

# COMPORAMENTO UMANO IN CASO DI INCENDIO: MODELLI DI EVACUAZIONE

Linda Caira,

*Ingegnere della Sicurezza e Protezione Civile, [lindacaira90@gmail.com](mailto:lindacaira90@gmail.com)*

Marcello Mangione,

*Ingegnere Civile, Ufficiale Ruolo Tecnico dell'Arma dei Carabinieri e Dottore di Ricerca presso l'Università La Sapienza di Roma, [ing.mangione@libero.it](mailto:ing.mangione@libero.it)*

Franco Bontempi,

*Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni nella Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza, [franco.bontempi@uniroma1.it](mailto:franco.bontempi@uniroma1.it)*

## SOMMARIO

Lo studio dei meccanismi di esodo in caso di emergenza è stato condotto negli ultimi anni sempre con maggiore interesse. Nell'ambito della prevenzione incendi, infatti, le misure atte a favorire l'esodo sono sicuramente le più importanti per la salvaguardia della vita umana.

La riflessione sulla quale si vuole richiamare l'attenzione attraverso questo articolo, è come il tempo di evacuazione sia strettamente dipendente dal comportamento umano e come l'efficacia dell'azione preventiva sia quindi correlata anche a tale valutazione.

A questo scopo la ricerca ha come obiettivo lo studio delle caratteristiche comportamentali sia a livello dei singoli individui sia dei gruppi, al fine di consentire lo sviluppo di modelli di calcolo in grado di implementare anche tali proprietà.

Ci si propone, infine, di approfondire questo aspetto peculiare della modellazione dell'evacuazione, affiancando alla simulazione di un caso caratterizzato da una geometria semplice, quella di uno più complesso riguardante una galleria stradale, con l'obiettivo di individuare i parametri più significativi e studiarne i risultati ottenuti con l'ausilio del software FDS+Evac.

## 1. CARATTERISTICHE DEL SINGOLO INDIVIDUO

Per assicurare una efficace sicurezza antincendio degli occupanti di una struttura è necessario comprendere i fattori e le condizioni che possono influenzarne il comportamento. In una situazione di minaccia, le persone percepiscono il problema ed interpretano l'informazione che ricevono sul pericolo in vari modi.

Tale operazione appartiene a quello che in inglese viene chiamato *problem solving*, definito come *processo cognitivo messo in atto per analizzare la situazione problematica ed escogitare una soluzione*.

Gli individui infatti, di fronte ad una situazione di emergenza, devono prendere delle decisioni che cambiano a seconda dell'individuo e delle sue caratteristiche principali, riassumibili come di seguito [1].

- **Genere:** dallo studio di numerosi incendi, sono state riscontrate delle differenze relative al comportamento tra uomo e donna. I primi sono più propensi a cercare di spegnere il fuoco, mentre le donne preferiscono raggiungere la famiglia e scappare.
- **Età:** secondo lo studio di Kose (1999) [2], è possibile valutare le prestazioni dei singoli individui in base all'età, utilizzando tre categorie, abilità sensoriali, decisionali e di azione. È

immediato notare come le persone anziane possono avere una scarsa resistenza all'effetto debilitante del fumo e del calore e quindi sono più esposte al rischio.

- **Capacità fisiche e sensoriali:** durante una situazione di emergenza, possono essere presenti persone con disabilità fisiche o sensoriali (Figura 1), che possono quindi rallentare sia la propria evacuazione che quella degli altri individui presenti.



**Figura 1 – Aumento dei tempi di esodo per effetto delle ridotte capacità fisiche.**  
(<http://www.disabilityaccessconsultants.com>)

- **Familiarità:** secondo il modello affiliativo proposto da Sime nel 1985 [3], in caso di emergenza gli individui tendono a muoversi verso luoghi o persone a loro familiari. Il concetto di familiarità può essere anche inteso come la conoscenza che gli individui hanno di un edificio.
- **Attaccamento sociale:** se da un lato le persone con legami sociali o affettivi possono aiutarsi reciprocamente durante una situazione di emergenza, dall'altro, sono proprio tali legami che rallentano l'evacuazione e riducono la percezione di pericolo, portando a conseguenze anche fatali.

Un esempio è quanto accaduto durante l'incendio di un hotel che ha provocato la morte di 165 persone: all'interno erano presenti 2.500 ospiti, in particolar modo coppie e gruppi di persone conoscenti, legati da legami sociali significativi. Durante l'incendio, l'evacuazione non è stata di tipo individualistico ma i clienti si sono comportati come membri di un gruppo, spesso esitando nella fuga per assicurarsi che i propri cari li stessero seguendo. Le persone che non avevano legami, invece, sono state più rapide nella risposta agli stimoli di pericolo, come ad esempio al fumo, e nessuno di loro si è ferito. Questi risultati mettono quindi in luce il doppio effetto delle interazioni sociali sulla sopravvivenza nella fuga.

- **Attaccamento agli oggetti:** molte persone, prima di evacuare, si preoccupano di recuperare oggetti personali o animali, anche se ciò rallenta la loro fuga. Da numerosi studi è emerso che, quando un incendio avviene nella propria abitazione, le persone ritardano l'evacuazione. Le motivazioni sono da ricercare in un maggiore attaccamento verso la proprietà o al maggiore senso di sicurezza e protezione che si percepisce in casa propria.

- **Cultura, ruolo e responsabilità:** gli occupanti caratterizzati da una posizione gerarchica o da un livello culturale superiore, si comportano in maniera diversa rispetto agli occupanti privi di una certa responsabilità. Essi possono anche influenzare il comportamento dei loro sottoposti. Ciò non vale ad esempio per le gallerie stradali, in cui la struttura gerarchica non può essere riscontrata.
- **Reattività:** le persone coinvolte in una situazione di emergenza possono essere sotto l'effetto di medicinali, alcool o droghe, sostanze che alterano la percezione del pericolo e che possono ostacolare una corretta evacuazione.

Quindi di fronte ad un pericolo d'incendio, i singoli individui reagiscono in maniera differente in funzione anche delle caratteristiche personali e condizioni socio-ambientali che incoraggiano (o scoraggiano) determinati comportamenti. Conoscere il *fattore umano* in queste circostanze, può aiutare sia a migliorare l'azione di soccorso che a garantire la sicurezza degli individui coinvolti.

## 2. CARATTERISTICHE COLLETTIVE

L'evoluzione di una situazione di emergenza è l'esito di un confronto sociale in cui si osservano e si interpretano le risposte altrui al fine di prendere una decisione [4].

Il comportamento del singolo, infatti, si trasforma in comportamento collettivo quando l'attività di un individuo è influenzata dai suoi vicini in modo da modificare il comportamento di tutti verso un *pattern* comune.

Negli anni '60 gli esperimenti di Latané e Darley [5] avevano messo in luce tale concetto attraverso il famoso esperimento del fumo in una stanza: dei soggetti ignari vengono chiusi in una camera con la scusa di compilare un questionario, mentre da una feritoia viene fatto uscire del fumo. L'esperimento, ripetuto in diverse condizioni, ha ottenuto i seguenti risultati:

- soggetti soli nella stanza: il 63% si accorge del fumo dopo 5 secondi di emissione;
- soggetti in presenza di altre persone: 26% si accorge del fumo dopo 5 secondi di emissione.

La presenza di altre persone può quindi non solo inibire l'ispezione dell'ambiente ma anche ritardare (o impedire) la consapevolezza che stia accadendo qualcosa di anomalo.

Per tale motivo è necessario conoscere anche le tipologie di comportamento che la folla può assumere, raggruppate nelle categorie riportate di seguito.

- **Comportamenti gregari:** durante la fuga, le persone possono avere comportamenti individualistici o gregari. Se si pensa ad una situazione ordinaria, come l'uscita da un cinema o da un teatro, si nota immediatamente come, anche in situazione di normalità, il deflusso sia notevolmente influenzato dalle differenze dei comportamenti individuali e dall'interazione tra le persone.

In caso di emergenza, sotto uno stato di ansia e preoccupazione per la sopravvivenza, le persone tenderanno a muoversi con una velocità superiore, inizieranno a spingere, con il risultato della creazione di code in corrispondenza delle uscite e con la formazione di *strutture ad arco* (Figura 2).

L'aumento della velocità quindi, provoca un effetto negativo in corrispondenza dei colli di bottiglia, effetto quasi paradossale definito come *faster is slower*: più le persone si dirigono velocemente verso le uscite, più rallentano a causa dell'accalcamento che si genera. Inoltre ciò può provocare la caduta degli individui, i quali possono essere feriti e calpestati, diventando dei veri e propri ostacoli.

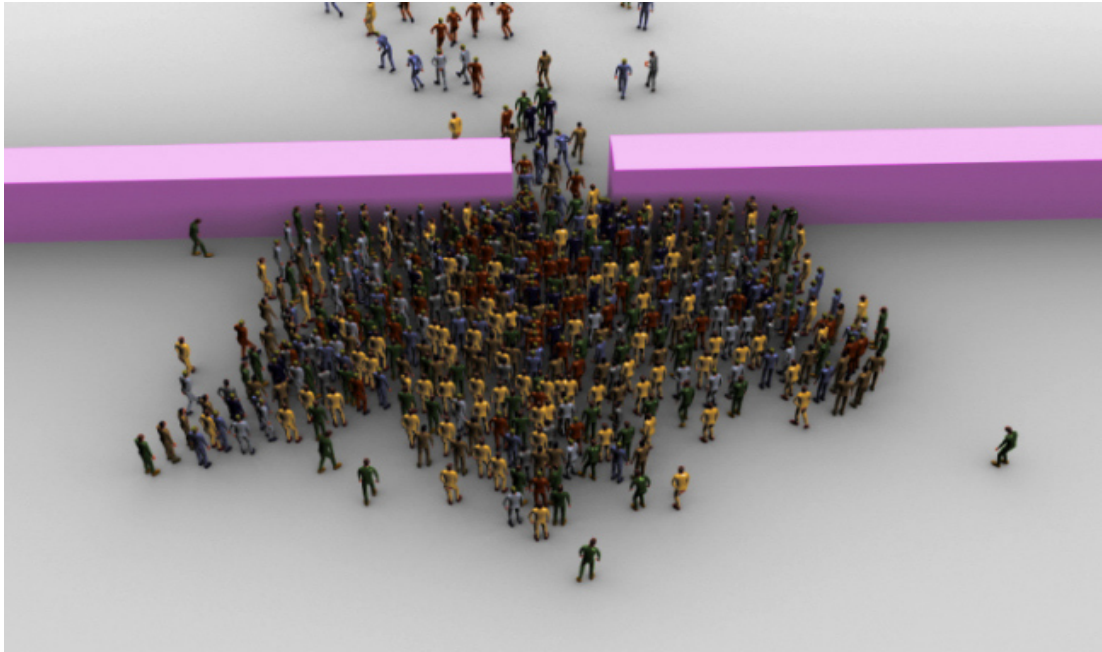


Figura 2 – Formazione di strutture ad arco. (<http://www.geosimulation.org/crowds>)

- **Comportamenti pro-sociali:** in caso di emergenza, è stato spesso riscontrata la creazione, tra gli individui coinvolti, di un comportamento *pro-sociale*, cioè essi diventano cooperativi, altruisti ed alcuni tendono a mostrare capacità di leadership spontanea, comportamenti che li portano ad essere protagonisti efficaci dell'evacuazione.
- **Panico:** il concetto di panico, nel corso della storia, ha subito numerose modifiche. Dapprima si riteneva che le persone in situazioni di emergenza perdessero la loro umanità e si trasformassero in animali in preda alla paura; negli Anni '50, Quarantelli [6] ha classificato il panico come un comportamento *asociale*: le persone non si comportano come animali ma cercano di soddisfare i propri bisogni, non prestando attenzione a quelli degli altri.

Studi successivi hanno definito la reazione di panico come: *comportamento collettivo in cui le capacità di giudizio e di ragionamento sono deteriorate, in cui vi sono emozioni forti di paura e in cui vi è comportamento (solitamente fuga) che può risultare in azioni autodistruttive ed eterodistruttive.*

In particolare, lo studio psicosociale sul comportamento di evacuazione, ha mostrato come, affinché si abbiano manifestazioni di panico, debbano verificarsi contemporaneamente diverse condizioni [7]:

- ansietà diffusa precedente al disastro, per esempio sotto forma di previsione che possa presentarsi un pericolo reale o come informazione da fonti autorevoli;
- mancanza di una leadership riconoscibile e che sappia dare istruzioni chiare (per esempio quali comportamenti protettivi assumere);
- percezione di rimanere intrappolati per lo sbarramento dell'unica via di fuga;
- comparsa di un fattore precipitante dell'ansia.

Nonostante sia quindi comune parlare di panico di massa, deve essere sottolineato come questo comportamento distruttivo si verifichi solo in casi eccezionali ed in concomitanza di dei quattro fattori sopra ricordati.

- **Comportamento affiliativo:** tale modello è stato sviluppato da Sime e mette in luce come i legami di gruppo in alcuni casi contribuiscano sui tassi di mortalità e ferimento. Egli ha intervistato 500 sopravvissuti ad un incendio di un grande complesso turistico in Gran Bretagna, in cui morirono 50 persone. L'autore ha osservato come il 73% degli individui è fuggito con una o più persone del proprio gruppo (nella maggioranza dei casi la famiglia). Tutte le persone decedute in una particolare area della residenza, erano insieme al loro gruppo quando sono state allertate ma probabilmente hanno deciso di andare via insieme, con un ritardo che è stato fatale. Le persone che non avevano legami sociali, invece, sono state più rapide nella risposta al pericolo e nessuno si è ferito.  
Un altro studio interessante è quello del 1995 di Proulx [8]: analizzando le registrazioni di evacuazioni da condomini, egli ha notato come le famiglie con bambini tendono tipicamente ad evacuare in un gruppo in cui l'adulto trasporta il bambino più piccolo. Proulx ha anche osservato come i gruppi di occupanti assumono la velocità del membro più lento, come anziani o bambini, ragion per cui, nel caso di legami affiliativi, si ha un netto ritardo nell'evacuazione.
- **Cluster di convergenza:** è stato osservato come spesso i gruppi di persone convergano verso un punto comune, da loro percepito come un luogo sicuro. Solitamente tale luogo è una zona caratterizzata da migliori condizioni, come l'assenza di fumo, una maggiore visibilità o la presenza di un balcone, che facilita la ventilazione. Riunendosi in gruppi gli occupanti percepiscono una riduzione dell'ansia e della tensione provocate dell'evento in atto;
- **Tendenza al rientro:** numerosi studi passati hanno messo in luce il fenomeno secondo cui, le persone sfuggite da un incendio, spesso scelgono di rientrare all'interno della struttura. Uno dei più interessanti fu quello relativo all'incendio di Arundel Park, in cui si evidenziò che un terzo delle persone che si erano messe in salvo, era successivamente rientrato. Questa scelta fu dettata dalla volontà di salvare le persone care o di recuperare gli effetti personali.  
Le statistiche hanno mostrato che solitamente sono gli individui di sesso maschile ad assumere questo comportamento, decisione che prendono in maniera razionale, intenzionale e senza ansia emotiva.

### 3. LA MODELLAZIONE DELL'ESODO IN FDS+EVAC

Molte delle caratteristiche finora analizzate possono essere modellate attraverso il software FDS+Evac, reperibile sul sito del *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Gli esseri umani sono modellati come agenti le cui dimensioni sono rappresentate da tre cerchi che approssimano la sezione trasversale ellittica del corpo umano (Figura 3).

Riguardo le **caratteristiche fisiche** del singolo agente, il software fornisce cinque categorie di individui, con dimensioni e velocità generate da distribuzioni uniformi: adulto, uomo, donna, bambino e anziano [9]. I valori di queste distribuzioni sono riportate in Tabella 1, dove le dimensioni  $R_d$ ,  $R_t$  e  $R_s$  sono mostrate in Figura 3, mentre  $ds = R_d - R_s$  rappresenta la rientranza

della spalla. Tali valori di default possono essere modificati a piacimento: ad esempio un agente disabile può essere simulato variando la velocità e le dimensioni del corpo.

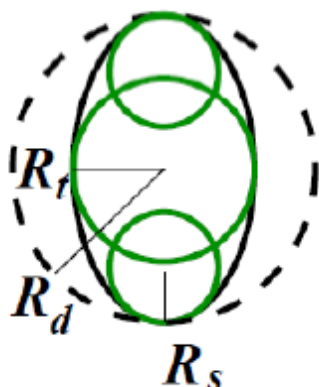


Figura 3 – Forma del corpo umano secondo il software FDS+Evac.

<i>Tipo di corpo</i>	<i>R<sub>d</sub></i> [m]	<i>R<sub>t</sub>/ R<sub>d</sub></i> [-]	<i>R<sub>s</sub>/ R<sub>d</sub></i> [-]	<i>ds/ R<sub>d</sub></i> [-]	<i>Velocità</i> [m/s]
<i>Adulto</i>	0.255±0.035	0.5882	0.3725	0.6275	1.25±0.30
<i>Uomo</i>	0.270±0.020	0.5926	0.3704	0.6296	1.35±0.20
<i>Donna</i>	0.240±0.020	0.5833	0.3750	0.6250	1.15±0.20
<i>Bambino</i>	0.210±0.015	0.5714	0.3333	0.6667	0.90±0.30
<i>Anziano</i>	0.250±0.020	0.6000	0.3600	0.6400	0.80±0.30

Tabella 1 – Velocità di fuga senza impedimenti e dimensioni del corpo in FDS+Evac.

FDS permette inoltre di definire la familiarità delle uscite, attraverso un parametro che rappresenta la probabilità che una porta di uscita sia conosciuta.

Per quanto riguarda, invece, le **caratteristiche comportamentali**, il software permette di definire tre diverse tipologie di agenti [10]:

- **Tipo 1:** rappresenta gli agenti con **comportamento attivo**, ovvero quelli che osservano l'ambiente per individuare il percorso di uscita più veloce. Utilizzano tutte le uscite visibili allo stesso modo, indipendentemente se le uscite siano familiari o meno.
- **Tipo 2:** è la tipologia di default. Rappresenta un agente caratterizzato da un **comportamento conservativo**. Questo tipo di agenti si dirigerà verso l'uscita familiare, anche se ve ne sono di più vicine e che quindi permetterebbero di evacuare più velocemente.
- **Tipo 3:** rappresenta un agente con **comportamento gregario**. Se un agente gregario non è stato in grado di ottenere un'informazione su come uscire da un locale dai suoi vicini più prossimi, né ha disponibile una via d'uscita familiare, allora controlla tutti gli agenti visibili e cerca di trovare l'agente più vicino che si sta dirigendo verso qualunque altra uscita. Tale tipologia nel caso base è stata assegnata ad anziani e bambini per mettere in evidenza la

loro incapacità nel prendere le proprie decisioni e la tendenza di gruppi e famiglie di rimanere insieme.

Dopo aver introdotto le modalità con cui il software permette di modellare le diverse caratteristiche umane, sia fisiche che comportamentali, vengono di seguito riportati due diversi casi studio, allo scopo di mostrare come, tra tutte le variabili che entrano in gioco durante un incendio, il fattore umano sia una delle più importanti.

#### 4. INCENDIO IN UNA STANZA CON DUE USCITE

Viene esaminata l'evacuazione di un gruppo di persone da un locale con due porte, una che conduce ad un'uscita (porta di sinistra) e l'altra che conduce ad un corridoio (porta di destra), che a sua volta porta gli sfollati ad evacuare l'edificio (Figura 4).

Il locale possiede le dimensioni  $10,6 \times 10,6 \times 2,40$  (h) m e all'interno non sono presenti né sistemi di allarme e rilevazione né sistemi di spegnimento.

Sono eseguiti due gruppi di simulazioni, il primo in cui varia il rateo di particolato (soot) emesso, mentre nel secondo viene modificato il comportamento umano.

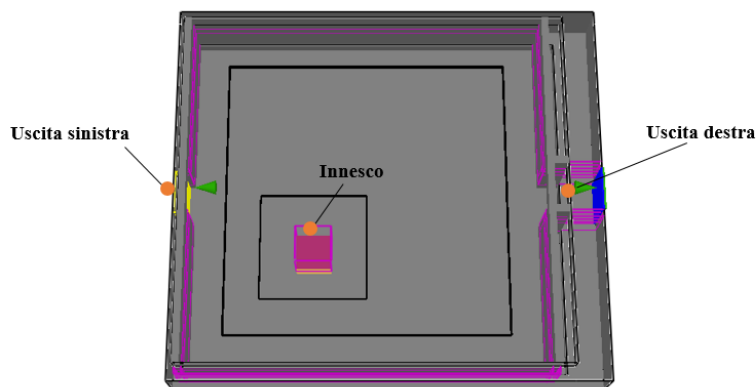


Figura 4 – Geometria del locale.

#### SIMULAZIONI AL VARIARE DEL SOOT YIELD

L'incendio, localizzato come da Figura 4, sviluppa un  $HRR_{PUA}$  (*Heat Release Rate per Unit Area*), pari a  $1.000 \text{ KW/m}^2$ .

Sono effettuate tre diverse simulazioni, con un rateo di particolato (*soot yield*) crescente, da 0.05 fino a  $0.2 \text{ kg}_{\text{soot}}/\text{kg}_{\text{comb}}$  come mostrato in Figura 5.

La scelta del rateo di produzione del particolato rappresenta un momento di criticità: infatti, la combustione di un modesto quantitativo di materiale plastico, come un apparecchio televisivo o una poltrona, può avere dal punto di vista della diffusione dei fumi nella fase di pre-flashover, importante nella valutazione dell'esodo dei presenti, conseguenze molto più gravose di un incendio di legno o carta con livelli di picco termico anche molto maggiori.

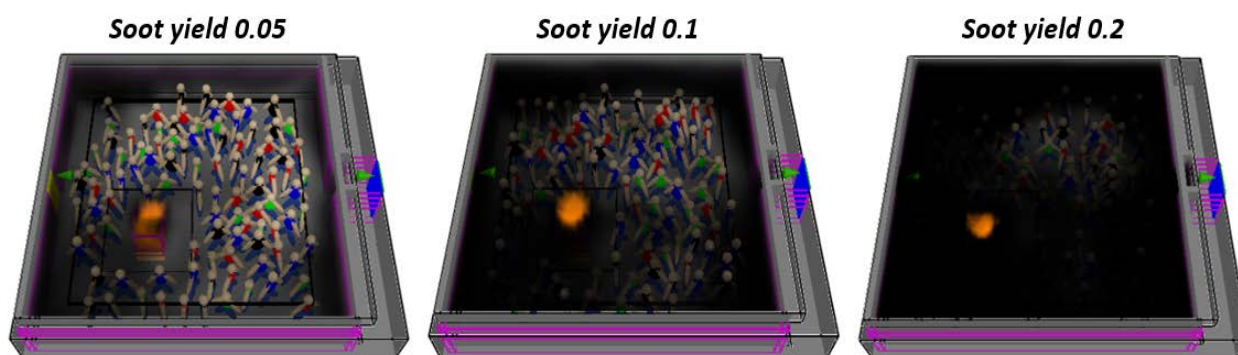
Generalmente, come riportato nel D.M. 9 maggio 2007, può essere accettabile un rateo di produzione di particolato pari a:

- 0,01  $\text{kg}_{\text{soot}}/\text{kg}_{\text{comb}}$  per materiali cellulósici quali legno, carta, ecc.;
- 0,08 – 0,10  $\text{kg}_{\text{soot}}/\text{kg}_{\text{comb}}$  o anche maggiore (con effetti molto piú gravosi) per materiali plastici quali, PVC, poliuretano, ecc.

All'interno del locale sono presenti 100 agenti, la cui composizione è mostrata nella *Tabella 2*.

<i>Categoria</i>	<i>Tipo di agente</i>	<i>Comportamento</i>	<i>Colore</i>	<i>Familiarità porte</i>	<i>Numerosità</i>
<b>Adulto</b>	1	Attivo	Nero	Entrambe	25
<b>Uomo</b>	2	Conservativo	Blu	Porta SX	25
<b>Donna</b>	2	Conservativo	Rosso	Porta DX	25
<b>Bambino</b>	3	Gregario	Verde	Nessuna	25

**Tabella 2 – Composizione degli occupanti il locale.**



**Figura 5 – Agenti all'istante t=15 s al variare del soot yield.**

Il risultato atteso è che una maggiore formazione di particolato diminuisca la visibilità e che quindi influenzi negativamente sui tempi di esodo degli agenti.

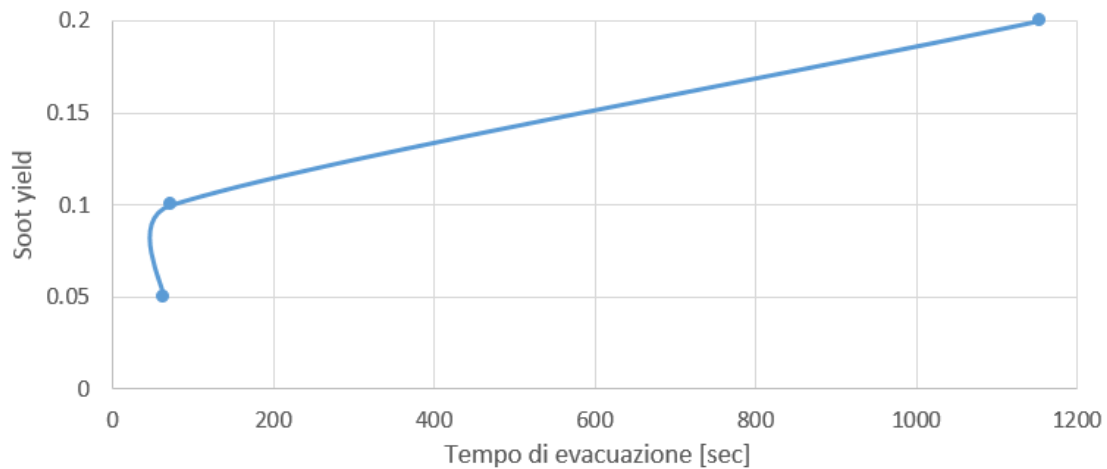
In Figura 6 vengono riportati i risultati ottenuti dalle tre simulazioni: all'aumentare del rateo di particolato, nel caso di una stanza senza alcun impianto di rilevazione o di spegnimento, aumenta notevolmente il tempo di evacuazione degli agenti.

In particolare, nel caso di soot pari a 0.5  $\text{kg}_{\text{soot}}/\text{kg}_{\text{comb}}$  l'evacuazione si conclude in 64 secondi, per un soot di 0.1 in 73 secondi ed infine con un soot di 0.2 in 1.155 secondi, ovvero circa 19 minuti. Tali risultati mettono in luce l'importanza del parametro soot e dimostrano, inoltre, come la sua scelta rappresenti un momento di criticità per il progettista antincendio.

Tale simulazione è anche significativa ai fini investigativi (arson / fire investigation) in quanto nella fase di repertamento della scena occorre valutare la natura e caratteristiche dei materiali presenti al fine di dare il giusto valore, nel listato FDS, di emissione di fuliggine.



Un valore casuale comporterebbe una modellazione non attendibile e stridente con l'analisi semiotica dell'incendio repertato [11].



**Figura 6 – Tempi di evacuazione al variare dell'emissione di fuliggine.**

### **SIMULAZIONI AL VARIARE DEL COMPORTAMENTO UMANO**

Viene ora considerato il gruppo di simulazioni relativo al comportamento umano. Come introdotto nei paragrafi precedenti, FDS+Evac permette di modellare gli individui attraverso le tipologie di agenti (attivi, conservativi e gregari).

Per mettere in luce le differenze che derivano da ciascun tipo, sono state eseguite tre simulazioni, la prima in cui nella stanza vi sono soli agenti attivi, la seconda soli agenti conservativi e la terza soltanto gregari. In tal modo può essere valutato come, al ridursi dell'aspetto razionale, vari il tempo di evacuazione (Figura 7).

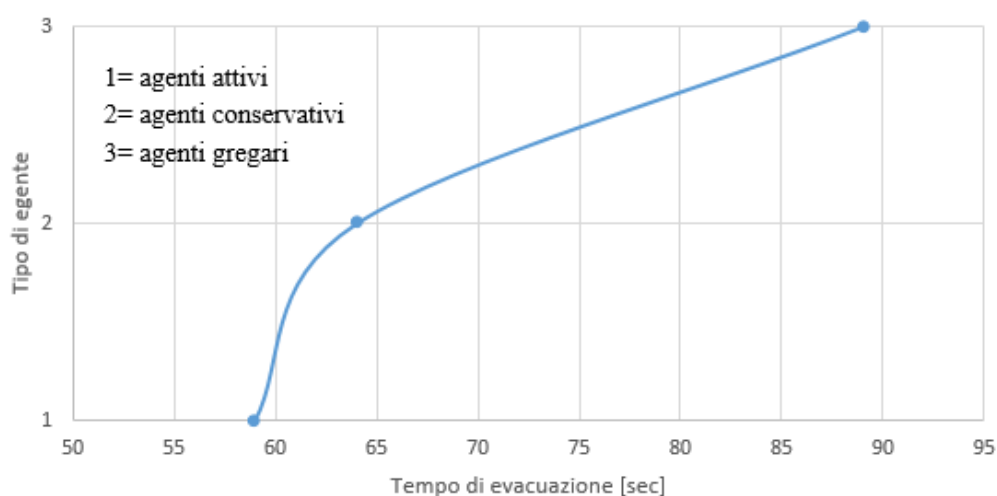
In ognuna delle tre simulazioni è stato considerato lo stesso  $HRR_{PUA}$  pari a  $1.000 \text{ KW/m}^2$  e lo stesso Soot yield pari a  $0.1 \text{ kg}_{\text{soot}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ .



**Figura 7 – Agenti all'istante t=30 s al variare del comportamento umano.**

Mentre gli agenti attivi scelgono l'uscita a loro più vicina, quelli conservativi vi si distribuiscono secondo la familiarità ed infine quelli gregari utilizzano tutti la stessa porta, nonostante ve ne sia una sgombra e più vicina, provocando così la formazione di strutture ad arco consistenti (Figura7). Nel grafico in Figura 8 viene riportato il tempo di evacuazione ottenuto al variare della tipologia di agente. Ciò che ne risulta è che, rispetto al tempo di evacuazione degli agenti attivi, quello necessario agli agenti gregari è superiore del 50%.

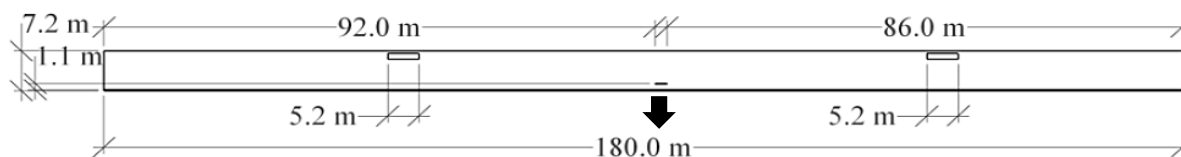
Tale differenza mette in luce come la modellazione del fattore umano, anche in fase investigativa oltre che progettuale, sia uno dei fattori predominanti nel calcolo del tempo di evacuazione e che per tale ragione, deve necessariamente essere tenuto in conto. Quindi, in una scena d'incendio con vittime ove è stata richiesta ad esempio da parte dell'autorità giudiziaria una perizia, occorre quindi preliminarmente capire le caratteristiche dell'individuo prima di partire con la modellazione dell'esodo [12].



**Figura 8 – Andamento del tempo di simulazione al variare del tipo di agenti.**

## 5. INCENDIO IN UNA GALLERIA STRADALE

Il tunnel di cui si è realizzato il modello è a canna singola, con traffico bidirezionale, di dimensioni 10 × 180 × 7,2 (h) m e con un'uscita di emergenza situata a 73 m dall'ingresso di destra (Figura 9).

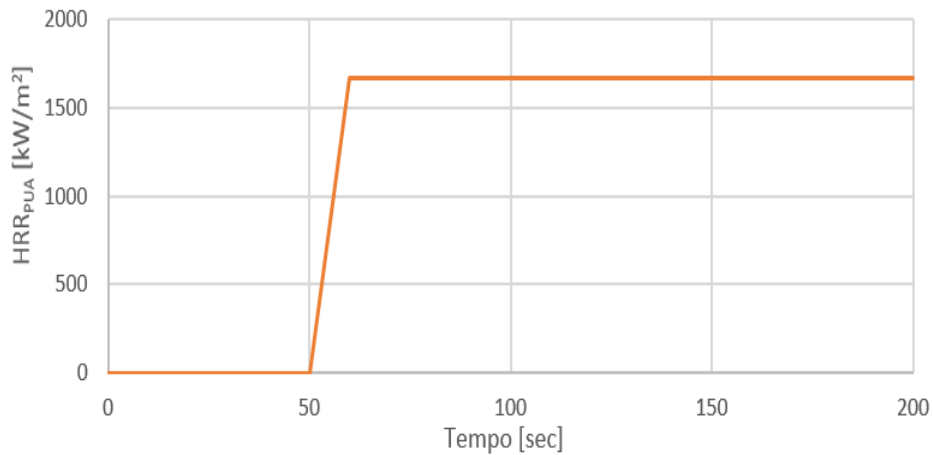


**Figura 9 – Geometria della galleria stradale.**

È stato ipotizzato che l'incendio inizi al cinquantesimo secondo di simulazione, aumentando poi in maniera lineare fino al valore massimo di RHR pari a 10 MW, raggiunto a 55 secondi. Tale valore massimo si mantiene costante fino alla fine della modellazione.

Come combustibile è stato considerato del poliuretano, i cui gas tossici (tra cui anche acido cianidrico) sono molto dannosi per l'uomo.

La sorgente di innesco ha dimensioni  $2 \times 3$  m e si trova a 92 m dall'ingresso di sinistra. Essa produce un  $HRR_{PUA}$  pari a  $1666.66 \text{ kW/m}^2$  (Figura 10).

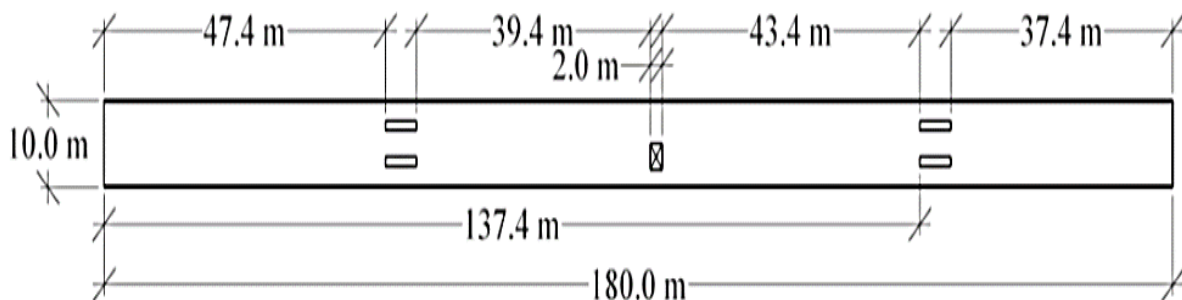


**Figura 10 – Intensità della sorgente di innesco.**

Secondo la normativa vigente, per una galleria di lunghezza inferiore ai 500 m non è richiesto un impianto di ventilazione.

In questo lavoro viene però ipotizzato che il tunnel in esame abbia parametri strutturali e di traffico tali da influenzare la sicurezza e che, quindi, necessitino dell'installazione di un impianto di ventilazione meccanica.

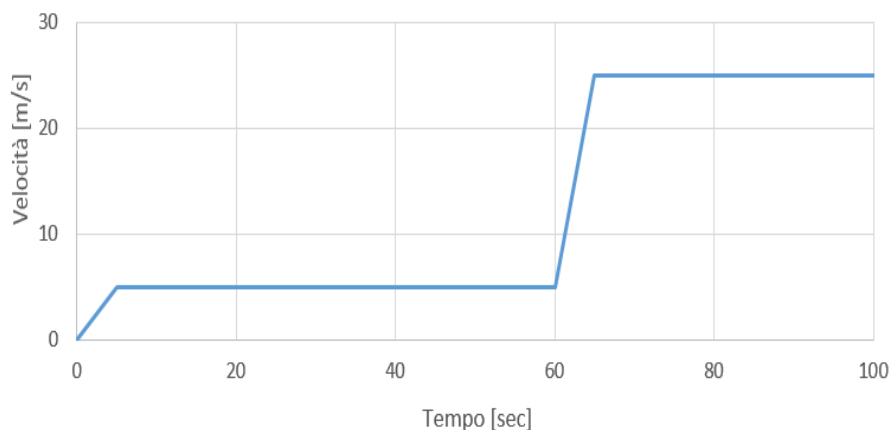
Tale sistema si compone di due coppie di fan jet posizionati a circa 1 m al di sotto del soffitto, alle distanze di 47,4 m e 137,4 m dall'ingresso sinistro della galleria.



**Figura 11 – Sezione longitudinale della galleria (jet fan e punto di ignizione).**

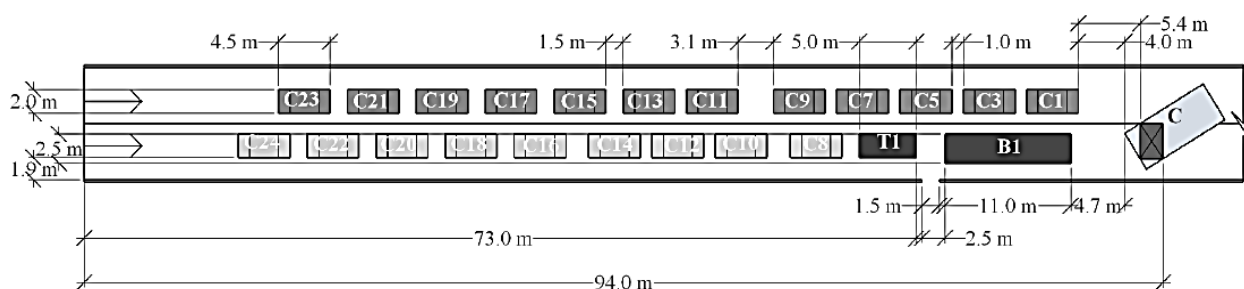
Inizialmente il flusso provocato dall'azione di ventilazione è quasi stazionario: tutti i fan jet immettono aria ad una velocità di 6,25 m/s.

Dopo 60 secondi, essendosi innescato l'incendio, i jet fan entrano in condizione di emergenza ad aumentano linearmente la loro velocità fino ad un massimo di 25 m/s come rappresentato dalla Figura 12.



**Figura 12 – Velocità del sistema di ventilazione.**

All'interno della galleria sono presenti 21 automobili (da 1 a 4 passeggeri), un autobus (30 passeggeri) e un minivan (9 passeggeri). La disposizione dei veicoli e la distanza tra di essi è mostrata in Figura 13, dove con C<sub>1</sub>÷C<sub>24</sub> vengono indicate le automobili, con T<sub>1</sub> il minivan, con B<sub>1</sub> l'autobus ed infine il punto di innesco con C.



**Figura 13 – Disposizione dei veicoli all'interno del tunnel.**

Durante le simulazioni è stato assunto che tutti gli agenti abbiano familiarità con l'ingresso da cui sono entrati.

È stato inoltre ipotizzato che le automobili da 1 a 7, l'autobus ed il minivan, conoscano anche l'uscita di emergenza, in quanto vi si arrestano in prossimità.

Anche per questo secondo caso studio sono stati considerati gli stessi gruppi di simulazioni, quelli relativi al soot yield ed al comportamento umano.

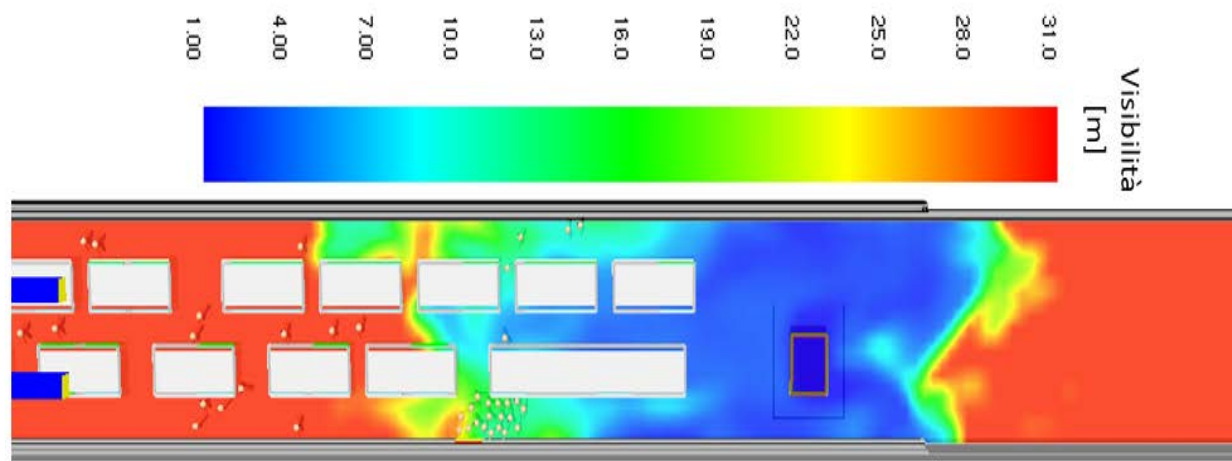
### **SIMULAZIONI AL VARIARE DEL SOOT YIELD**

Sono state effettuate due diverse simulazioni, con un rateo di particolato crescente: 0.1 kg<sub>soot</sub>/kg<sub>comb</sub> per la prima simulazione e 0.2 kg<sub>soot</sub>/kg<sub>comb</sub> per la seconda. All'interno del tunnel sono presenti 94 individui, la cui composizione è mostrata nella Tabella 3.

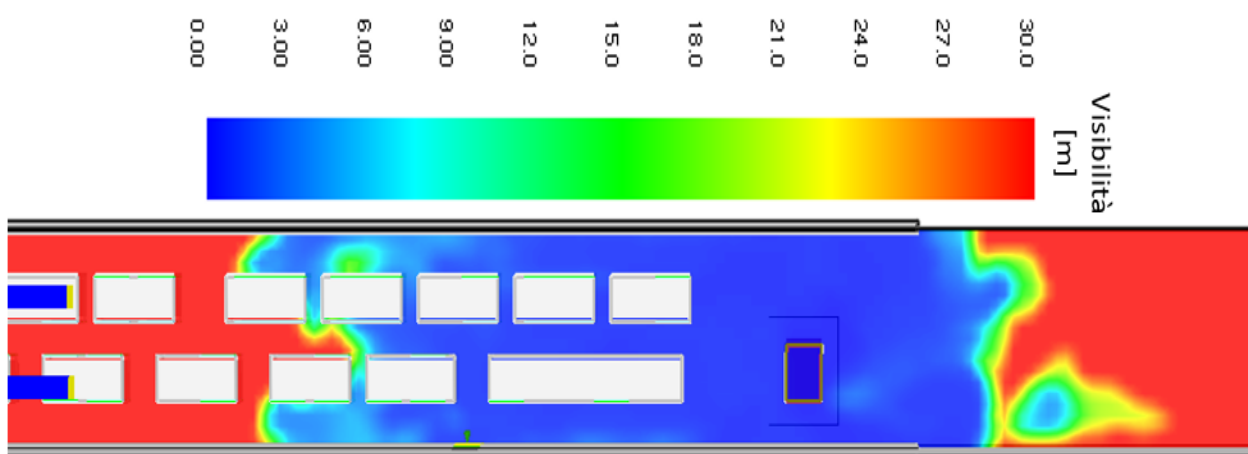
Come mostrato in Figura 14 e Figura 15, all'aumentare del rateo di particolato, la visibilità all'interno della galleria si riduce.

<i>Categoria</i>	<i>Tipo di agente</i>	<i>Comportamento</i>	<i>Colore</i>	<i>Numerosità</i>
<b>Adulto Uomo</b>	1	Attivo	Nero	52
<b>Donna</b>	2	Conservativo	Blu	25
<b>Bambino</b>	3	Gregario	Verde	5
<b>Anziano</b>	3	Gregario	Grigio	7

**Tabella 3 – Composizione agenti.**

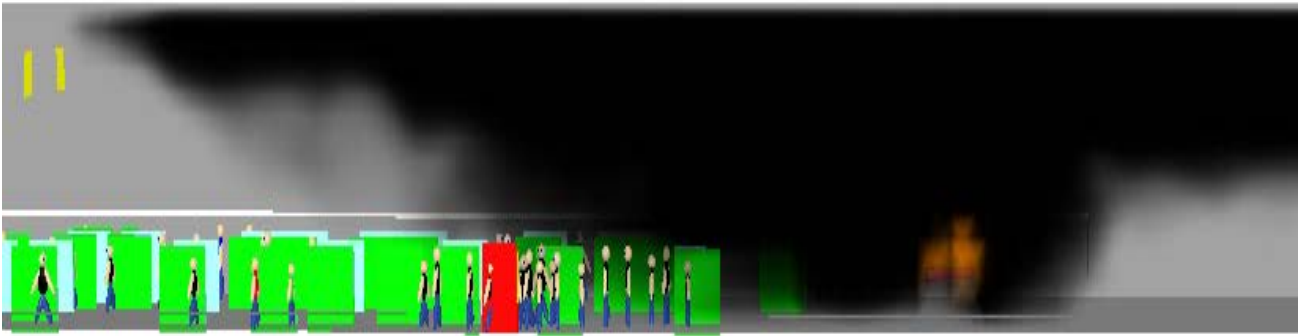


**Figura 14 – Visibilità nel caso di Soot yield pari a 0.1 all'istante t=75 s.**

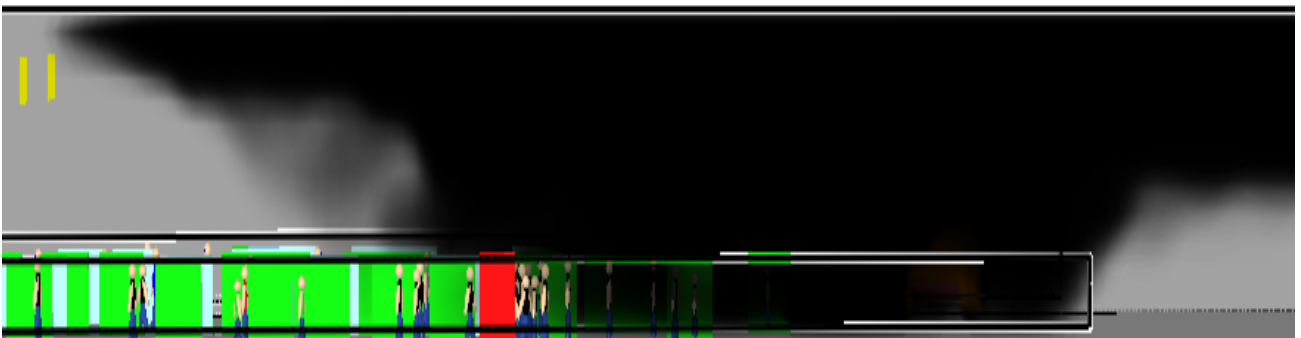


**Figura 15 – Visibilità nel caso di Soot yield pari a 0.2 all'istante t=75 s.**

In entrambi i casi, dopo 60 secondi l'incendio è partito e solamente gli agenti nelle autovetture in prossimità del punto di innesco escono dai rispettivi veicoli; man mano che il tempo scorre anche gli agenti degli altri veicoli iniziano ad evacuare.



**Figura 16 – Simulazione con soot yield pari a 0.1 all’istante t=70 s.**



**Figura 17 – Simulazione con soot yield pari a 0.2 all’istante t=70 s.**

Nella prima simulazione gli agenti evacuano in 176 secondi mentre nella seconda in 154 secondi. All’aumentare del rateo di particolato quindi, il tempo di evacuazione risulta essersi ridotto, **risultato contrario alle aspettative.**

La spiegazione è da ricercarsi, nella posizione iniziale casuale degli agenti e nell’algoritmo di selezione delle uscite.

Il software, infatti, dispone gli agenti in maniera casuale, per cui è necessario eseguire diverse *run* per ottenere un range di tempi di evacuazione di cui il risultato qui riportato ne rappresenta il limite inferiore, caratterizzato da una posizione ottimale degli agenti a cui corrisponde proprio un minor tempo di evacuazione.

In generale, quindi, è necessario sviluppare delle simulazioni successive nell’ottica del Metodo di Monte Carlo.

Ciò che quindi deve emergere da questa simulazione è come l’aumento del rateo di particolato non ha avuto influenza negativa sull’esodo.

Nel caso di maggiore emissione di fuliggine si è inoltre osservata un’inversione di tendenza nell’esodo: andandosi inizialmente a ridurre la visibilità in corrispondenza dell’uscita di emergenza, alcuni degli agenti più vicini a tale uscita, si dirigono in direzione del portale (Figura 18); l’intervento dei jet fan poi spinge il fumo nella direzione opposta, liberando così la via di fuga dal fumo. Gli agenti quindi tornano indietro ed utilizzano così l’uscita di emergenza (Figura 19).

Rispetto al primo caso studio quindi, in una galleria stradale, in presenza di un impianto di ventilazione di emergenza, l’emissione di particolato non appare un parametro determinante come lo era nel caso di una semplice stanza con due uscite.

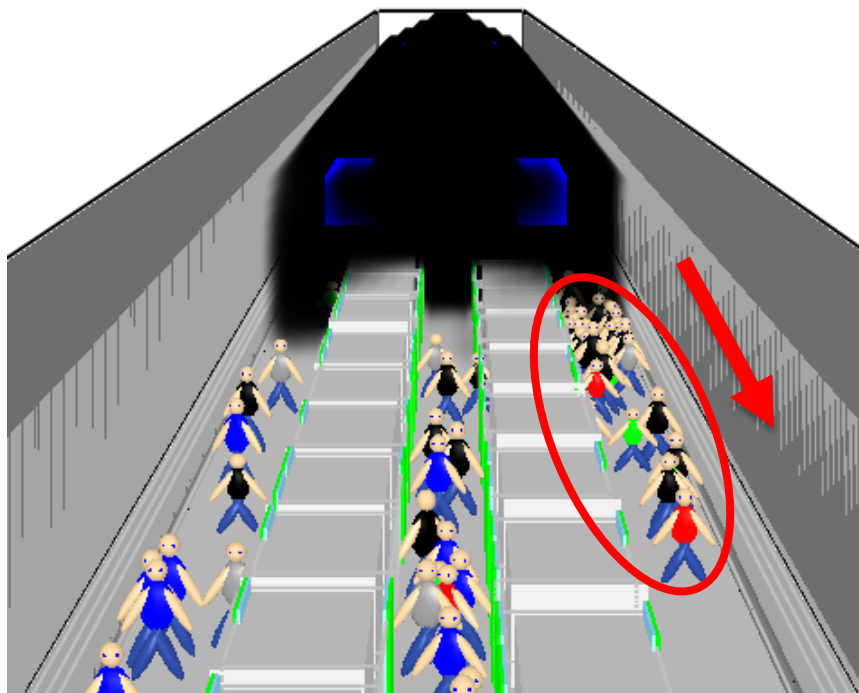


Figura 18 – Agenti che procedono verso il portale all’istante t=90 s.

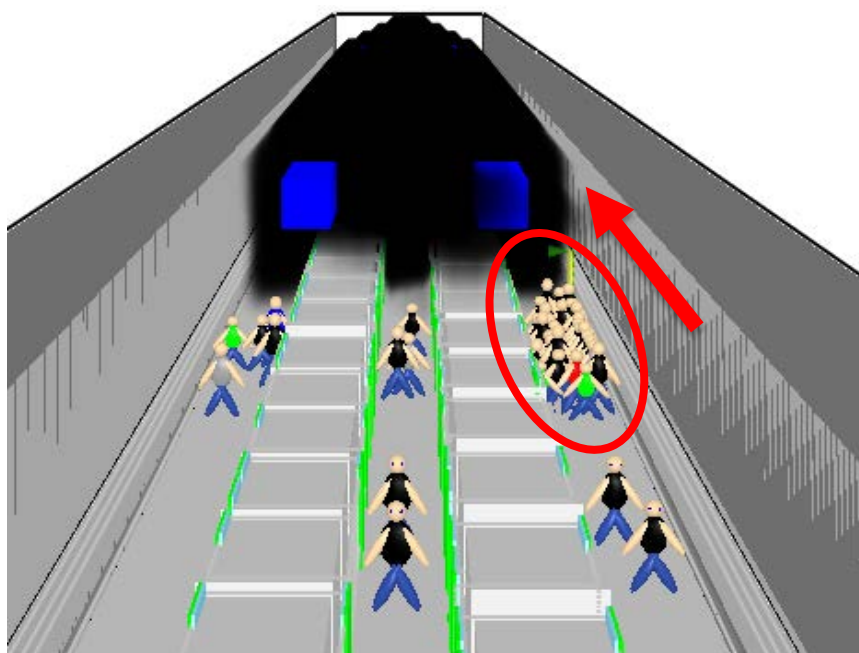


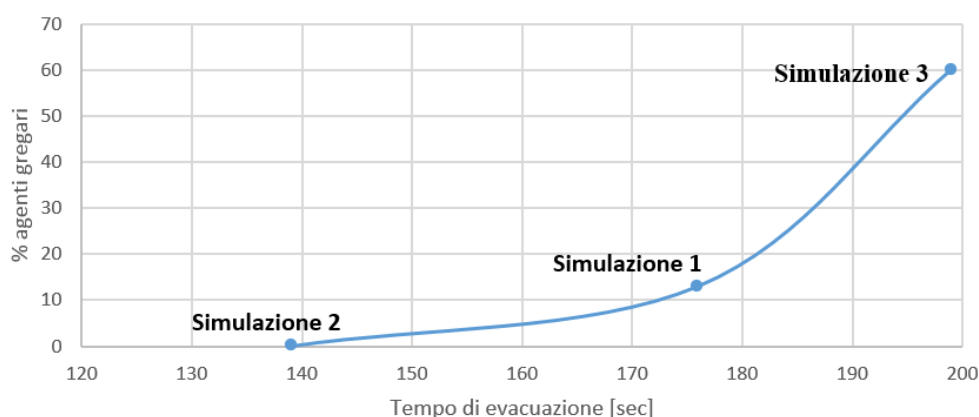
Figura 19 – Agenti che tornano indietro verso l’uscita di emergenza all’istante t=106 s.

### SIMULAZIONI AL VARIARE DEL COMPORTAMENTO UMANO

Vengono di seguito messe a confronto tre simulazioni, tutte caratterizzate da un rateo di particolato pari a  $0.1 \text{ kg}_{\text{soot}}/\text{kg}_{\text{comb}}$  e  $\text{HRR}_{\text{PUA}}$  di  $1666.66 \text{ kW}/\text{m}^2$  ma con una diversa composizione di agenti:

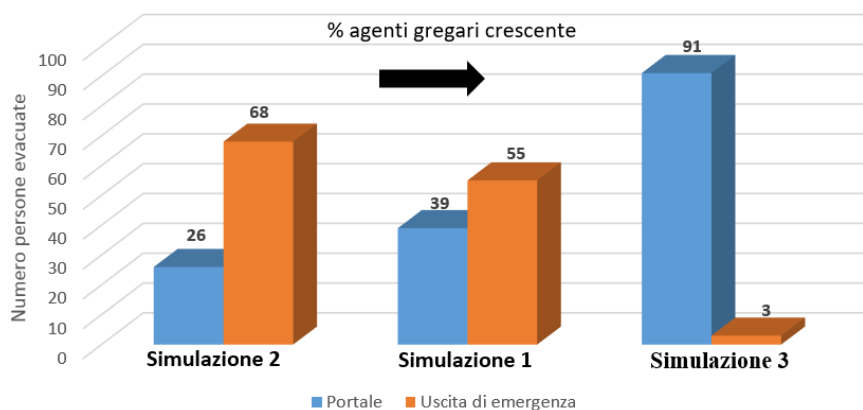
- **simulazione 1:** 55% agenti attivi, 32% conservativi e 13% gregari;
- **simulazione 2:** 100% agenti attivi;
- **simulazione 3:** 10% agenti attivi, 30% conservativi e 60% gregari.

I risultati ottenuti sono riportati nel grafico in Figura 20: nella simulazione in cui è presente un maggiore tasso di agenti gregari il tempo di evacuazione aumenta notevolmente. Infatti, nel caso in cui non sono presenti di agenti gregari (simulazione 2), l'esodo si conclude in 139 s; mentre nella simulazione in cui è presente il 60% di gregari l'evacuazione è terminata in 199 secondi.



**Figura 20 – Andamento del tempo di evacuazione al variare della % di agenti gregari.**

Al variare della composizione degli agenti, può essere analizzata anche la distribuzione lungo le due vie di fuga (Figura 21). Come si nota dal grafico, al crescere del comportamento irrazionale, gli agenti prediligono come uscita, l'ingresso da cui sono entrati. Infatti, nonostante molti si trovino inizialmente nei pressi dell'uscita di emergenza, essi la superano e si dirigono verso il portale familiare.



**Figura 21 – Confronto delle uscite utilizzate al variare della % di agenti gregari.**

Tali risultati mettono in luce il concetto di non sottovalutare, nella progettazione delle misure di prevenzione e protezione di un sistema di esodo, il comportamento umano durante una situazione di emergenza. Infatti nella realtà, il comportamento attivo è tipico principalmente degli utenti abituali di una galleria stradale, che sono quindi a conoscenza delle uscite di emergenza presenti; andrebbe quindi a svantaggio di sicurezza non tenere conto della possibilità di un alto tasso di utenti non abituali.



I risultati di questo studio confermano, inoltre, quanto osservato statisticamente, ovvero che, in caso di incendio, la maggior parte delle persone predilige la fuga attraverso l'ingresso noto, a scapito quindi della salvaguardia della vita umana.

## 6. CONCLUSIONI

Lo studio dei meccanismi di esodo in caso di emergenza è stato condotto negli ultimi anni sempre con maggiore interesse. Nell'ambito della prevenzione incendi, infatti, le misure atte a favorire l'esodo sono sicuramente le più importanti per la salvaguardia della vita umana. Nei due casi studio presentati la differenza è la presenza, nelle simulazioni in galleria, di un impianto di ventilazione di emergenza. Tale scelta è volta a dimostrare come, mentre i parametri relativi all'incendio possono essere meno significativi in presenza di impianti di protezione (sistemi di spegnimento, impianti di ventilazione ecc.), l'aspetto irrazionale del comportamento umano rimane il parametro che più influenza il tempo di evacuazione.

La progettazione antincendio non può quindi prescindere dallo studio del comportamento umano nelle sue numerose sfumature e deve essere volta alla riduzione di reazioni irrazionali degli utenti di una qualunque struttura, attraverso idonei sistemi che aumentino la percezione di sicurezza (migliori impianti di illuminazione, allarmi acustici combinati con messaggi registrati, adeguata segnalazione delle uscite di emergenza).

Non di poco è l'approccio investigativo in caso di incendi con vittime: modellare meticolosamente la scena d'incendio con la finalità di dirimere ogni ragionevole dubbio, in ambito giudiziario, è un'esigenza ormai crescente. La modellazione del comportamento umano per l'ingegnere *fire investigator* diventa quindi uno strumento potente per chiarire le dinamiche accidentali sullo scenario reperato e per rispondere compiutamente ai quesiti peritali in ambito penale [13].

## RIFERIMENTI

- [1] Beard A. e Carvel R. (2005), *"Handbook of Tunnel Fire Safety"*, Ice publishing, Seconda edizione, Capitolo 19.
- [2] Kose, S. (1999), *"Emergence of aged populace: who is at higher risk in fires?"*, Fire and Materials, 23(6), 337-340.
- [3] Sime J.D. (1985), *"Movement towards the familiar: person and place affiliation in a fire entrapment setting"*. Environment and Behavior, 17, 697-724.
- [4] Pierantoni L. e Prati G., *"I comportamenti collettivi durante l'evacuazione nelle emergenze"*.
- [5] Latané B. e Darley J. (1970), *"The unresponsive bystander: Why doesn't he help?"*, Appleton-Century-Crofts.
- [6] Quarantelli E. (1957), *"The behavior of panic participants. Sociology and Social Research"*.
- [7] Mileti, D. S. e Peek L. (2005), *"The social construction of safety: considering the importance of communicating risk information"*.
- [8] Proulx, G. (2005). *"Analysis of Published Accounts of the World Trade Center Evacuation"*. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster.
- [9] Lavanco G. *"Psicologia dei disastri. Comunità e globalizzazione della paura"*.
- [10] Amico B., Bellomia G., Bellomia G. (2011), *"Fire Safety Engineering"*.
- [11] <http://www.fse-training.it>
- [12] Bontempi F., Crosti C., Mangione M., *"L'investigazione antincendio sugli aspetti strutturali: una proposta di codifica"*, Rivista Antincendio, ottobre 2015;
- [13] Mangione M., Bontempi F., Crosti C., *"Structural Fire Investigation e Ingegneria Forense"*, Atti del Convegno IF CRASC'15 Ingegneria Forense, Università La Sapienza, Roma, 2015.