

HARIA 2: UNA METODOLOGIA PER LA PIANIFICAZIONE E L'ANALISI DI EMERGENZE TECNOLOGICHE – SVILUPPO DI UN MODELLO MATEMATICO PER LA SIMULAZIONE DEL PIANO DI EVACUAZIONE



Dott. Ing. Matteo SCARSELLI ⁽⁺⁾, Dott. Ing. Marco BARLETTANI ^(°), Prof. Marino MAZZINI ⁽⁺⁾

(+) Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione - Università di Pisa - Via Diotisalvi, 2, 56126 - Pisa

(°) ERM Italia - Via Bonnet 2 - Milano

SOMMARIO

In questo articolo è presentato il modello matematico di traffico, messo a punto per la simulazione dei piani di evacuazione che possono rendersi necessari per la mitigazione delle conseguenze di incidenti industriali e nucleari. Il lavoro si inserisce nel progetto HARIA 2, una ricerca tendente alla messa a punto di un sistema informatico utilizzabile per la stima delle conseguenze di un incidente industriale e degli effetti di possibili azioni di mitigazione di queste, per l'intervento dei soccorritori.

Specifiche fondamentali del modello sono l'applicabilità in situazioni di veloce transitorio e traffico fortemente canalizzato in poche direzioni. A tal fine, è stato selezionato un modello di tipo continuo, basato sull'analogia fluidodinamica, le cui equazioni descrittive sono risolte numericamente mediante metodi che permettono di ben riprodurre la propagazione dei fronti d'onda del traffico.

Dopo una breve descrizione del modello generale, l'attenzione è volta all'insieme dei sottomodelli specifici, sviluppati per trattare le principali tipologie di intersezioni stradali necessarie alla simulazione di una rete stradale urbana in condizioni di elevato traffico veicolare.

I principali aspetti che caratterizzano il modello messo a punto riguardano la sua applicabilità ad una generica rete stradale con numerose intersezioni, a situazioni rapidamente variabili e caratterizzate da elevati volumi di traffico, con o senza congestione dello stesso, il ridotto numero dei dati di input (potenzialmente disponibili per qualsiasi tipo di strada o di nodo stradale) e la struttura modulare, che permette di valutare in un breve tempo e col minimo sforzo l'effetto di diverse ipotesi.

Sono anche indicate le linee di sviluppo del lavoro, al fine di mettere a punto il modello di simulazione del piano di evacuazione.

1. INTRODUZIONE

Nel caso di un grave incidente che coinvolga la popolazione che vive nelle vicinanze di uno stabilimento industriale, è possibile attuare una serie di possibili contromisure esterne in grado di ridurre le conseguenze derivanti dalla situazione incidentale in atto. L'insieme di tutte le azioni sistematiche e pianificate da applicare qualora l'autorità competente dichiarerà lo stato di emergenza costituisce il piano di emergenza esterno.

L'evacuazione della popolazione rappresenta una delle possibili contromisure per la riduzione delle conseguenze esterne di un incidente e costituisce l'ultimo atto di un piano d'emergenza da attuare quando è evidente l'inefficacia di azioni alternative. Il processo di evacuazione deve essere opportunamente pianificato, collaudato e supportato da un buon servizio d'informazione e di ordine, poichè richiede la messa in opera di una notevole quantità di risorse (uomini, mezzi e strutture) ed introduce anche una non trascurabile sorgente secondaria di rischio (ad esempio di incidenti stradali).

In tale quadro si colloca la ricerca HARIA 2, cui collaborano il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa, il Centro Studi ed Esperienze del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco di Roma, il Centro Comune di Ricerca UE di Ispra ed i Dipartimenti di Scienze dell'Uomo dell'Università di Trieste e di Scienze Sociali dell'Università di Pisa). Il sistema informatico HARIA 2, permettendo l'analisi e la valutazione comparativa degli effetti dell'implementazione delle diverse contromisure di emergenza in un dato scenario incidentale ipotizzato, si pone come un valido strumento di supporto alle decisioni nelle fasi di pianificazione e di gestione delle emergenze. La simulazione di diversi scenari d'emergenza consente inoltre l'utilizzo di HARIA 2 quale strumento per la formazione e l'addestramento degli addetti ai soccorsi e di informazione della popolazione [1].

2. IL MODELLO DI EVACUAZIONE

L'evacuazione della popolazione è una contromisura di emergenza che deve essere condotta nel minor tempo possibile, minimizzando i costi e i rischi associati ed ottimizzando l'uso delle risorse disponibili, in modo da garantirne la massima efficacia. Premessa necessaria è la disponibilità di un modello di traffico che, partendo dalla distribuzione e dalle caratteristiche della popolazione, della rete stradale e dei mezzi di trasporto nell'area a rischio, sia in grado di descrivere la dinamica della popolazione nell'area di studio. Le caratteristiche generali di tale modello sono determinate sia dalla tipologia della modellistica di analisi degli incidenti attualmente implementata in HARIA 2 (semplificata ma non elementare), che dalle particolari caratteristiche del traffico di evacuazione. In particolare il modello oggetto del presente lavoro è stato sviluppato nell'ottica di una simulazione dei flussi di traffico su rete stradale caratterizzata da numerose intersezioni, da condizioni di elevato volume di traffico, in presenza di rapidi transitori e di ingorghi, con congestione in certe zone e tenendo sempre in considerazione l'aspetto (limitante) della reperibilità delle informazioni (dati di input).

Il punto di partenza della simulazione del traffico veicolare di evacuazione è la definizione della specifica rete stradale da utilizzare in emergenza, rendendo operativa la maggior capacità stradale disponibile (ad es., attraverso l'utilizzo di tutte le corsie stradali presenti in certe strade, variandone eventualmente il senso di marcia).

Il metodo proposto per la definizione di una specifica rete stradale urbana, da utilizzare nella successiva fase di simulazione del traffico veicolare di evacuazione (Figura 1), è articolato attraverso le seguenti fasi:

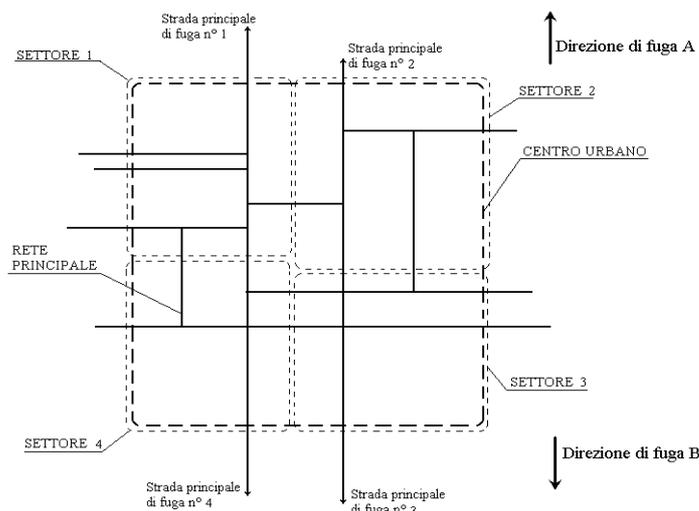


Figura 1. Esempio di rete stradale.

1. **INDIVIDUAZIONE DELLE DIREZIONI DI FUGA.** L'utente individua, sulla base dello scenario incidentale ipotizzato, le direzioni teoriche di fuga (ad esempio quelle ortogonali all'asse di una ipotetica nube che si avvicina verso il centro urbano).
2. **DEFINIZIONE DELLE STRADE PRINCIPALI DI FUGA.** Si individuano, sulla base del grafo stradale esistente e delle direzioni teoriche di fuga, le principali vie di collegamento extraurbano che si vogliono utilizzare per l'allontanamento della popolazione dal centro abitato.
3. **COSTRUZIONE DELLA RETE STRADALE PRINCIPALE.** Si costruisce una rete stradale ("rete principale") formata dalle "strade principali di rete", cioè strade urbane di collegamento con le strade principali di fuga. Tale rete rappresenta la spina dorsale della rete stradale finale che sarà poi oggetto della simulazione.
4. **COSTRUZIONE DEI SETTORI DI MASSIMA.** Si associa a ciascuna strada principale di fuga un "settore territoriale di massima".
5. **DEFINIZIONE DEI SETTORI FINALI E DELLE RETI STRADALI SETTORIALI.** Si fa l'analisi settoriale di dettaglio, ovvero si considera il generico settore di massima e si costruisce la "rete stradale settoriale", introducendo le strade secondarie di interesse nella parte di rete principale sovrapposta al settore di massima ("rete stradale settoriale").

La simulazione del traffico veicolare sull'insieme delle reti stradali settoriali appena definite presuppone quindi lo sviluppo di un opportuno modello di traffico (utilizzabile congiuntamente al modello di evacuazione), integrabile nel modulo "scenari dinamici" del sistema HARIA 2.

3. RISULTATI DELL'INDAGINE BIBLIOGRAFICA SUI MODELLI DI TRAFFICO

La modellistica del trasporto su strada è stata sviluppata negli Stati Uniti a partire dagli anni '50 a causa della rapida espansione del sistema stradale (highways) connessa al vertiginoso aumento del numero di auto in circolazione, che ha introdotto la necessità di modelli, tecniche e procedure da utilizzare come supporto nelle fasi di progetto, gestione e sviluppo di sistemi di trasporto (reti stradali) avanzati. In particolare l'attenzione è attualmente rivolta ai moderni Intelligent Transportation Systems, ovvero a sistemi che utilizzano i risultati di simulazioni per stendere strategie di gestione in tempo reale del traffico sulla rete di freeways. Tuttavia, la gran parte dei programmi di simulazione del traffico su freeways o è ancora in fase di sviluppo, o fornisce risultati non molto soddisfacenti.

L'attenzione degli analisti e dei teorici dei flussi di traffico è attualmente rivolta alla proposta di nuovi modelli descrittivi delle relazioni esistenti tra le principali grandezze (flusso, velocità, densità, ecc.) che caratterizzano il traffico. Ad esempio l'ultimo decennio ha visto la nascita di una vasta gamma di relazioni descrittive dell'andamento del flusso in funzione della velocità veicolare; tra i modelli proposti, rivestono particolare importanza i modelli empirici, che però sono relativi a situazioni particolari e quindi difficilmente generalizzabili. Inoltre, la maggior parte del lavoro fatto in questo senso è rivolta all'analisi dei flussi di traffico non interrotti su freeways o espressways. La continua evoluzione dello stato dell'arte dei modelli flusso-velocità è dovuta alla attuale carenza di un modello matematico in grado di stimare correttamente l'andamento delle variabili fondamentali (flusso, velocità e densità) in tutte le potenziali condizioni operative di un generico flusso di traffico.

La scelta della tipologia del modello di traffico da implementare nel progetto di ricerca HARIA 2 è stata fatta a valle di un'ampia ricerca bibliografica effettuata sulla modellistica del traffico ([2] - [10]). Oltre che delle informazioni bibliografiche disponibili, si è tenuto conto delle caratteristiche di complessità, disponibilità dei dati di input richiesti, tipologia dei dati di output forniti, applicabilità a situazioni con elevata densità di traffico, applicabilità a reti stradali urbane, possibilità di descrivere condizioni non stazionarie, livello di difficoltà nella calibrazione ed implementazione ed altre caratteristiche specifiche dello stesso modello. In tale contesto, l'interesse è stato rivolto ai "Simple Continuum Models", ovvero a modelli che nascono dall'analogia fluidodinamica (il flusso di traffico è trattato come un fluido comprimibile in moto monodimensionale) e che si prestano ad una descrizione ottimale di flussi di traffico in presenza di elevata densità veicolare e di forti "shock waves" (rapidi transitori spazio-temporali).

4. DEFINIZIONE DEL MODELLO DI TRAFFICO

Un "simple continuum model" permette di ottenere il flusso q , la densità k e la velocità u in funzione dello spazio (ascissa x) e del tempo (t), risolvendo il sistema formato dalle seguenti tre equazioni:

Equazione di conservazione:

$$\frac{\partial q(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial k(x,t)}{\partial t} = g(x,t) \quad (1)$$

Equazione di stato (relazione Velocità-Densità o Flusso-Velocità):

$$u(x,t) = f(k(x,t)) \quad (2)$$

Equazione del flusso ("l'equazione fondamentale del traffico")

$$q(x,t) = k(x,t) \cdot u(x,t) \quad (3)$$

4.1 Relazione Velocità-Densità

Per procedere alla stesura di un modello da implementare in HARIA 2 è stata scelta, quale equazione di stato, la relazione velocità-densità lineare di Greenshields:

$$u(x,t) = u_F \left(1 - \frac{K(x,t)}{K_{JAM}} \right) \quad (4)$$

ove K_{JAM} ed u_F sono rispettivamente la densità di ingorgo e la velocità di efflusso libero nella strada considerata.

I motivi di tale scelta sono i seguenti:

1. il modello di Greenshields è stato ottenuto per interpolazione di dati ricavati da osservazioni effettuate su strade urbane a singola corsia stradale per ogni senso di marcia, caratterizzate da flussi a bassa velocità libera.
2. sebbene il modello sia stato spesso criticato per la sua semplicità, è stato confermato sperimentalmente ed è largamente utilizzato.

3. non esiste attualmente un modello da ritenersi in assoluto migliore di quello di Greenshields, ma se in futuro sarà disponibile una relazione ritenuta migliore, sarà comunque possibile e semplice la sua sostituzione alla relazione di Greenshields, data la struttura modulare del modello di traffico sviluppato.

Esiste un ultimo punto a favore del modello di Greenshields e cioè il limitato numero di dati di input richiesti (la singola strada può essere caratterizzata attraverso la conoscenza di due soli parametri: la densità di ingorgo e la velocità libera).

4.2 Algoritmo per l'implementazione dell'Equazione di Conservazione

I metodi di risoluzione numerica capaci di trattare efficacemente gli shocks appartengono a due famiglie generali, che si caratterizzano rispettivamente per proprietà di “shock capturing” e “shock fitting”. Gli algoritmi di “shock fitting” riescono a seguire con grande accuratezza le discontinuità matematiche (a gradino) della soluzione analitica dell'equazione di continuità, mentre gli algoritmi di “shock capturing” tendono ad avere effetti di “addolcimento” delle stesse (ad esempio una discontinuità a gradino viene approssimata con una S). Un tale comportamento degli algoritmi di “shock capturing” è molto vantaggioso: le rapide, ma praticamente continue variazioni di densità, descritte da un algoritmo di “shock capturing” in prossimità di discontinuità teoriche, sono molto più aderenti alla realtà rispetto alle discontinuità a gradino suggerite dalla soluzione analitica (ben approssimate da un algoritmo di “shock fitting”). Inoltre gli algoritmi di “shock capturing” presentano i vantaggi relativi ad una maggiore semplicità, ad un minore sforzo computazionale e ad una minore complessità nella modellazione di situazioni complesse.

L'algoritmo matematico che è stato scelto per l'implementazione numerica dell'equazione di conservazione del traffico è l'algoritmo di “shock capturing del primo ordine modificato”:

$$k_j^n = \frac{1}{3} \left(k_{j+1}^{n-1} + k_j^{n-1} + k_{j-1}^{n-1} \right) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(q_{j+1}^{n-1} - q_{j-1}^{n-1} \right) + \frac{\Delta t}{2} \left(g_{j+1}^{n-1} + g_{j-1}^{n-1} \right) \quad (5)$$

dove: k_j^n = densità sul nodo j al tempo $t = t_0 + n \cdot \Delta t$; q_j^n = flusso sul nodo j al tempo $t = t_0 + n \cdot \Delta t$;

g_j^n = generation rate sul nodo j al tempo $t = t_0 + n \cdot \Delta t$; t_0 = istante iniziale; Δt , Δx = intervalli incrementali di tempo e di spazio tali che $\Delta x / \Delta t > u_F$ (necessaria per la convergenza).

Tale algoritmo è stato scelto a fronte di una analisi delle caratteristiche degli algoritmi disponibili [11] e di una valutazione comparativa delle potenzialità degli stessi rilevate nelle simulazioni del traffico effettuate nel caso di una strada rettilinea [11].

5. SVILUPPO DEL MODELLO DI TRAFFICO

Per adattare il modello matematico generale (principalmente utilizzato per simulazioni del traffico su freeways) al caso di una rete urbana è stato necessario sviluppare la modellistica delle principali tipologie di intersezioni stradali. In particolare, sono stati messi a punto i modelli matematici per la risoluzione dei seguenti casi: strada a singola corsia stradale; strada con doppia corsia stradale; strada formata dalla giunzione di due tratti stradali con differenti caratteristiche; calcolo del flusso in ingresso alla rete in un particolare punto di confluenza della popolazione (generation rate); intersezioni stradali non semaforizzate tra strade con uguali caratteristiche; intersezioni stradali non semaforizzate tra strade con diverse caratteristiche; intersezioni stradali semaforizzate tra strade con uguali caratteristiche; intersezioni stradali semaforizzate tra strade con diverse caratteristiche. Sono stati anche proposti modelli per trattare tre diverse tipologie di nodo stradale non controllato, in cui si suppone che si possa avere la generazione di flussi random, cioè di flussi dovuti a quei particolari automobilisti che, in preda al panico, si spostano in modo del tutto casuale sulle strade disponibili del grafo stradale. E' infatti proprio in prossimità di intersezioni stradali non sottoposte al controllo di squadre addette alla vigilanza ed al controllo degli accessi, che una certa frazione del flusso di arrivo può lasciare la rete primaria (la rete stradale definita per l'allontanamento della popolazione dalla zona di emergenza) ed immettersi nella rete random (la rete stradale formata dalle rimanenti strade del grafo stradale non sottoposte al controllo degli accessi e delle uscite).

Nei successivi paragrafi vengono descritti, a titolo esemplificativo, alcuni dei modelli messi a punto.

5.1 Strada a singola corsia stradale

La simulazione del traffico nel caso di un tratto stradale rettilineo a singola corsia nel quale il numero degli innesti laterali (generation rates e nodi stradali) è uguale a zero è il caso più semplice, analizzato con lo scopo principale di valutare il comportamento generale del modello al variare delle condizioni iniziali ed al contorno (in tale ambito sono stati provati anche vari tipi di algoritmo) e di stabilire i principali valori da

associare ai parametri del modello (ad esempio incrementi spaziali e temporali, ecc.).

Per procedere alla implementazione numerica, la strada in esame viene discretizzata in tratti Δx (dell'ordine di 10 - 50 m) e le variabili d'interesse (flusso, velocità e concentrazione) vengono calcolate in ogni nodo ad ogni step temporale.

Le tre equazioni risolutive riportate nel cap. 4 implementate per calcolare i valori delle variabili d'interesse sul generico nodo interno j (i nodi estremi 0 e J sono esclusi) ed all' n -esimo passo temporale, sono:

$$k_j^n = \frac{1}{3} \left(k_{j+1}^{n-1} + k_{j-1}^{n-1} + k_j^{n-1} \right) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(q_{j+1}^{n-1} - q_{j-1}^{n-1} \right) \quad (6.1)$$

$$u_j^n = u_F \left(1 - \frac{k_j^n}{k_{JAM}} \right) \quad (6.2)$$

$$q_j^n = k_j^n \cdot u_j^n \quad (6.3)$$

Il valore da attribuire a u_F è pari al limite di velocità della strada in esame; in questo senso si è scelto di utilizzare $u_F = 50$ Km/h per una strada urbana e $u_F = 90$ Km/h per una strada extraurbana (per rispettare la convergenza della soluzione, l'intervallo incrementale spaziale è assunto rispettivamente di 15 m e 30 m, ponendo l'intervallo incrementale temporale uguale ad 1s). Per quanto riguarda il valore della k_{JAM} si è scelto il valore di 155 auto/km-corsia, che rappresenta il valore massimo che è stato trovato in bibliografia per tale grandezza, ritenendo che in condizioni di evacuazione sia probabile l'utilizzo di tutto lo spazio disponibile da parte degli autoveicoli.

5.2 Strada a doppia corsia stradale

Il problema connesso alla simulazione del traffico veicolare su strade caratterizzate da due corsie nel senso di marcia previsto per l'evacuazione è senz'altro di interesse nella fase di pianificazione dell'emergenza, potendosi prevedere l'utilizzo di strade a due corsie per ogni senso di marcia e/o di strade ad una corsia per ogni senso di marcia come strade a senso unico a corsia doppia.

L'ipotesi fondamentale su cui si basa il modello proposto è che, concordemente ad un comportamento omogeneo e consistente della popolazione degli automobilisti, ciascun automobilista tenda a rimanere nella corsia in cui si trova fin tanto che la corsia alternativa non presenti una densità veicolare tale da permettere una velocità di fuga maggiore. Sotto tale ipotesi e con riferimento alla figura 3, il caso di figura 2 può essere ricondotto al caso di una singola corsia equivalente caratterizzata da condizioni di traffico individuate dal punto T quando in ciascuna corsia stradale si hanno le condizioni descritte dal punto C.

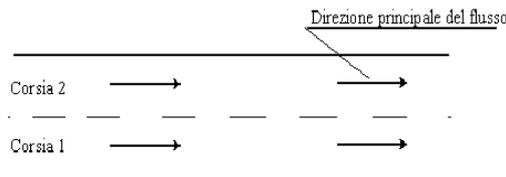


Figura 2. Strada a doppia corsia stradale nel senso di marcia previsto per l'evacuazione.

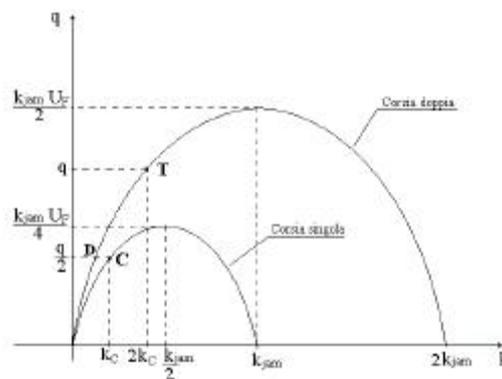


Figura 3. Relazioni Flusso-Densità per strade a singola e doppia corsia.

5.3 Punti di confluenza della popolazione nella rete

Per procedere alla simulazione del traffico veicolare di evacuazione su di una generica rete stradale è necessaria la identificazione e la caratterizzazione dei punti di ogni strada oggetto della simulazione dai quali si intenda far confluire la popolazione nella rete stradale. Tali punti, detti punti d'innesto o di confluenza laterali, sono identificati in fase di pianificazione a partire dalla distribuzione della popolazione, dalla localizzazione dei principali centri di vulnerabilità e dalle strade di collegamento alla rete principale disponibili. A ciascun punto d'innesto è associato il numero totale di veicoli che intendono partire da quel punto nella direzione prevista.

Il modello costituisce anche una base di partenza per la definizione dei modelli descrittivi del comportamento veicolare in presenza di intersezioni stradali non semaforizzate e può essere applicato in tutti i punti di confluenza laterali, in strade a singola o a doppia corsia stradale nel senso di marcia previsto per l'evacuazione.

Il calcolo dei generation rates (flussi veicolari per unità di lunghezza) parte quindi dalla valutazione del flusso d'innesto massimo (capacità d'innesto) che può aver luogo da una strada secondaria laterale (strada senza diritto di precedenza), confluyente nella strada principale (strada con diritto di precedenza). Per il calcolo di tale flusso sono state utilizzate una funzione di distribuzione $f(t)$ dei gap temporali (ritardi tra gli autoveicoli) di tipo esponenziale e la funzione $g(t)$ rappresentativa del numero medio di veicoli che si immettono nella strada principale quando il gap temporale è pari a t . Il numero massimo di autoveicoli che possono immettersi in una strada caratterizzata da un flusso veicolare q , provenienti da un innesto laterale caratterizzato da un Critical Gap T_C e da un Follow-up time T_F , è calcolato con:

$$q_m = q \cdot \int_0^{\infty} f(t) \cdot g(t) dt \quad (7)$$

Tale flusso massimo è posto uguale al flusso d'innesto laterale, avendo ipotizzato che all'istante iniziale della simulazione, tutti i veicoli che intendono immettersi nella rete stradale da un generico punto di confluenza siano già pronti a farlo e che quindi siano rappresentabili – almeno concettualmente – da una fila virtuale di autoveicoli in cui ciascuna auto attende il proprio turno per immettersi nella rete.

5.4 Intersezioni stradali non semaforizzate

Il modello base utilizzato nella simulazione delle intersezioni stradali non semaforizzate è stato sviluppato con riferimento al caso della figura 4.

Il flusso in uscita dalla strada secondaria (in ingresso nella strada principale) è in ogni istante limitato dal valore Q_{max} del flusso d'innesto massimo (capacità d'innesto, calcolata con il gruppo di equazioni sviluppato per la simulazione del transitorio di confluenza della popolazione nella rete). Tale flusso è posto uguale a Q_{max} se il flusso di arrivo in prossimità dell'intersezione nella strada secondaria è maggiore o uguale a Q_{max} . Se tale condizione non è verificata, si può comunque avere un flusso pari alla capacità d'innesto se nell'ultima cella della strada secondaria è presente una densità veicolare superiore al valore K_S (caso 1 di figura 5), cioè se si ha a disposizione un numero di auto tale da poter avere un tale flusso; se invece è verificato il caso 2 di figura 5 si può avere al massimo un flusso pari a q_M se nell'ultima cella della strada secondaria è presente una densità veicolare superiore a $K_{jam}/2$. In tutti i restanti casi il flusso di uscita è posto uguale al flusso di arrivo.

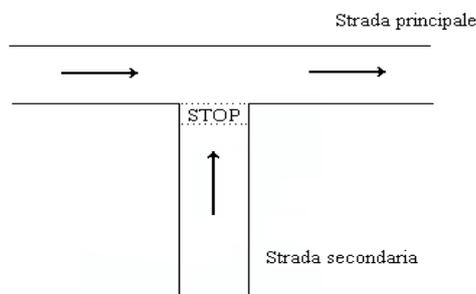


Figura 4. Intersezione non semaforizzata.

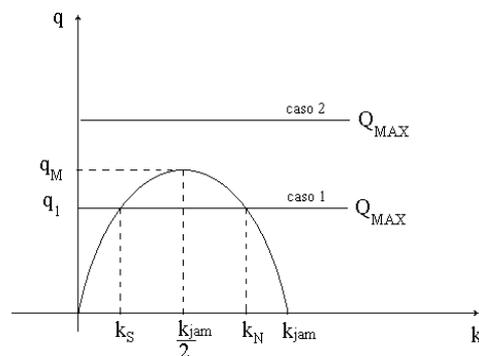


Figura 5. Relazione parabolica Flusso-Densità.

Le figure 6 e 7 rappresentano un esempio dei risultati ottenuti con il precedente modello nella simulazione del traffico relativamente al caso figura 4, supponendo un'alimentazione costante in ingresso alle due strade ed una fase costante di semaforo rosso in uscita dalla strada principale (detta strada2).

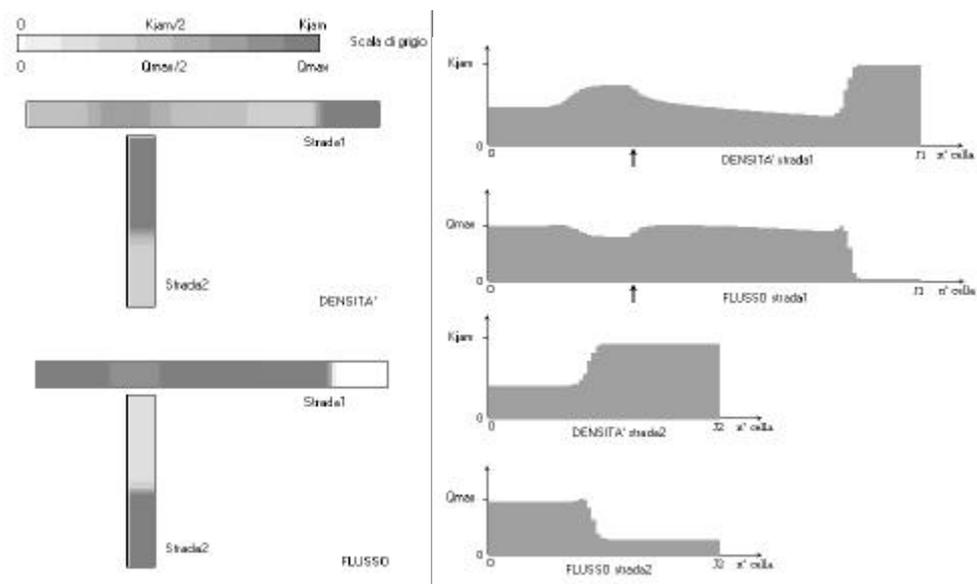


Figura 6. Rappresentazione in toni di grigio ed in forma di diagramma a barre di una intersezione stradale non semaforizzata in cui la strada1 ha diritto di precedenza sulla strada2, al tempo $T = 200$ s.

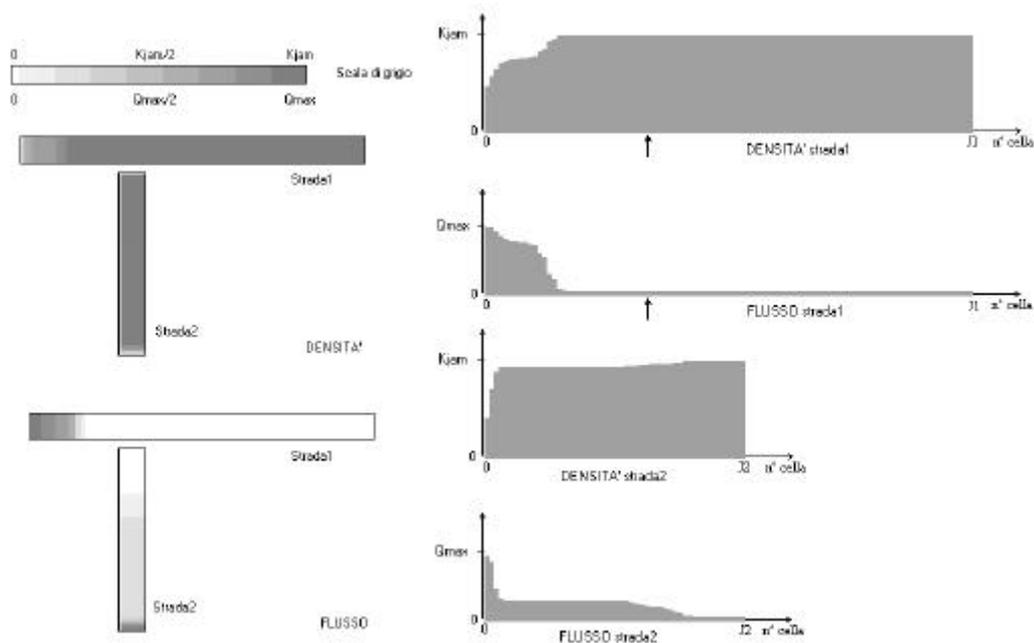


Figura 7. Rappresentazione in toni di grigio ed in forma di diagramma a barre di una intersezione stradale non semaforizzata in cui la strada1 ha diritto di precedenza sulla strada2, al tempo $T = 350$ s. La freccia verticale sotto ai diagrammi a barre indica la posizione dell'intersezione stradale.

5.5 Intersezioni stradali semaforizzate

Il modello di base che è stato sviluppato per trattare le principali tipologie di intersezione stradale semaforizzata, cioè in cui si suppone la presenza di personale addetto alla regolazione e controllo dei flussi di traffico, è costituito da due sottomodelli applicabili rispettivamente ai seguenti due casi (Figura 8):

1. Nodo stradale in cui la generica strada confluyente ha lo stesso numero di corsie stradali della strada divergente. In questo caso, durante la fase di semaforo verde della strada confluyente, la simulazione procede considerando l'ultima cella della strada in esame come una qualsiasi altra cella interna (la strada convergente e la strada divergente sono viste come una singola strada collegando le due celle

d'interfaccia con l'algoritmo si shock capturing); durante la fase di semaforo rosso, sull'ultima cella della strada in esame è invece imposta una condizione al contorno alle differenze centrali in cui il flusso di uscita è posto uguale a zero.

2. Nodo stradale in cui la generica strada confluyente ha un diverso numero di corsie stradali rispetto a quello della strada divergente. In questo caso, durante la fase di semaforo verde della strada confluyente si impongono sui due nodi d'interfaccia due condizioni al contorno alle differenze centrali, nelle quali il flusso in uscita dalla strada convergente è posto uguale al flusso in ingresso nella strada divergente. Tale flusso è valutato ad ogni passo temporale come il minore tra il flusso potenziale massimo, calcolato in base alla densità presente sull'ultimo nodo della strada convergente, ed il flusso massimo che si può avere in base alle condizioni di traffico esistenti sulla prima cella della strada divergente; durante la fase di semaforo rosso si impongono condizioni analoghe al punto precedente.

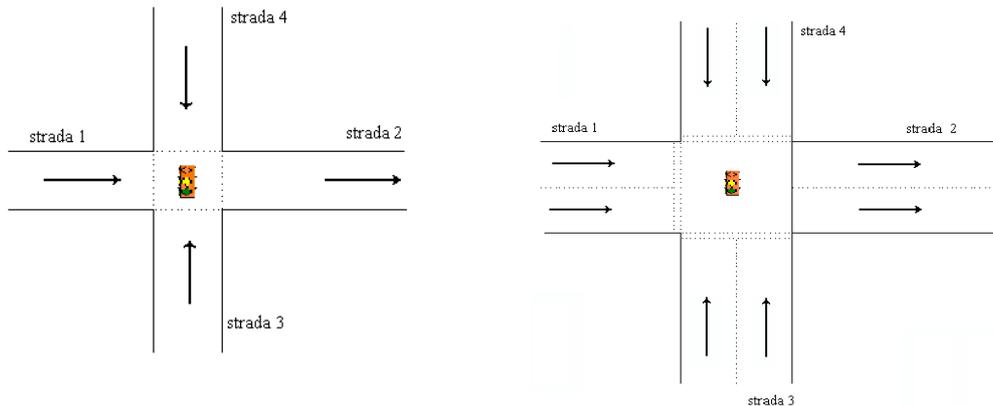


Figura 8. Esempi di intersezione stradale semaforizzata tra quattro strade.

6. CONCLUSIONI

Il presente lavoro è teso alla definizione di un modello matematico per la simulazione del traffico veicolare di evacuazione in HARIA 2. Tale modello sarà utilizzato congiuntamente al modello del comportamento umano per effettuare la valutazione delle conseguenze “dinamiche” di incidenti industriali.

Il raggiungimento degli obiettivi prefissati ha richiesto un notevole sforzo di approfondimento, sia a causa di quanto emerso dagli studi sullo stato dell'arte della teoria sui flussi di traffico (nel quale è stata evidenziata la carenza di un modello matematico in grado di stimare correttamente l'andamento delle variabili fondamentali del traffico in tutte le potenziali condizioni operative e la carenza bibliografica in merito a modelli di traffico su rete stradale urbana), sia a causa del problema della limitata disponibilità di informazioni sperimentali pertinenti.

I principali aspetti che caratterizzano il modello di traffico messo a punto sono:

- ◆ applicabilità al caso di una generica rete stradale caratterizzata da numerose intersezioni;
- ◆ applicabilità a situazioni rapidamente variabili;
- ◆ applicabilità a situazioni caratterizzate da elevati volumi di traffico, con o senza congestione dello stesso;
- ◆ ridotto numero dei dati di input;
- ◆ dati di input potenzialmente disponibili per qualsiasi tipo di strada o di nodo stradale;
- ◆ struttura modulare, che permette di valutare in un breve tempo e col minimo sforzo l'effetto di ipotesi diverse da quelle fatte (ad esempio l'utilizzo di un algoritmo e/o di una relazione Velocità-Densità diversi da quelli attualmente implementati; in questo contesto rientra anche l'equazione di distribuzione dei “gaps” temporali utilizzata nel calcolo dei generation rates e delle intersezioni non semaforizzate).

Le simulazioni del traffico che sono state effettuate nella fase di sviluppo e di messa a punto dei vari sottomodelli hanno confermato un buon comportamento generale del modello in tutte le condizioni operative ipotizzabili durante il transitorio di evacuazione veicolare della popolazione su una rete di strade.

In conclusione il modello di traffico è chiaramente delineato da un insieme di sottomodelli matematici relativi ad un certo numero di casi particolari (i casi di maggior interesse per una rete di evacuazione), che sono stati implementati nel linguaggio di programmazione VISUAL BASIC e che costituiscono materiale di dettaglio sufficiente per proseguire il progetto. Sono anche individuate le modalità di realizzazione del modello di rete stradale da inserire in HARIA 2 e quindi le linee di possibile ulteriore sviluppo del lavoro.

Una volta sviluppato il modello di traffico, risulta definito un potente strumento (HARIA 2) utilizzabile

sia per la valutazione dell'efficacia di una eventuale azione di evacuazione rispetto ad altre possibili azioni di emergenza applicabili, sia per l'analisi e la valutazione comparativa dell'efficacia dei potenziali piani di evacuazione (ad esempio in base ai relativi tempi di evacuazione e/o "dosi collettive"), implementabili in un dato scenario incidentale, per individuare quello più adeguato alla situazione incidentale in atto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Mazzini, M. Barlettani, G. Volta, *HARIA 2: una Metodologia per la Pianificazione e la Gestione delle Emergenze Tecnologiche*. Atti del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa, 1999. Presentato al Convegno "Grandi Rischi", Firenze, 3-8 Novembre 1998.
- [2] R. Cortese: *Review di Modelli di Traffico (Problematiche dell'evacuazione)*. Relazione al CCR Ispra, Aprile 1994.
- [3] *Traffic Flow Theory, A State of the Art Report*. www.cta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html.
- [4] P. G. Michalopoulos, D. E. Beskos, Jaw-Kuan Lin: *Analisis of Interrupted Traffic Flow by Finite Difference Methods*. Transportation Research, 18B, No 4/5, pp. 409-421, 1984.
- [5] *Modelling of Traffic Flow on Urban Freeway Corridors with Reduced Data Requirements*, <http://wucivil.cive.wustl.edu/~msl/paper/simulation.html>.
- [6] P. G. Michalopoulos: *Analysis of Traffic Flow at Complex Congested Arterials*. Transportation Research Record, 1194, pp. 77-86, 1988.
- [7] P. G. Michalopoulos, E. Kwon, G. Khang: *Enhancements and Field Testing of a Dynamic Simulation Program*. Transportation Research Record, 1320, pp. 203-215, 1991.
- [8] J. H. Banks: *The Relationship of Measured to Calculated Speeds and the "Fundamental Relationship: Some Comments*. Transportation Research, Meeting January 1995.
- [9] D. C. Gazis, R. Herman, R. W. Rothery: *Nonlinear Follow-the Leader Models of Traffic Flow*. Opns. Res., 9, 545, 1960.
- [10] P. G. Michalopoulos, D. E. Beskos, Y. Yamauchi: *Multilane Traffic Flow Dynamics: Some Macroscopic Considerations*. Transportation Research, 18B, No. 4/5, pp. 377-395, 1984.
- [11] M. Scarselli: *HARIA 2: Una Metodologia per la Pianificazione e l'Analisi di Emergenze Tecnologiche. Sviluppo di un Modello Matematico per la Simulazione del Piano di Evacuazione*, Tesi di laurea in Ingegneria Nucleare. Università di Pisa, a.a. 1998-99.