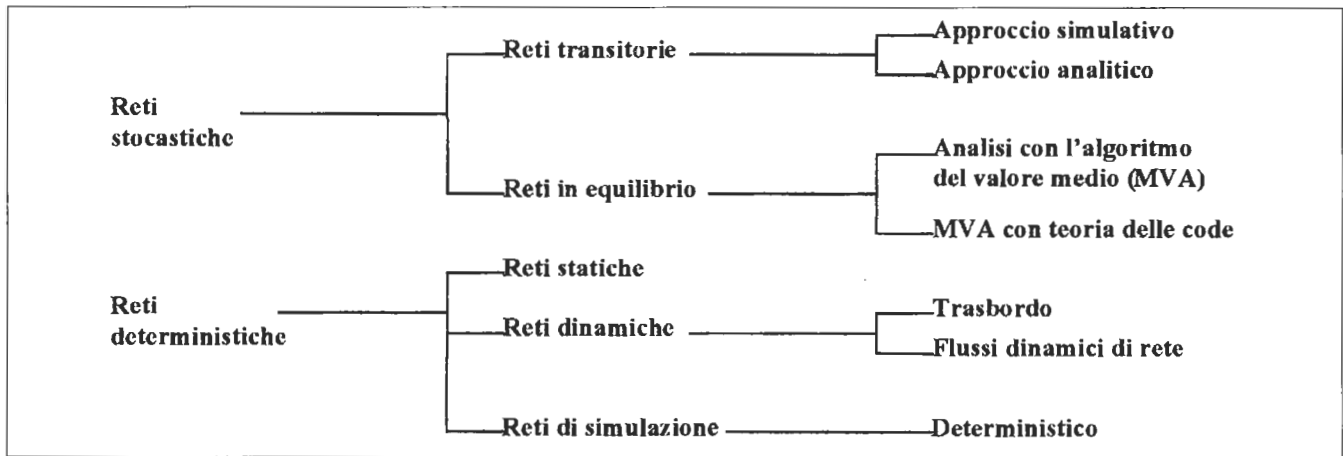


Fig. 2 - Diagramma morfologico degli approcci al problema generale dell'evacuazione di emergenza [1].

livello micro e sono generalmente di tipo dinamico, a differenza delle prime due categorie.

Il problema di sviluppare modelli di simulazione da usare nello studio dell'evacuazione è stato affrontato negli ultimi anni con approcci diversi basati sulla simulazione a livello macro, micro, ed intermedio [6], [7]. La macro simulazione tratta i flussi veicolari nel suo complesso, senza tener conto del moto dei veicoli o delle persone che li compongono, assimilandoli a flussi di fluidi in condotta (teoria del deflusso); si presta male a simulare regimi di funzionamento non stazionario, ma richiede un impegno computazionale modesto e quindi consente di ottenere risposte in tempo reale e pertanto è idonea all'implementazione nei sistemi di controllo dell'evacuazione utili a governare anche situazioni impreviste. La micro simulazione studia invece il flusso veicolare come il risultato del moto di ciascun veicolo che lo compone ed è quindi più idonea a riprodurre situazioni di elevata complessità e condizioni di non stazionarietà della domanda, ma per l'elevato impegno computazionale richiesto è più idonea alla verifica preventiva di scenari di evacuazione da mettere in atto. La mesosimulazione analizza invece il movimento di plotoni di veicoli che formano il flusso e presenta conseguentemente aspetti positivi e negativi intermedi fra i primi due tipi di simulazione.

Se oltre al movimento dei veicoli si studiano anche le operazioni che precedono condizionando l'inizio dell'evacuazione, ed in particolare il tempo di diffusione dell'allarme ed il tempo di preparazione, è preferibile considerare come entità nella microsimulazione le famiglie piuttosto che le autovetture [11].

Sotto l'aspetto operativo un'evacuazione che precede l'evento catastrofico pone alla pianificazione dei trasporti i seguenti quesiti [5], [9]:

- Qual'è il tempo necessario per mettere in salvo tutta la popolazione ?
- Quante persone sono a rischio conseguentemente ad uno stimato tempo di evacuazione ?
- Quali percorsi devono utilizzare gli eventuali veicoli pubblici impegnati nell'evacuazione ?

- Qual'è la strategia migliore per l'evacuazione ?
- Quali sono i punti critici e i colli di bottiglia della rete interessata?
- Quali misure di controllo del traffico possono essere attuate per migliorare l'efficienza dei punti critici?

Un'evacuazione immediatamente successiva all'evento catastrofico aggiunge le seguenti domande:

- Qual'è la configurazione della rete infrastrutturale di offerta a seguito dell'evento?
- Qual'è la domanda di trasporto che, a seguito dell'evento, anche sotto l'effetto del panico, porta a ricongiungere le famiglie prima che l'evacuazione vera e propria inizi?
- Questi spostamenti e la stessa evacuazione sono compatibili con le operazioni di soccorso che bisogna contemporaneamente garantire?

Un altro problema attiene la validità, in corrispondenza dei colli di bottiglia ed in genere nelle situazioni di elevata congestione, dei modelli di offerta che definiscono la velocità possibile in funzione inversa del rapporto flusso/capacità dell'infrastruttura. Come osservato da alcuni studiosi [2], ciò porta a valori della velocità tendenti a zero in condizioni di saturazione della capacità, con evidenti limiti di applicabilità a quei problemi come l'evacuazione in cui presumibilmente si raggiunge la capacità su tutti o quasi tutti gli archi della rete durante gran parte del tempo di evacuazione. E' quindi preferibile usare modelli di offerta diversi che conducano a risultati più realistici basati su tecniche di simulazione tendenti ad analizzare tratti successivi di infrastruttura come elementi o celle in cui i veicoli entranti ed uscenti in ogni intervallo di tempo rispondono a determinate leggi.

Tuttavia la determinazione della velocità di percorrenza degli archi non preoccupa particolarmente, dato che sulla rete urbana questi ultimi sono generalmente di lunghezza inferiore ai 500 m e conseguentemente il tempo di percorrenza di un itinerario è sostanzialmente pari alla somma dei tempi di attraversamento delle intersezioni.

La stima della domanda di trasporto richiede prelimi-

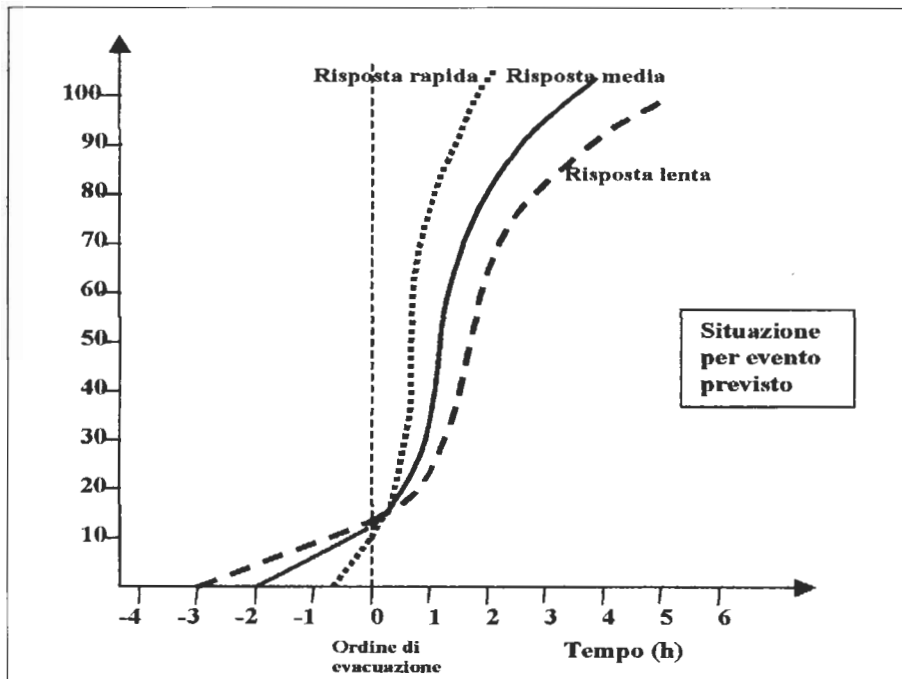


Fig. 3 - Percentuale cumulata di persone che hanno iniziato un'evacuazione che precede l'evento previsto [5].

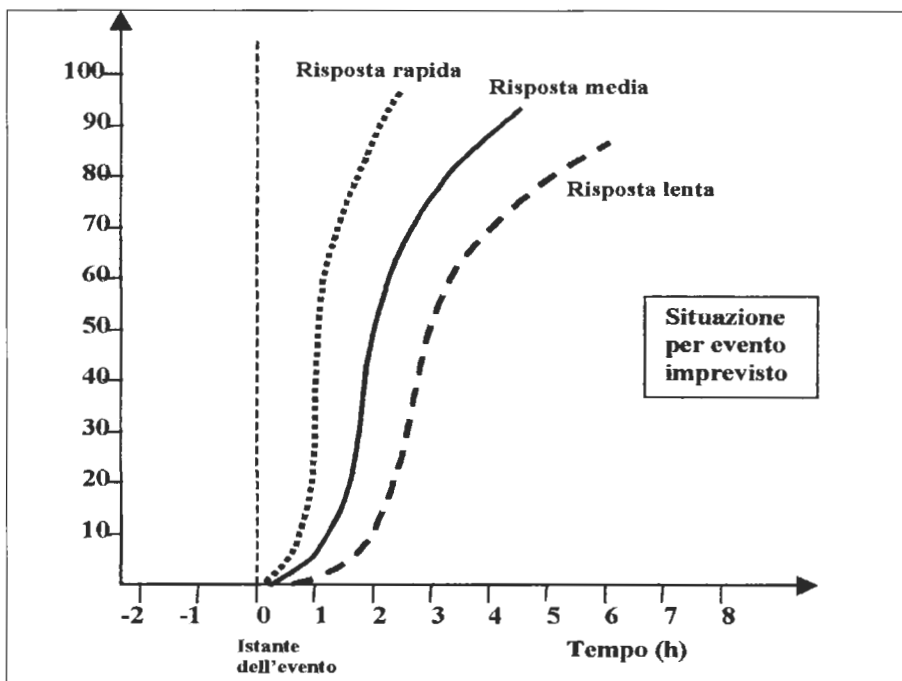


Fig. 4 - Percentuale cumulata di persone che hanno iniziato un'evacuazione a seguito di un evento imprevisto.

narmente lo studio del comportamento delle persone nella situazione specifica. In particolare, sulla base di esperienze comparabili, devono essere noti i modi e i tempi di risposta della popolazione successivamente all'istante  $t=0$  in cui viene dato un eventuale allarme o, in mancanza di questo, all'istante in cui si verifica l'evento. Si tratta in sostanza di conoscere gli spostamenti effettuati dall'istante  $t=0$  fino al momento in cui l'evacuazione comincia e che consistono principalmente nel ricongiungimento delle famiglie. Inoltre sulla base dell'esperienza della popolazione in merito al tipo di even-

to, dei tempi a disposizione per la fuga o dell'intensità con cui l'evento si manifesta e degli effetti percepiti, è necessario determinare i tempi di risposta medi e la distribuzione di frequenza dei diversi intervalli in cui può essere compreso il tempo di risposta. Quest'ultimo aspetto è di particolare importanza soprattutto se l'evacuazione avviene in auto in un'unica fase; infatti partenze più o meno concentrate in intervalli temporali ristretti possono generare una richiesta di capacità caratterizzata da picchi più o meno marcati. Il diagramma di Figura 3 rappresenta qualitativamente con tre curve

diverse la rapidità con cui cresce nel tempo il numero di persone che hanno iniziato l'evacuazione nell'ipotesi che sia dato l'ordine di evacuazione all'istante  $t=0$  [5]; nella figura 4 le stesse curve sono tracciate nell'ipotesi di evento imprevisto, a partire dall'istante in cui questo si manifesta.

## Gli aspetti comportamentali

Dal momento in cui nasce l'esigenza di evacuare la città o parte di essa, la popolazione comincia a muoversi immettendosi progressivamente nella rete con la propria automobile secondo una legge temporale che è fondamentale conoscere per determinare la densità veicolare ed eventuali accodamenti su ciascun elemento della rete.

L'evacuazione in sé comporta infatti un solo spostamento per veicolo, che ha generalmente origine in prossimità dell'abitazione del proprietario e destinazione in un rifugio o area non a rischio, ma tale spostamento ha inizio per ogni veicolo in un istante diverso essendo diversa la risposta delle persone ed i tempi richiesti per i preparativi. Quindi, poiché le partenze non sono contemporanee, due veicoli che effettuano lo stesso spostamento seguendo lo stesso percorso e mantenendo la stessa velocità commerciale, possono trovarsi nello stesso istante ad impegnare punti differenti dello medesimo segmento del percorso ovvero segmenti diversi, ovvero il veicolo partito per primo può aver già raggiunto la destinazione ed essere quindi uscito dalla rete in studio. Studi nel settore delle scienze sociali connesse ai problemi dell'evacuazione a seguito di disastri naturali hanno dimostrato che le immissioni sulla rete stradale iniziano prima lentamente, poi crescono rapidamente e raggiungono il valore massimo in corrispondenza pressappoco del punto intermedio del periodo di caricamento; successivamente decrescono fino ad annullarsi alla fine di quest'ultimo. Il volume cumulato scaricato in rete può essere rappresentato da una curva ad S di equazione [8]:

$$V_c(t) = \frac{1}{\{1 + e^{-a(t-b)}\}}$$

dove:

$V_c(t)$  = Percentuale cumulata del volume totale caricato sulla rete all'istante  $t$ ;

$a$  = fattore di pendenza della curva;

$b$  = fattore del tempo di caricamento.

La Figura 5 riporta il grafico della curva ad S rappresentata dall'equazione sopra citata

La costruzione di una curva di carico che riproduca lo scenario reale di domanda richiede l'introduzione nel modello di evacuazione di variabili rappresentative del comportamento degli individui coinvolti, attraverso le quali ricavare la distribuzione di frequenza dei tempi di inizio dell'evacuazione. In particolare a tali variabili è

affidato il compito di descrivere, relativamente ai diversi scenari della giornata studiati, il diffondersi dell'allarme e delle istruzioni di evacuazione (qualora si tratti di eventi prevedibili), gli spostamenti necessari per raggiungere la propria abitazione, la maturazione della decisione di evacuare, la scelta della destinazione e del mezzo da utilizzare, i preparativi per l'evacuazione. A comportamenti più differenziati da parte della popolazione consegue una maggiore distribuzione delle partenze nel tempo, che genera una minore richiesta di capacità di rete e quindi minori accodamenti.

L'influenza delle variabili comportamentali sui tempi di evacuazione è stata verificata in un'applicazione sulla città di Dimona in Israele simulando un'evacuazione, a seguito di un'emergenza causata dalla fuga di materiale radioattivo, con un modello che incorpora due variabili descrittive del comportamento: il tempo di diffusione delle istruzioni di evacuazione e il tempo di decisione dell'evacuazione [12]. Attraverso uno schema ad albero è stato possibile stimare il tempo di diffusione delle istruzioni di allarme per diverse categorie di persone in due scenari diversi, quello di prima serata (ore 18,00 – 00,00) e quello di tarda notte (00,00 – 06,00), ponendolo in relazione al fatto di disporre e di tenere acceso un apparecchio radio o televisivo e in caso contrario al tipo di abitazione che consente di ricevere l'informazione dai vicini più o meno rapidamente a seconda che trattasi di appartamento in edificio o di una villa e infine all'esistenza di sirene pubbliche appositamente predisposte. Si è tenuto conto anche della diversa dislocazione delle persone sul territorio per effetto delle attività svolte nel momento di trasmissione dell'allarme attribuendo, a coloro che non si trovano presso la propria abitazione, un tempo aggiuntivo per raggiungerla prima di iniziare l'evacuazione. I tempi di evacuazione calcolati con questa simulazione in entrambi gli scenari sono risultati sensibilmente maggiori di quelli ottenuti da un modello di evacuazione che non utilizzi variabili comportamentali, proprio per effetto del ritardo con cui la popolazione inizia l'evacuazione dal momento in cui viene trasmesso l'allarme; per contro gli accodamenti sono risultati minori come valore massimo per via della differenza di risposta dei diversi gruppi della popolazione e lo stesso valore massimo si raggiunge dopo un tempo maggiore a partire dall'ordine di evacuazione.

Il diagramma di Figura 6 riporta il numero di veicoli atteso ad una delle uscite della città in ciascun intervallo di 3 minuti durante i primi 15 minuti successivi all'allarme, calcolato con il modello comportamentale messo a punto e con un modello comune [12].

La modellizzazione del comportamento della popolazione necessita, come è ovvio, la rilevazione dello stesso attraverso specifiche indagini. E' da evidenziare però che il comportamento rilevato in alcune indagini è risultato differire molto da un contesto all'altro: la percentuale di persone che si è dichiarata disposta ad evacuare è risultata a Dimona dell'89% contro il 49% dei resi-



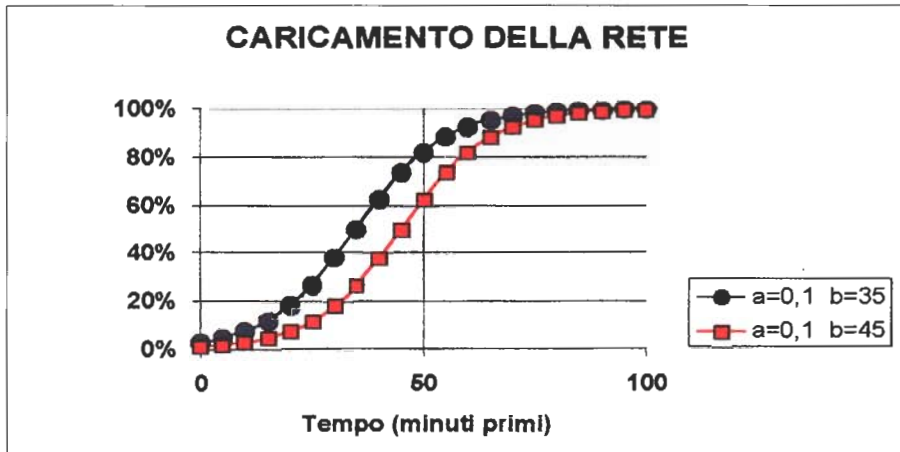


Fig. 5 - Percentuale del volume cumulato caricato sulla rete in funzione del tempo [8].

denti tra sei e dieci miglia dalla centrale nucleare di Three Miles Island ed il 76 e il 75% dei residenti in prossimità rispettivamente degli impianti nucleari di Shoreham e Seabrook negli USA [12].

E' presumibile, data la complessità del fenomeno da studiare, tra l'altro sensibilmente influenzato dal panico, che indagini a preferenze dichiarate, cioè tese a definire il comportamento di evacuazione in una situazione prospettata, possano dare risultati parzialmente difformi da quelli rilevabili nella realtà. Pertanto sarebbe necessario disporre anche di dati rilevati in situazioni reali di evacuazione (preferenze rilevate), cosa evidentemente difficile da ottenere. Tuttavia, qualora si conoscano i flussi rilevati durante una evacuazione reale è possibile risalire ad alcuni dati di mobilità utilizzando per esempio le tecniche di stima delle matrici O/D a partire dai flussi. L'evacuazione a seguito di un allarme e quella a seguito del manifestarsi dell'evento differiscono tra l'altro per il nascere, nel secondo caso, di situazioni di panico sicuramente più accentuate e diffuse in grado di modificare sensibilmente il comportamento delle persone coinvolte rispetto a quello determinato da considerazioni razionali. In sostanza le caratteristiche di una fuga in condizioni di panico crescente possono essere così sintetizzate con particolare riferimento ad una fuga a piedi [4]:

- la popolazione si muove o cerca di muoversi molto più rapidamente del normale;
  - gli individui iniziano a spingere e l'interazione fisica tra essi diventa naturale;
  - il movimento, e in particolare l'attraversamento di strettoie o colli di bottiglia, diventa non coordinato;
  - vengono rispettati eventuali curve ed ostacoli presenti sul percorso;
  - la calca è crescente;
  - l'interazione fisica nella folla accalcata cresce e raggiunge pressioni pericolose fino a 4.450 N/m in grado di piegare barriere di acciaio ed abbattere muri di mattoni;
  - la fuga è ulteriormente rallentata da persone cadute o ferite che costituiscono degli ostacoli;
  - le persone mostrano la tendenza a comportamenti di massa, cioè a fare ciò che fanno gli altri;
  - le alternative esistenti sono spesso trascurate o non efficientemente utilizzate in situazioni di fuga.
- Il panico sembra tuttavia, entro certi limiti, produrre effetti positivi nella evacuazione di persone da un edificio: dopo aver definito un parametro del panico, uno studio [4] ha verificato con un modello specifico che un aumento di detto parametro da 0 a 0,4 comporta un aumento della quantità di persone che riescono a fuggire da una stanza piena di fumo in un tempo prefissato e

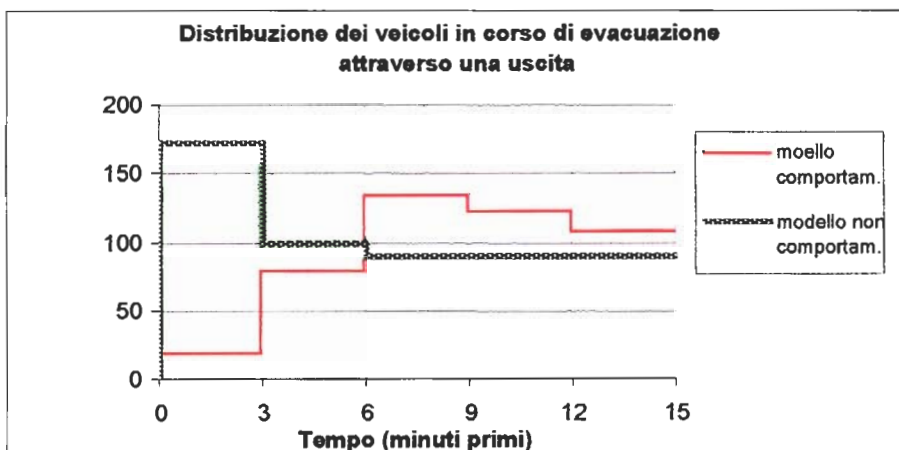


Fig. 6 - Numero di veicoli in evacuazione calcolati con un modello comportamentale ed uno non comportamentale [12].

una riduzione del tempo di evacuazione, per un fissato numero di persone contenute nella stanza; per valori del parametro di panico crescenti oltre 0,4 gli anzidetti indicatori di evacuazione peggiorano velocemente per effetto della eccessiva "frizione" fra gli individui, raggiungendo in corrispondenza del parametro di panico = 0,8 un aumento del tempo di evacuazione di oltre il 50% rispetto al valore minimo e del 30% rispetto al valore ricavato in assenza di panico.

La fuga a piedi che è oggetto di studi e ricerche relativamente all'evacuazione di edifici, non presenta invece generalmente problemi in ambito urbano dal momento che la capacità delle infrastrutture è quasi sempre esuberante rispetto alla domanda pedonale anche se fortemente concentrata. Tuttavia la modalità pedonale può essere utilizzata solo per coprire la prima parte (per lo più all'interno del quartiere di origine) di un intero percorso di evacuazione urbana che si sviluppa di solito per qualche chilometro; quindi l'utilizzo di un mezzo di trasporto risulta di solito indispensabile per raggiungere il rifugio finale.

Ad una evacuazione che avviene con l'autovettura privata in condizioni di panico possiamo adattare le diverse caratteristiche schematizzate per l'evacuazione a piedi e cioè prevedere che la condizione di panico si differenzi, rispetto ad una situazione ordinaria, in:

- velocità desiderate e di conseguenza velocità possibili più elevate di quelle che competono agli stessi valori della densità veicolare, con conseguente diminuzione delle condizioni di sicurezza;
- mancato rispetto delle norme del Codice della strada ed in particolare dei diritti di precedenza e delle eventuali segnalazioni semaforiche con conseguente ripartizione dei tempi di via libera proporzionali ai flussi delle manovre in conflitto;
- gli incidenti che avvengono con maggiore frequenza rispetto alle condizioni ordinarie di deflusso ed i veicoli in panne lungo le strade formano strettoie che costituiscono punti singolari a capacità ridotta in grado di condizionare la capacità complessiva del percorso;
- le alternative di percorso esistenti non sono valutate con la giusta razionalità e tra l'altro l'automobilista non ha informazioni sulla domanda che le impegna in quel momento, dato che le informazioni storiche di cui dispone sono relative a scenari di domanda completamente diversi da quello di evacuazione.

In sostanza quindi l'evacuazione urbana in auto non coordinata, in condizioni di panico, che tende a realizzarsi immediatamente dopo l'evento catastrofico, è difficilmente riproducibile con tecniche di analisi di rete consolidate, poiché viene meno l'ipotesi della razionalità dell'utente; quest'ultimo opera in assenza di informazioni sullo stato di congestione della rete che gli è noto, se è un utente sistematico, solo relativamente ad uno scenario di utilizzo abituale e peraltro, per effetto del panico, non è in grado di valutare con lucidità le eventuali informazioni in tempo reale; d'altra parte la capa-

rità degli elementi della rete viene ad essere ridotta da crolli o incidenti.

Uno degli effetti del panico consiste nell'irrazionalità dell'utente nella scelta del percorso. Infatti la necessità di allontanarsi nel minor tempo possibile e le situazioni di congestione che hanno luogo durante l'evacuazione spingono il guidatore a dirigersi di volta in volta sull'arco che sembra essere meno congestionato anziché mettere in atto una strategia di scelta complessiva. In tal modo questi mette in atto un comportamento definibile "ad orizzonte miope", cioè basato sullo stato di saturazione delle alternative di percorso rilevato a vista dal punto in cui il veicolo si trova e quindi rispetto ad un orizzonte particolarmente ridotto [7].

E' possibile tener conto di questo comportamento adottando, nella scelta della destinazione (porta di uscita dalla città) e soprattutto del percorso, il criterio della percezione dello stato di saturazione di ciascun arco sulla base della distanza del proprio veicolo dall'ultimo veicolo in coda [11]. In questo modo è possibile tenere in considerazione anche lo scarso livello di informazione di cui l'utente dispone, che non gli consente di conoscere la lunghezza della fila davanti a sé poiché riesce a vederne solo alcuni veicoli, se non solo l'ultimo, qualora questo sia ingombrante. La scelta del percorso basata su questo criterio conduce evidentemente ad una distribuzione dei flussi fra le porte di uscita dalla città e fra le alternative di percorso diversa da quella che si otterrebbe assegnando ai percorsi disponibili sulla base del tempo di viaggio o del costo generalizzato come avviene in un comune processo di assegnazione.

La situazione di panico incide anche sul distanziamento fra i veicoli in coda dando luogo all'effetto "schiacciamento", che si concretizza in una diminuzione del distanziamento rispetto a quello rilevato in condizioni di deflusso normale con lo stesso impegno della capacità [7]. Ciò oltre ad aumentare il rischio di incidenti rende poco attendibili le relazioni fra densità, velocità e flusso fornite dalla bibliografia scientifica in riferimento a condizioni ordinarie.

Nelle intersezioni è poi prevedibile una consistente frizione anche con i flussi di pedoni in fuga che attraversano la strada, e che si muovono anch'essi in condizione di panico.

L'estensione e la densità di popolazione dell'area urbana incidono notevolmente sui tempi di evacuazione. Questo risultato di per sé abbastanza scontato è stato constatato nell'applicazione di diversi modelli di evacuazione riscontrando incrementi del tempo di evacuazione più che proporzionali alle dimensioni dell'area. Relativamente alla città di Dimona in Israele in particolare, i tempi di evacuazione calcolati nell'ipotesi di aumento del 5% della popolazione sono risultati maggiori del 9% e del 12%, nelle due uscite considerate, rispetto ai valori ricavati con la popolazione attuale [11]. Ciò conferma l'importanza della individuazione di scenari di verifica sufficientemente rappresentativi delle



numerossissime situazioni reali di evacuazione nelle quali la popolazione presente può essere numericamente molto diversa a seconda dell'ora della giornata a cui lo scenario si riferisce.

## La regolazione della circolazione

Se l'evacuazione avviene anche parzialmente con l'autovettura privata (qualora ne risulti verificata la possibilità e la compatibilità con le operazioni di soccorso) ed in particolare se in modo coordinato, sarà comunque bene attuare delle misure di controllo del traffico che consentano di ottimizzare il funzionamento del sistema e far fronte a situazioni inattese. In particolare [5]:

- compatibilmente con la disponibilità di personale, disporre due agenti in ciascuna delle intersezioni critiche, in modo che uno dei due diriga il traffico mentre l'altro dia assistenza ed informazioni ai guidatori che ne richiedono;
- nelle intersezioni che continuano ad essere regolate da un impianto semaforico si deve aver cura di disporre il ciclo che massimizza i tempi di verde sull'itinerario di uscita dall'area;
- soprattutto dove si prevede una domanda che eccede la capacità è necessario mantenere aperta una corsia per l'utilizzo nel senso di marcia inverso all'evacuazione, nonché per l'utilizzo da parte dei veicoli di emergenza e dei veicoli del trasporto pubblico, qualora se ne preveda l'impiego per l'evacuazione di persone sprovviste di auto;
- sospendere la riscossione di eventuali pedaggi per massimizzare la capacità degli accessi alle strade interessate;
- scegliere come percorsi di evacuazione quelli che riducono i punti di conflitto delle svolte a sinistra, che come è noto impegnano maggiormente la capacità delle intersezioni;
- supportare le direzioni che si vogliono imporre ai veicoli con barriere fisiche in modo da prevenire infrazioni ed il conseguente realizzarsi di pericolosi punti di conflitto;
- impedire il movimento di veicoli di maggiori dimensioni (veicoli industriali e camper).

Particolarmente interessante sarebbe valutare la possibilità di adottare, subito dopo il sisma, uno schema di circolazione appositamente predisposto per favorire l'evacuazione e che a tal fine preveda tra l'altro il senso unico su alcune strade principali lasciando comunque una rete a doppio senso di marcia per assicurare l'invio di soccorsi e mezzi operativi. Quest'ultima esigenza molto sentita rende in ogni caso più difficile l'attuazione

di schemi di circolazione di emergenza, che peraltro sono difficilmente compresi dall'utenza. Ferma restando la necessità di approfondire questo problema, è da evidenziare tuttavia che, in generale, l'adozione dei sensi unici di marcia può addirittura duplicare la capacità di ogni corsia ed in ogni caso aumenta sensibilmente la capacità delle intersezioni, riducendone drasticamente i punti di conflitto. La conferma sperimentale viene dall'applicazione alla Rio Grand Valley nello Stato del Texas (USA) di un modello di simulazione messo a punto per l'evacuazione in occasione di un uragano [3]. Attraverso questo modello si è calcolato il tempo di evacuazione relativamente a più scenari di offerta, tra cui uno che contempla il flusso di traffico unidirezionale via dall'uragano, ottenendo per quest'ultimo valori sensibilmente inferiori ed un aumento della capacità delle corsie decisamente consistente, anche se non doppio rispetto all'utilizzazione a doppio senso di marcia, e ciò soprattutto in presenza di un'evacuazione totale.

### Bibliografia

- [1] Bakuli D.L., Mac Gregor Smith J. 1996. Resource allocation in state-dependent emergency evacuation networks. *European Journal of Operational Research*. 89.
- [2] Daganzo C.F. 1995. The cell transmission model, part II: network traffic. *Transportation Research*. 29B.
- [3] Farahmand K. 1997. Application of simulation modeling to emergency population evacuation. *Proceedings of the 1997 Winter simulation conference*, December 7-10, 1997, Atlanta, GA, USA.
- [4] Helbing D., Farkas I., Vicsek T. 2000. Simulating dynamic features of escape panic. *Nature*. 407.
- [5] Lewis D.C. 1985. Transport planning for hurricane evacuations. *ITE Journal*. August 1985.
- [6] Pidd M., de Silva F.N., Eglese R.W. 1993. CEMPS: a configurable evacuation management and planning system - a progress report. *Proceedings of the conference on Winter simulation*, December 13-16 1993, Los Angeles, CA, USA.
- [7] Pidd M., de Silva F.N., Eglese R.W. 1996. A simulation model for emergency evacuation. *European Journal of Operational Research*. 90.
- Radwan A. E., Hobeika A. G., Sivasailam D. 1995. A computer simulation model for rural network evacuation under natural disasters. *ITE Journal*, September 1985.
- [8] Rathi A.K., Solanki R.S. 1993. Simulation of traffic flow during emergency evacuations: a microcomputer based modeling system. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, December 13 - 16, 1993, Los Angeles, CA, USA.
- [9] Sheffi Y., Mahmassani H., Warren B.P. 1982. A transportation network evacuation model. *Transportation Research*. 16A.
- [10] Sinuany-Stern Z., Stern E. 1993. Simulating the evacuation of a small city: the effects of traffic factors. *Socio-Economic Planning Science*. 27.
- [11] Stern E., Sinuany-Stern Z. 1989. A behavioural-based simulation model for urban evacuation. *Papers of the Regional Science Association*. 66.
- [12] Urbanik T. 1986. Transportation analysis for evacuation: State of the art. *ITE Journal*, March 1986.