



**Comando provinciale  
Dei Vigili del Fuoco  
Perugia**

**Perugia, 20 marzo 2013: Nuovi metodi di pianificazione  
dell'emergenza e prevenzione nei luoghi chiusi. Le  
gallerie ferroviarie in provincia di Perugia**

# **esodo in emergenza: metodi di calcolo e di simulazione**

**Stefano Marsella - Comandante provinciale VVF- Perugia**

# ESODO IN EMERGENZA & METODI DI CALCOLO

edifici normali, luoghi di lavoro ordinari, attività normale

edifici normali, necessità di valutazioni specifiche (deroghe)

metodo tradizionale

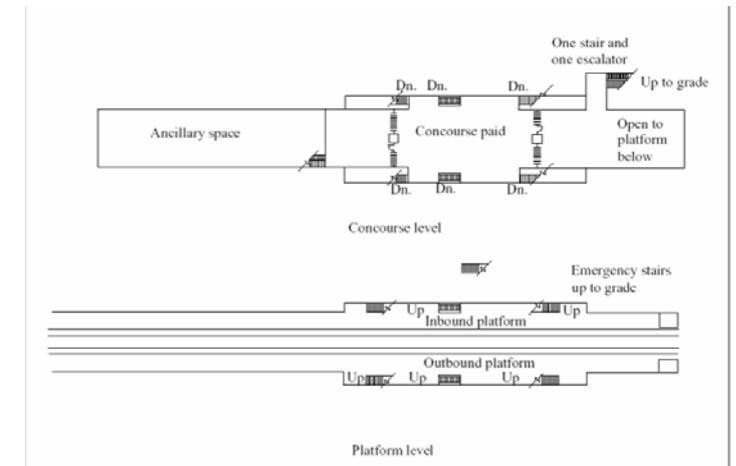
modello di flusso

modelli di movimento

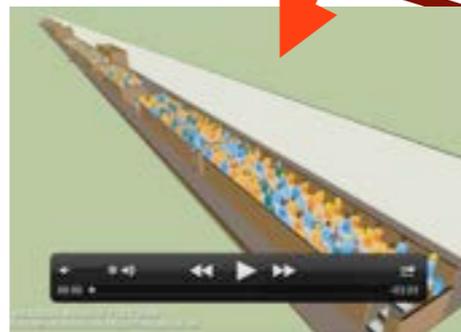
modelli parzialmente comportamentali

modelli comportamentali

complessità



luoghi con problematiche di decisione crescenti

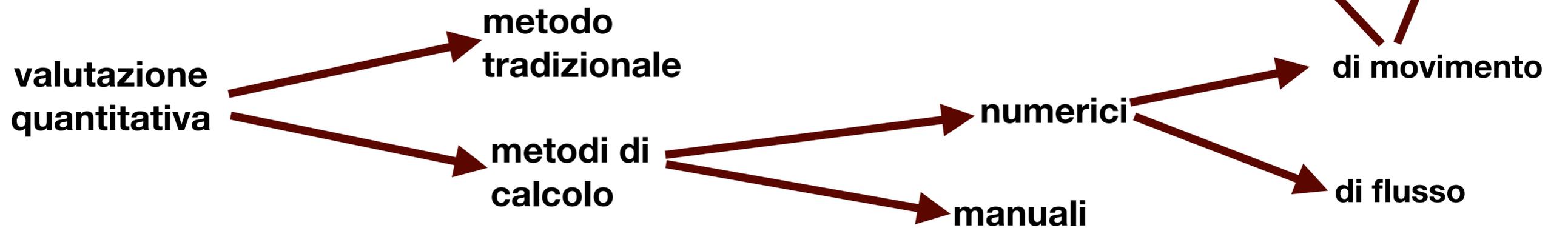


valutare quantitativamente la durata dell'esodo serve sia per la **prevenzione incendi** che per la

**pianificazione dell'emergenza**



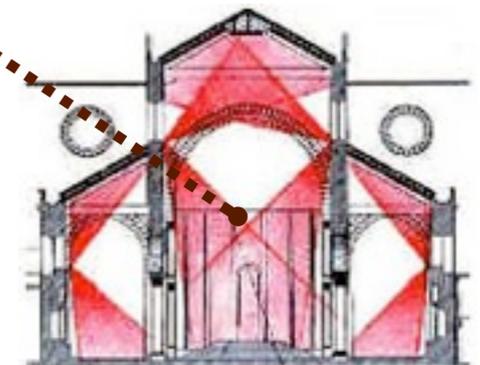
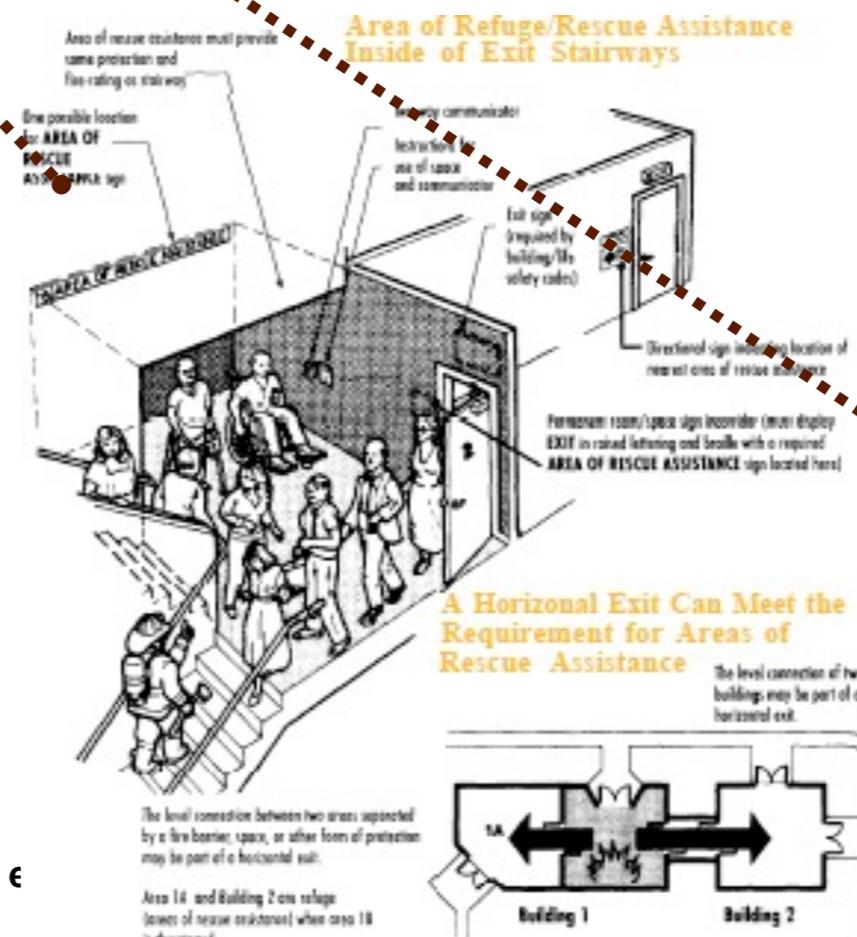
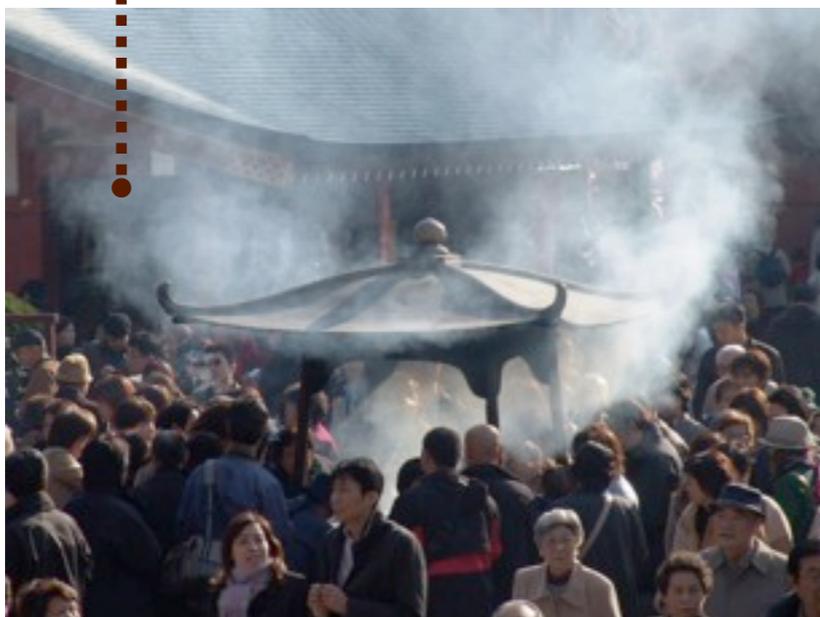
## PREVISIONE DEL COMPORTAMENTO UMANO



# **alcuni aspetti di comportamento umano durante le emergenze**

# per quanto riguarda la velocità:

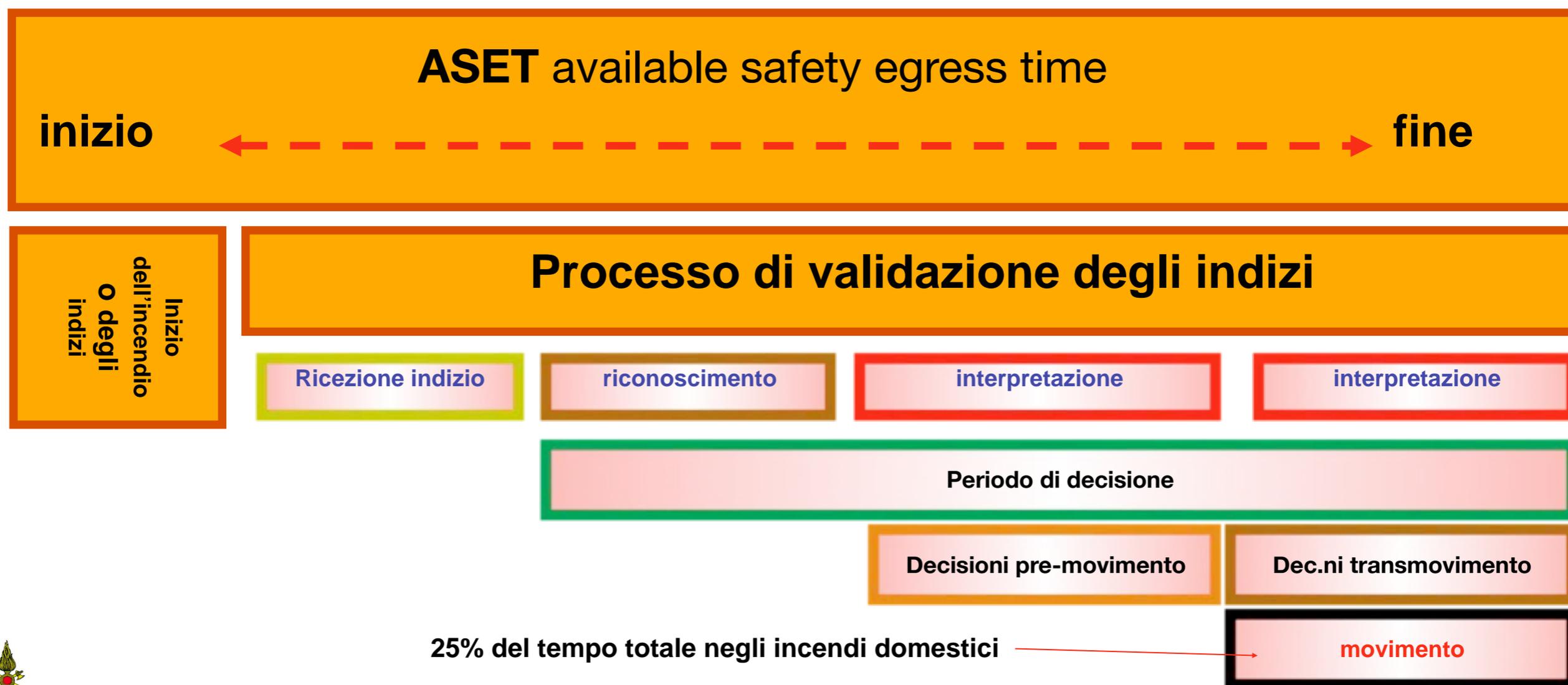
- Mobilità delle persone;
- Affollamento;
- Livelli luce;
- Presenza di fumo;
- Qualità delle superfici (muri e pavimenti);
- Larghezza dei percorsi, gradini ecc.;



La valutazione della sicurezza secondo l'approccio prestazionale deve consentire di verificare il rispetto della disequazione:

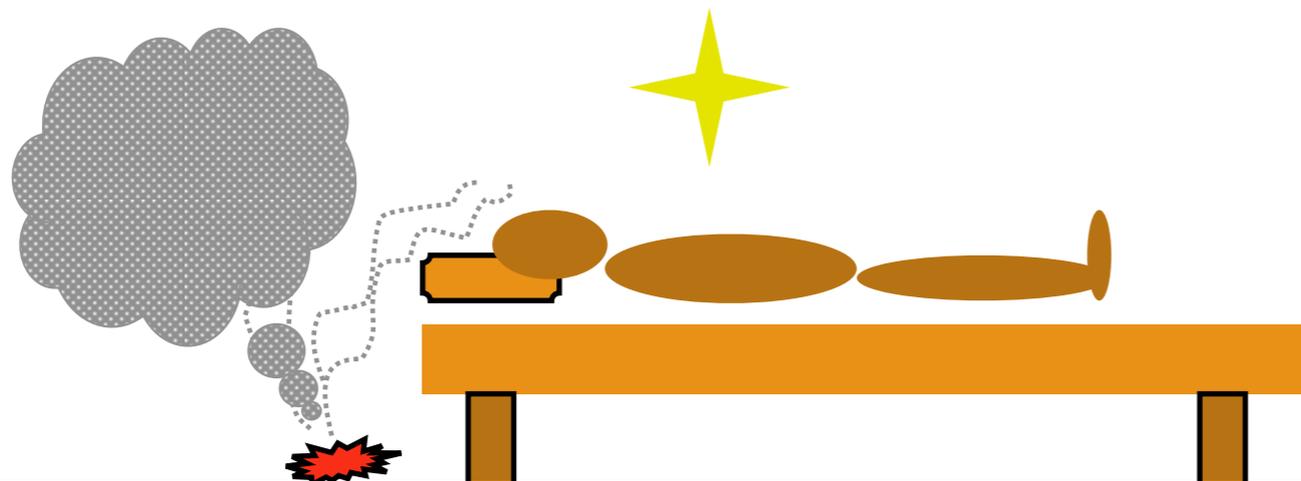
tempo disponibile per l'esodo (ASET) > tempo necessario per l'esodo (RSET)

Gli studi sul comportamento umano servono a definire il valore RSET



# Ricezione degli indizi

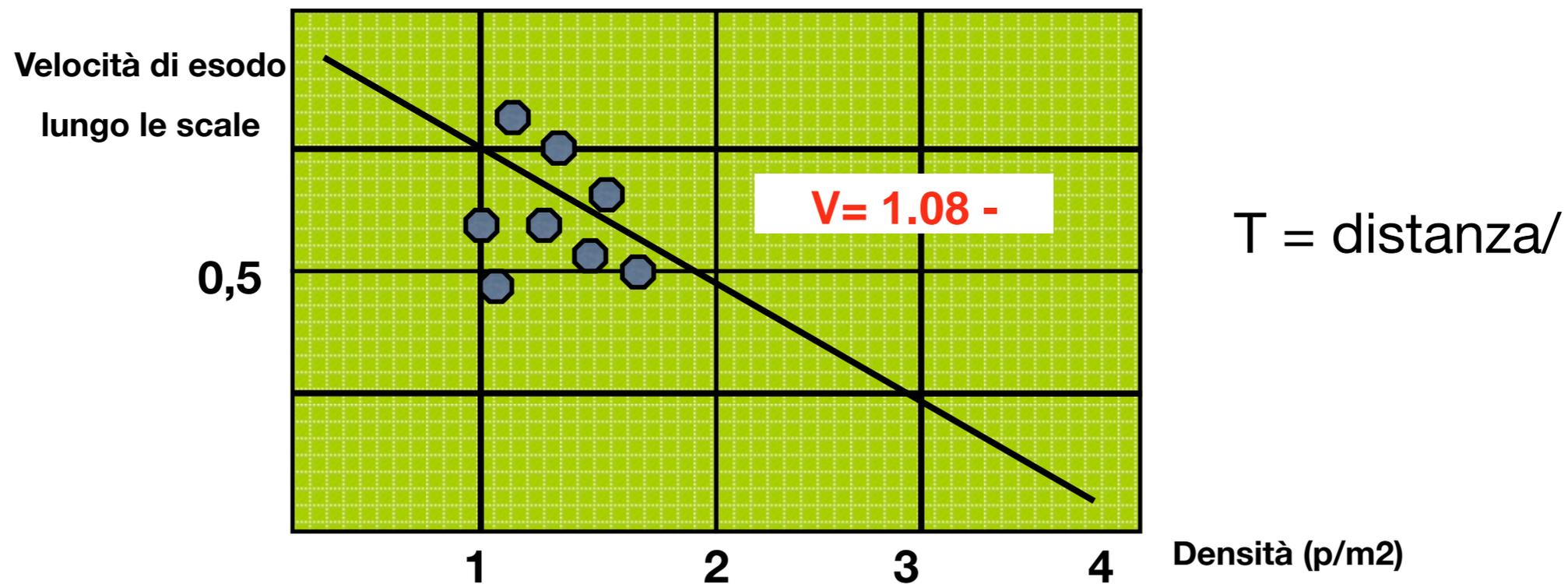
- Sperimentazioni sulla stimolazione di persone che dormono da parte del fumo hanno mostrato che solo il 20% durante il sonno (fase 2) sono svegliati.
- In uno studio (18-26 anni) il 29% dei maschi e l'80% delle femmine sono state svegliate da concentrazioni di 1 ppm (dopo 1 minuto) e 6 ppm (dopo 10 minuti) in tempi tra 45 e 205 sec.
- In uno studio sugli indizi visivi e uditivi (simili a quelli che possono essere emessi da un incendio) 91% e 83% si sono svegliati con rumori di crepitii tra 42 e 48 dBA e l'83% entro 30 sec, con luce da 1 a 5 lux. Il 50 % si è svegliato per la luce ed il 49% entro 30 sec.



Stefano Marsella - CNVVF - esodo in emergenza: metodi di calcolo e di simulazione

# Il movimento nell'esodo

- Tradizionalmente, la capacità di esodo delle uscite è misurata in funzione del numero di unità di larghezza di uscita, anche se gli studi hanno evidenziato che tale capacità è una funzione lineare della luce libera (tolta una parte laterale), con una larghezza risultante inferiore di 30 cm a quella misurata effettivamente.
- L'osservazione che le persone anche nelle scale non si muovono secondo file rigidamente ordinate ha condotto a superare il criterio di moduli di uscita, dato che il moto sembra occupare nel modo più efficiente lo spazio attraverso spostamenti laterali del corpo.



# variabilità dei tempi di risposta

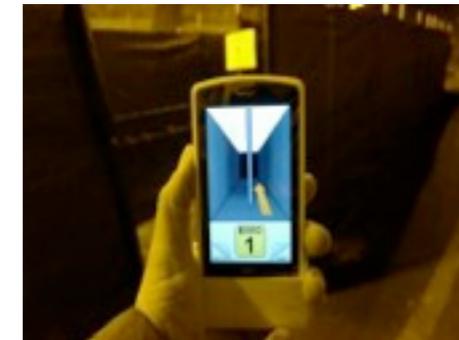
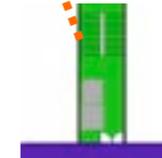
Table A.7: Matrix of ASERI delay times <sup>48</sup>

	Awareness	Response Time	Prepare (Dress)	Information
Watching TV	0s to 30 s	4s to 8 s	5 - 120 s	0s to 30 s
Showering	60s to TS s	4s to 10 s	30s to 300 s	0s to 60 s
Social activity	0s to TS s	4s to 10 s	5s to 240 s	0s to 60 s
Sleeping	10s to TS s	6s to 14 s	20s to 300 s	0s to 60 s
Reading/Writing	0s to TS s	4s to 8 s	5s to 120 s	0s to 45 s
Smoking	0s to 300 s	4s to 8 s	10s to 120 s	0s to 45 s

## problemi relativi all'esodo irrisolti o risolti solo parzialmente

	lingue differenti	anziani	bambini	disabilità sensoriale	disabilità fisica	disabilità mentale
informazioni corrette in condizioni ordinarie	✓	✓	✗	✓	✓	✗
informazioni corrette in condizioni di emergenza	✗	✗	✗	✓	✓	✗
aiutare le persone a raggiungere luoghi sicuri in modo autonomo	✗	✓	✗	✓	✓	✗
aiutare le persone a raggiungere luoghi sicuri	✗	✓	✗	✓	✓	✗

✓ = parzialmente  
✗ = non ancora



# **il problema di prevedere il comportamento umano: il metodo tradizionale**

# ESODO IN EMERGENZA

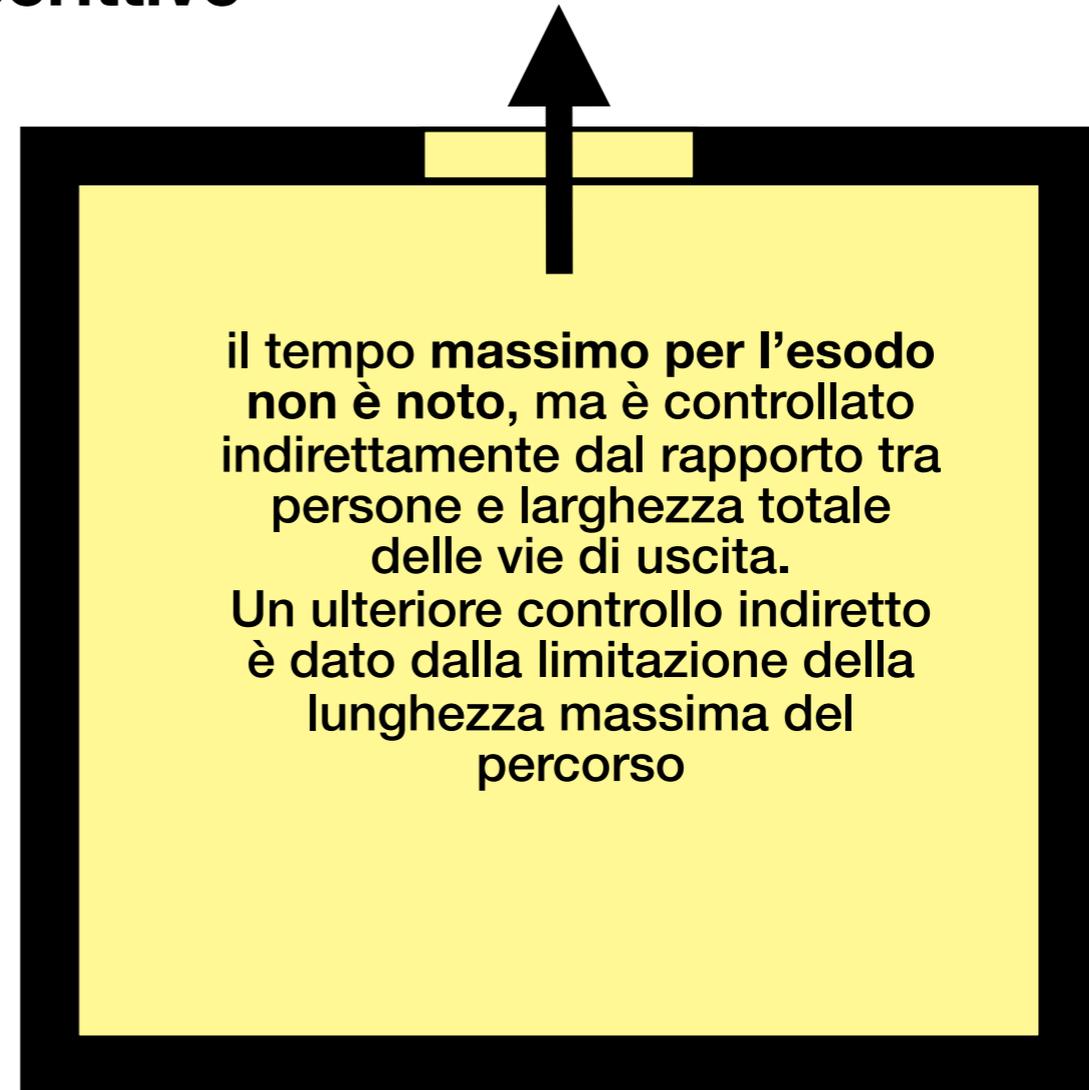
## il calcolo secondo le norme prescrittive

Le norme di prevenzione incendi non prevedono nel calcolo la valutazione esplicita del fattore “tempo di esodo”, ma utilizzano un metodo convenzionale:

- DM 10 marzo 1998
- regole tecniche di prevenzione incendi

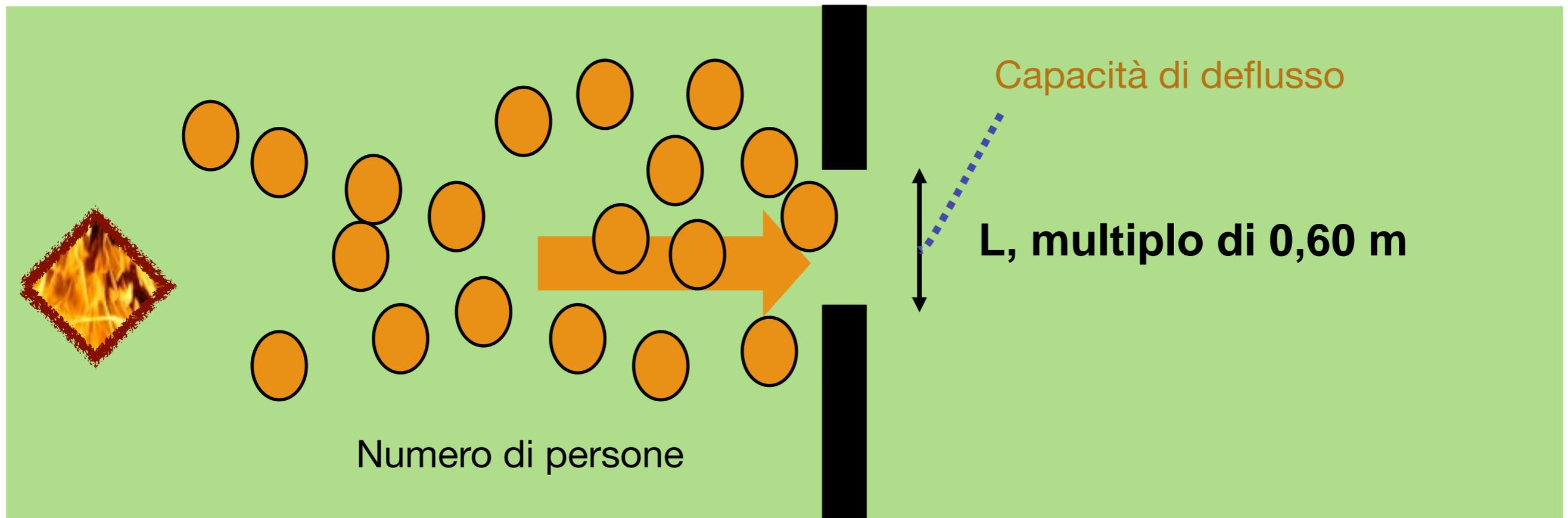
Nel metodo convenzionale, si stabilisce la dimensione ed il numero delle uscite in funzione del numero di persone presenti

A questo tipo di calcolo sono associati i concetti di **capacità di deflusso** e di **modulo di uscita**



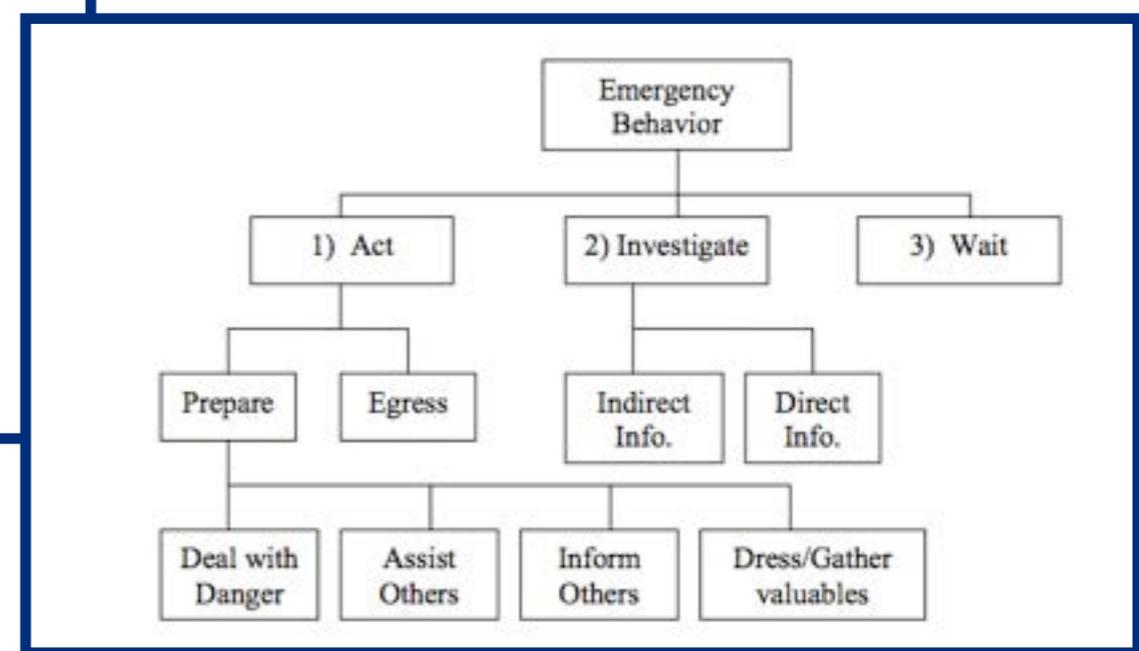
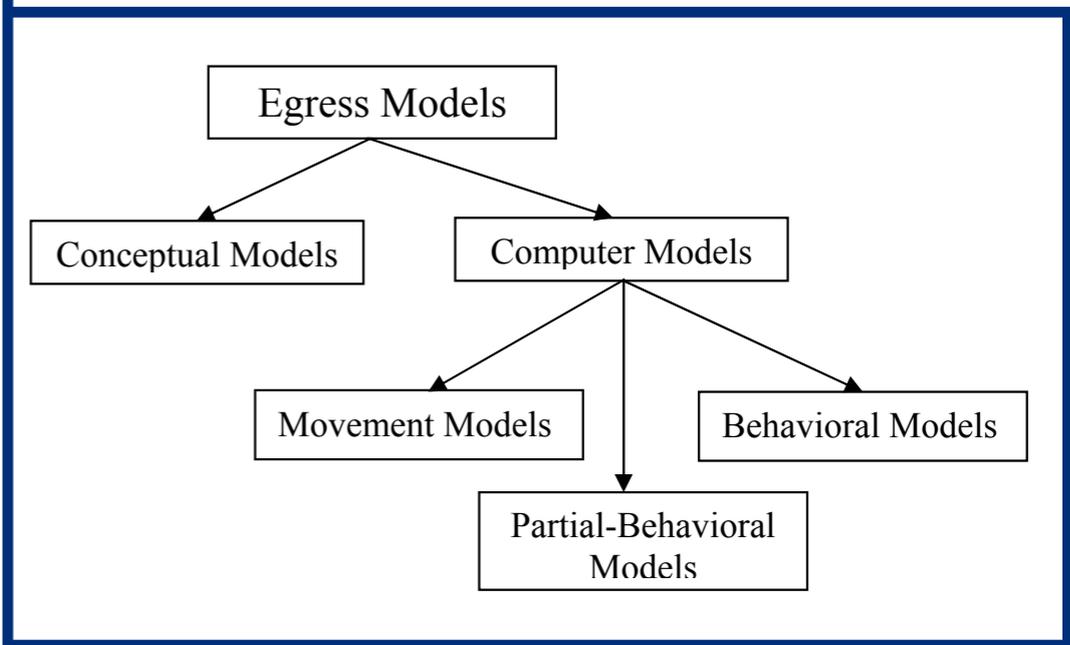
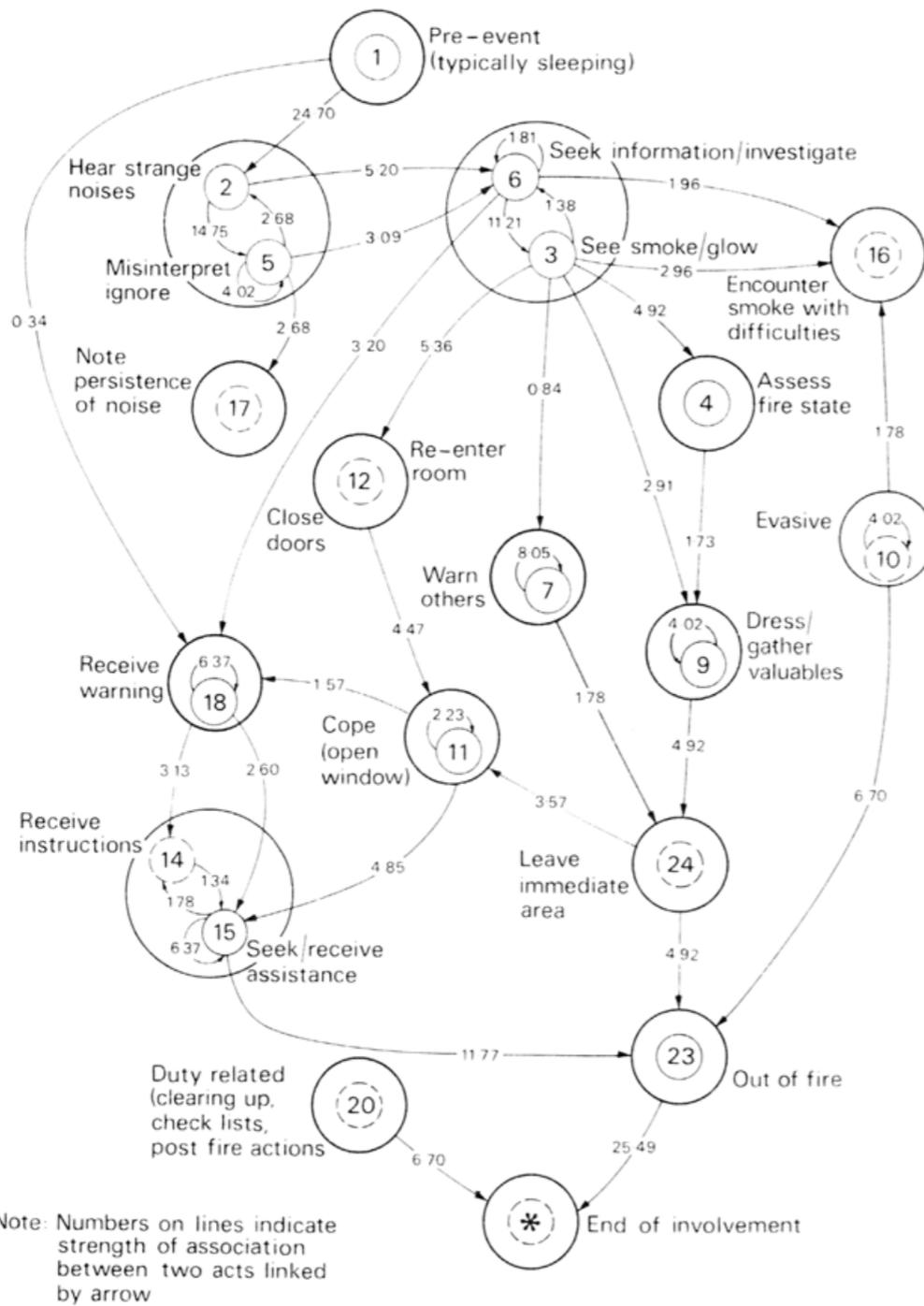
$$\text{Larghezza minima} = \text{Affollamento}/50$$

**Nell'approccio tradizionale alla sicurezza antincendio, la sicurezza dell'esodo è risolta attraverso il calcolo delle larghezze delle vie di esodo in relazione alla capacità di deflusso dei percorsi**



La comprensione dei fenomeni ad esso legati è molto limitata rispetto ad altre aree della prevenzione incendi. La valutazione e la previsione del comportamento umano è uno degli aspetti più complessi della prevenzione incendi.

# Modalità di calcolo alternative al metodo tradizionale



# **alternative al metodo tradizionale: il calcolo manuale**

**In risposta a queste esigenze, esiste un grande numero di valori che possono essere calcolati per prevedere il tempo totale di esodo**

- Tempo necessario per abbandonare l'edificio;
- Tempo necessario per abbandonare il piano;
- Tempo necessario per liberare le scale;
- Tempo per compiere il percorso più lungo;
- Calcolo dell'esposizione degli individui;

$$\mathbf{t = t_1 + t_2 + t_3}$$

In cui

$t_1$  = tempo necessario per la prima persona per raggiungere un elemento di sicurezza

$t_2$  = tempo necessario al gruppo per attraversare un elemento di sicurezza

$t_3$  = tempo necessario per l'ultima persona per lasciare un dispositivo di allarme o sicurezza e raggiungere uno spazio sicuro

# La velocità

Per densità maggiori di 0,55 p/m<sup>2</sup>

$$V = k - akD$$

In cui:

a = costante = 0,266 m<sup>2</sup>/pers

V = velocità (m/sec)

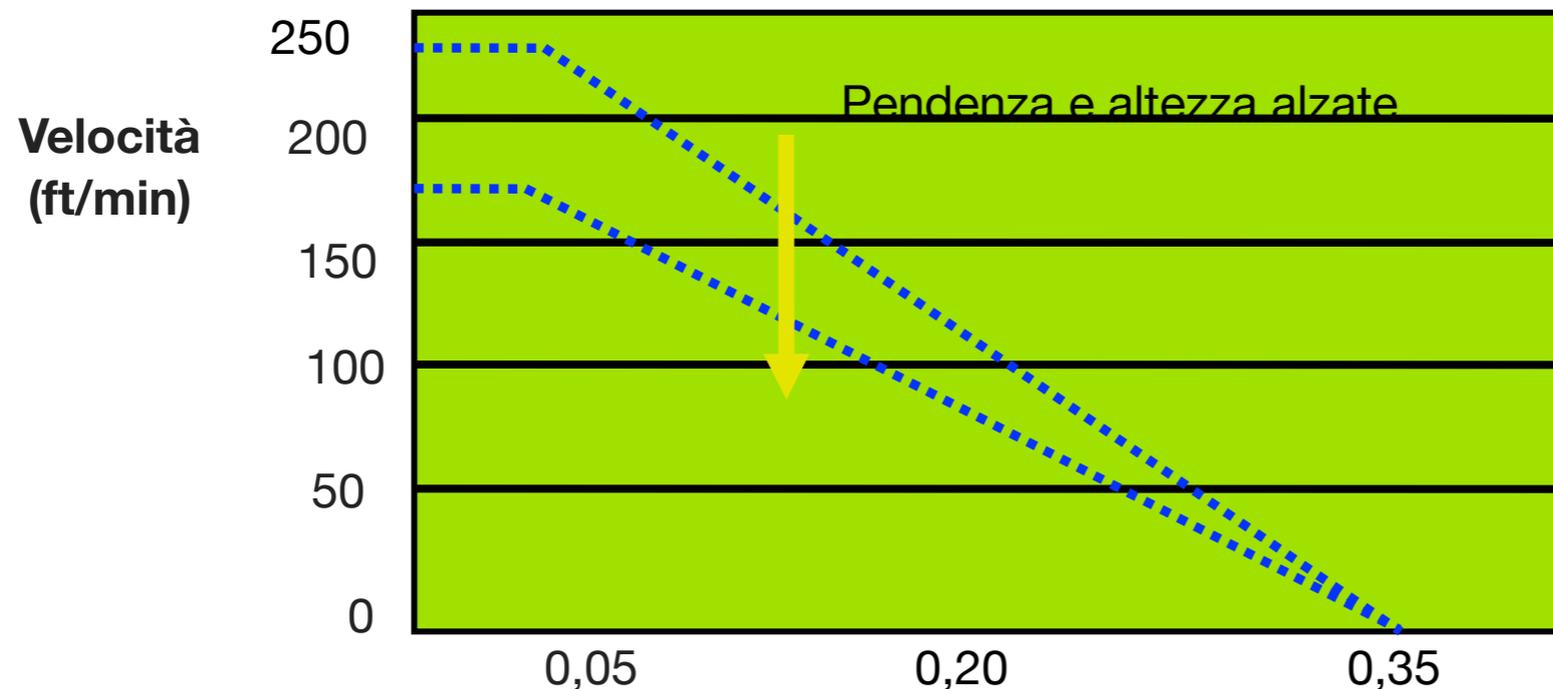
k = fattore di velocità

TABLE 5. Velocity Factor in Equations 2 and 3<sup>4</sup>

Egress Component		k (m/s)	k (ft/min)
Corridor, aisle, ramp, doorway		1.40	275
Stair Riser, mm (in.)	Stair Tread, mm (in.)		
190 (7.5)	254 (10)	1.00	196
172 (7.0)	279 (11)	1.08	212
165 (6.5)	305 (12)	1.16	229
165 (6.5)	330 (13)	1.23	242

Per densità minori di 0,55 p/m<sup>2</sup> ci sono troppo poche persone per ostacolare il flusso e si utilizza per corridoi e scale la relazione:

$$V = 0,85k$$



$$ft/min = 0,005 m/s$$

$$1/ft^2 = 10,8/m^2$$

densità  
(persone/sq ft)

## Il Flusso specifico

Per rendere omogenei i dati che rappresentano l'affollamento e la larghezza delle vie di esodo si utilizza il flusso specifico, che rappresenta il numero di persone che oltrepassano un punto della via di esodo per unità di tempo e di larghezza effettiva. È l'analogo del flusso specifico in idraulica

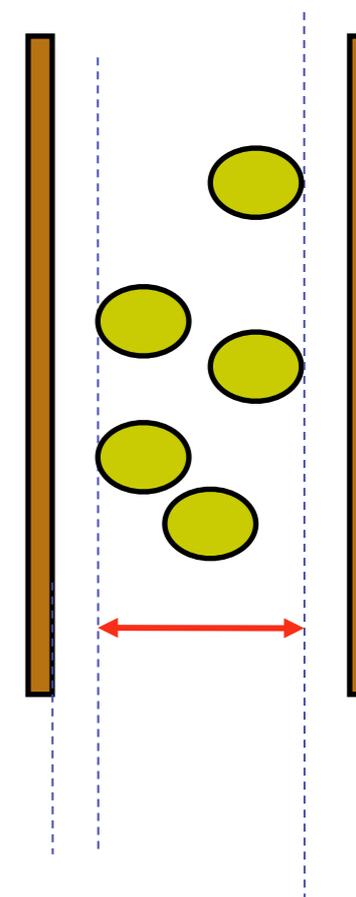
$$F_s = Dv$$

Sostituendo i termini della relazione precedente:

- Per densità maggiori di  $0,55 \text{ p/m}^2$  :  $F_s = Dv = (1-aD)kD$
- Per densità minori di  $0,55 \text{ p/m}^2$  :  $F_s = 0,85 kD$

La larghezza è intesa come larghezza effettiva, e cioè quella reale diminuita di un valore variabile  $B$ , *boundary layer*

componente	B (mm)
Sedie poltrone teatri	0
corrimano	89
ostacoli	100
Scale, porte	150
Corridoi, muri per rampe	200

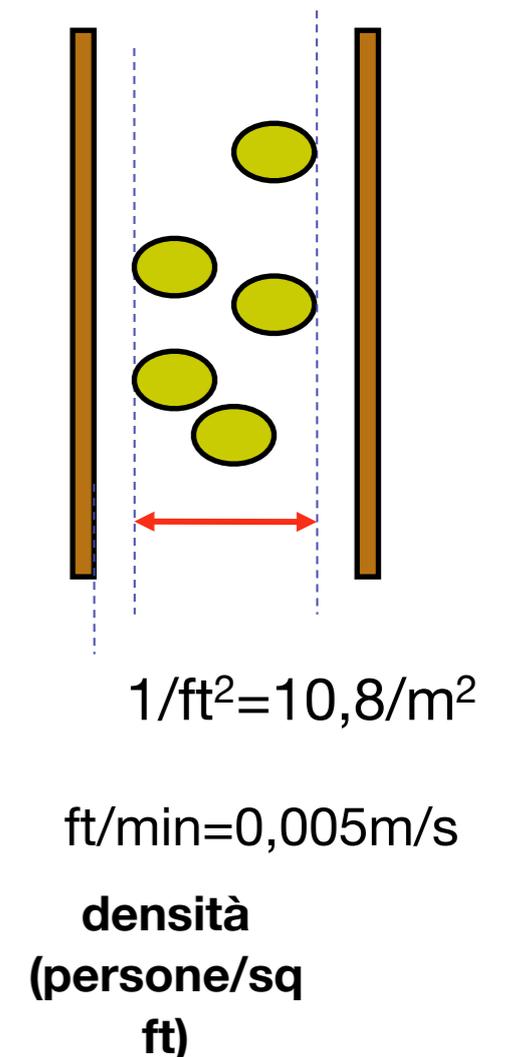
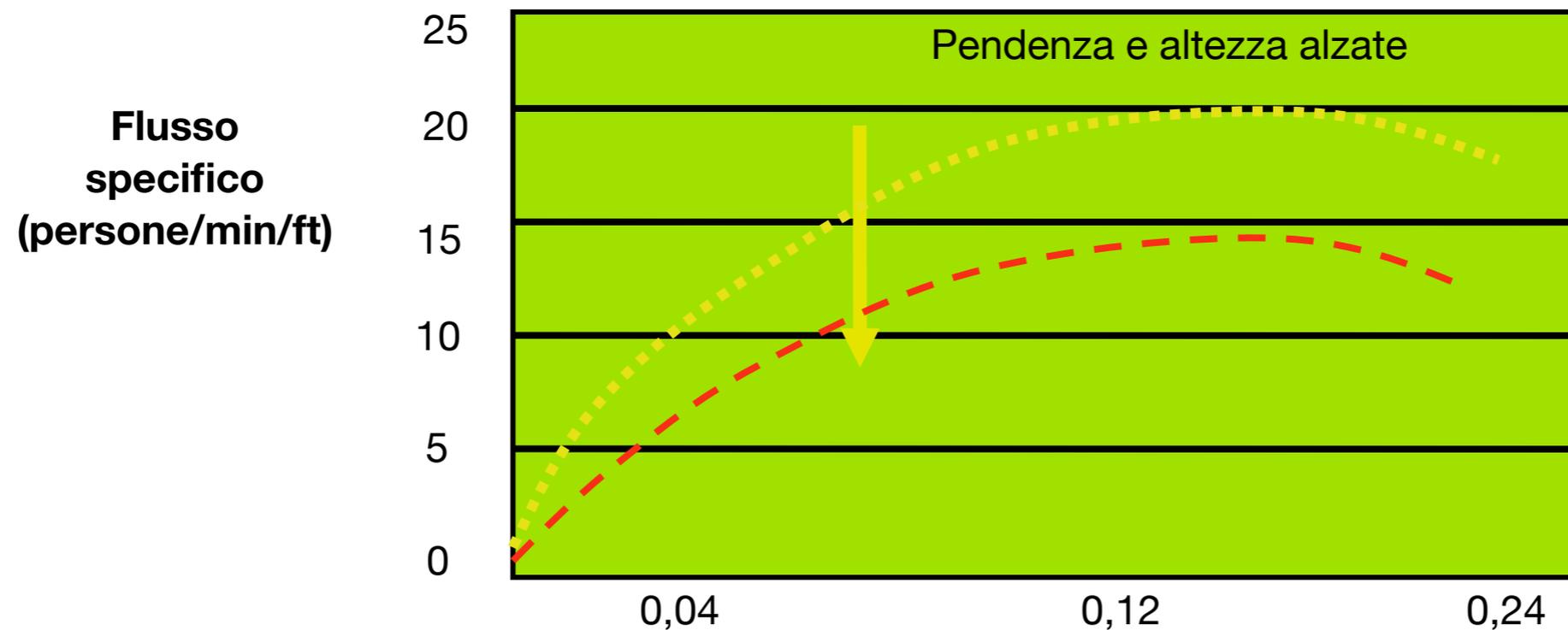


## Il Flusso specifico

Considerando il fatto che il flusso specifico è una funzione quadratica della larghezza  $D$  della via di esodo, il massimo flusso specifico si raggiunge quando la densità è pari a:

$$D_{\max} = 1/2a$$

Poiché  $a$  è indipendente dal tipo di componente della via di esodo, il flusso specifico è massimizzato alla stessa densità per tutti i componenti delle vie di esodo.

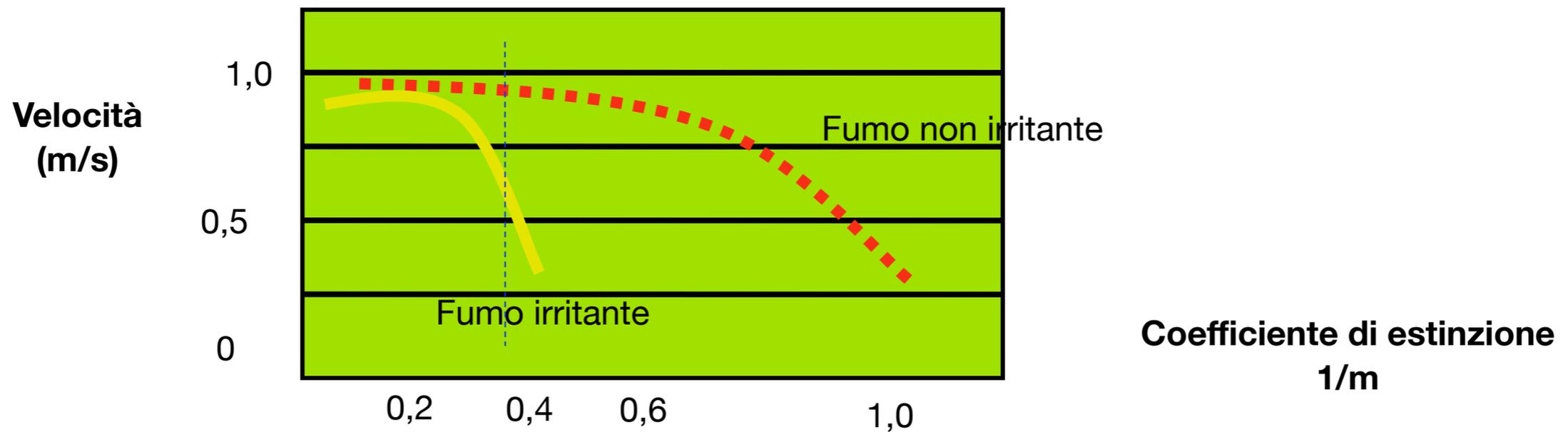


# Effetto del fumo sulla velocità di esodo

## La presenza di fumo nelle vie di esodo:

- diminuisce la probabilità che le persone si spostino all'interno dell'ambiente e continuino l'esodo;
- Riduce la velocità di esodo

**In incendi reali, le persone hanno percorso nel fumo denso non più di 10 m**



## Il rischio tossicità

Negli incendi reali le persone sono esposte all'effetto di più gas contemporaneamente. Il modello più diffuso che simula tale effetto postula che l'effetto osservato è uguale alla somma degli effetti di ciascuna parte dei singoli componenti. Per esempio, in una miscela CO - HCN l'effetto mortale si raggiunge per il raggiungimento del 50% di dose dei due gas.

Questo modello è chiamato **FED**, *fractional effective dose*, e si applica ai gas che mostrano un effetto dipendente dalla dose. La sua formulazione analitica è:

$$\int C(t) dt$$

$$\text{Dose} = \frac{\int C(t) dt}{\text{dose letale}} \quad \text{FED} = \sum (\text{FED})_{\text{O}_2} + (\text{FED})_{\text{O}_2} + \dots$$

dose letale

## Gli effetti irritanti

Basandosi sulla considerazione che gli effetti sui tessuti dei polmoni sono danneggiati cumulativamente dagli agenti irritanti, si può stabilire il valore che rappresenta l'effetto di tutte le specie:

**Fractional irritant Concentration (FIC) =**

$$\mathbf{FIC_{HCl} + FIC_{HBr} + FIC_{HF} + FIC_{SO_2} + FIC_{NO_2}}$$

Anche questo modello riguarda, quindi, la somma dei rapporti tra la concentrazione effettiva e quella di soglia dei singoli componenti

gas	concentrazione
HCl	200 ppm
HBr	200 ppm
HF	120 ppm
SO <sub>2</sub>	30 ppm
NO <sub>2</sub>	80 ppm

# Il calcolo delle vie di esodo

Per la determinazione della larghezza effettiva si deve considerare una parte non utilizzabile della luce (*boundary layer*)

Component	Boundary Layer mm (Inch)
Theater chairs, stadium benches	0 (0)
Railings, handrails*	89 (3.5)
Obstacles	100 (4)
Stairways, doors † arcways	150 (6)
Corridors and ramp walls	200 (8)

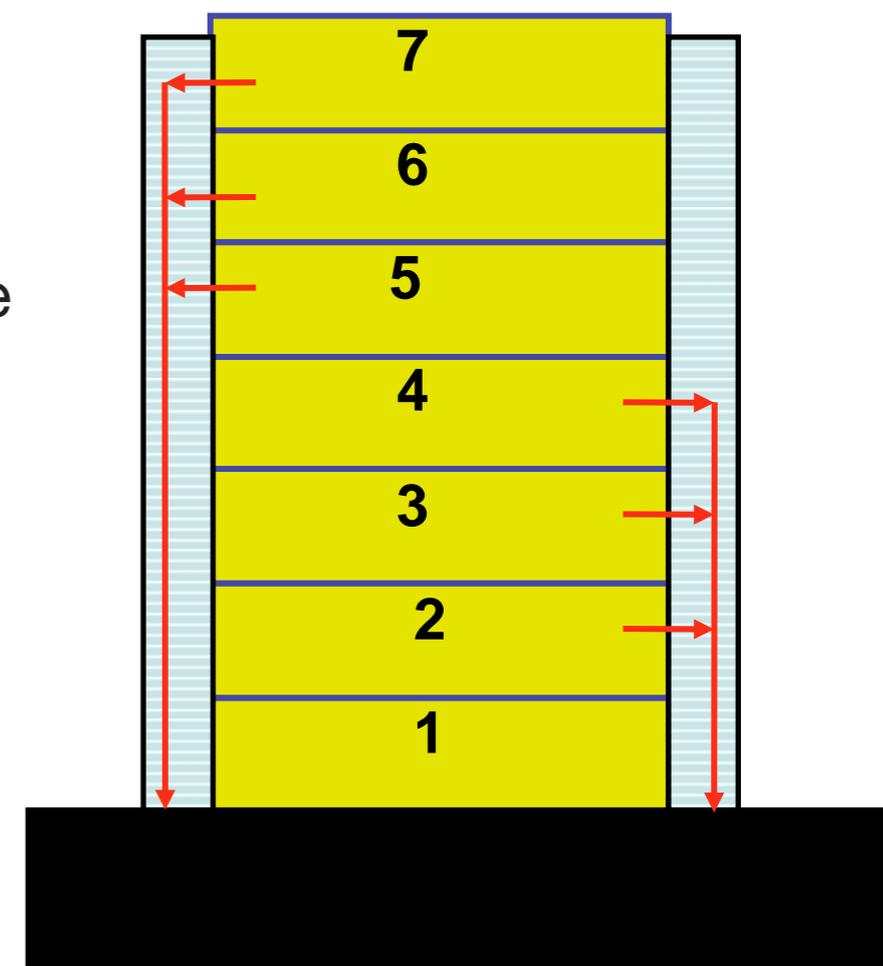
\* Where handrails are present, use the value that results in the lesser effective width.  
 † There are no data to substantiate the effective width of doors; the value is an extrapolation from the value used for stairs and is believed to result in estimates that do not underestimate the movement time through doors.

- 200 persone per piano
- porte 0,90 m
- scale 1,12
- gradini 17 - 28 cm
- interpiano 3,6 m
- sporgenza corrimano 6,4 cm
- pianerottolo 1,22 x 2,44 m

Si ipotizza che metà delle persone si servano di una scala. Nell'ipotesi più sfavorevole, le 600 persone dei tre piani più alti utilizzano la scala di sinistra.

## Determinazione dell'elemento che controlla l'esodo

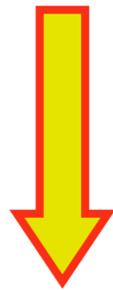
componente	Larghezza effettiva (m)
Porta verso la scala	0,51
scala	0,81
pianerottolo	0,81
Porta dalla scala	0,51



SFPE Task Group on  
*Human behavior*

Stefano Marsella - CNVVF - esodo in emergenza: metodi di calcolo e di simulazione

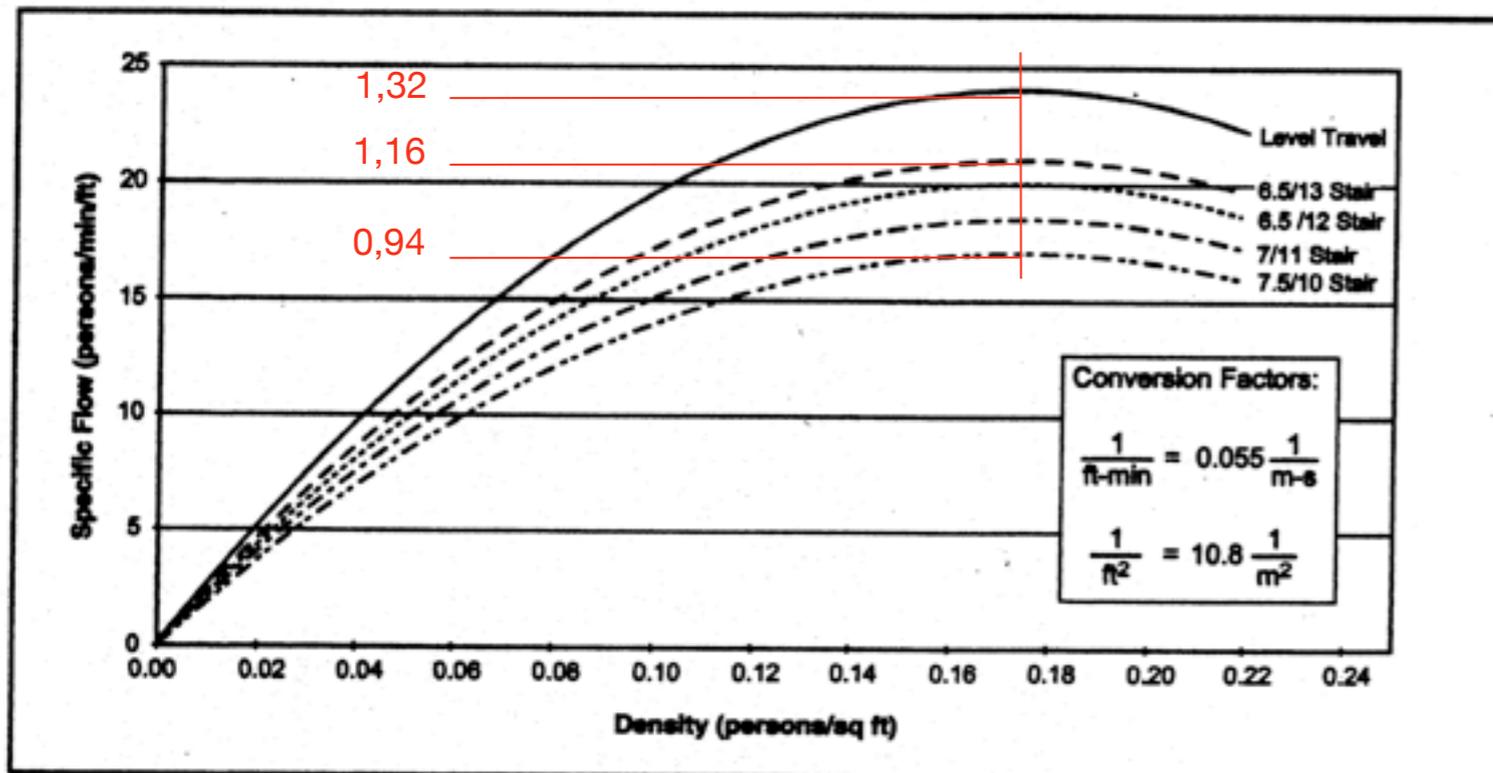
Per la determinazione del flusso specifico, si può utilizzare la figura 6, che evidenzia il Flusso specifico massimo per i diversi elementi



**TABLE 8. Maximum Specific Flows**

Egress Component		$F_s$ pers/sec-m of Effective Width (pers/min-ft of Effective Width)
Corridor, aisle, ramp, doorway		1.32 (24.0)
Stair Riser, mm (in.)	Stair Tread, mm (in.)	
190 (7.5)	254 (10)	0.94 (17.1)
272 (7.0)	279 (11)	1.01 (18.5)
165 (6.5)	305 (12)	1.09 (20.0)
165 (6.5)	330 (13)	1.16 (21.2)

Tabella dei flussi specifici in relazione al componente



componente	Larghezza effettiva (m)	Flusso specifico (pers/sec/m)
Porta verso la scala	0,61	1,31
scala	0,81	1,01
pianerottolo	0,81	1,31
<b>Porta dalla scala</b>	<b>0,61</b>	<b>1,31</b>

**FIGURE 8. Specific Flow as a Function of Density**

**TABLE 5. Velocity Factor in Equations 2 and 3<sup>4</sup>**

Egress Component		k (m/s)	k (ft/min)
Corridor, aisle, ramp, doorway		1.40	275
Stair Riser, mm (in.)	Stair Tread, mm (in.)		
190 (7.5)	254 (10)	1.00	196
172 (7.0)	279 (11)	1.08	212
165 (6.5)	305 (12)	1.16	229
165 (6.5)	330 (13)	1.23	242

Il tempo richiesto per l'esodo attraverso l'elemento che controlla il flusso è pari a:

$$T = P / F_s W_e = 600 / 1,31 \times 0,61 = 750 \text{ sec} \approx \mathbf{12,5 \text{ min}}$$



componente	W <sub>e</sub> Larghezza effettiva (m)	Flusso specifico (pers/sec/m)	Flusso (persone/min)
Porta verso la scala	0,61	1,31	0,799
scala	0,81	1,01	0,82
pianerottolo	0,81	1,31	1,1
Porta dalla scala	0,61	1,31	0,799

L'elemento che controlla l'esodo è la porta di uscita dalla scala. Infatti, dalla porta di ogni piano transitano 200 persone, mentre in quella in basso ne transitano 600

Il tempo richiesto perché la prima persona percorra tutte le scale è pari alla distanza percorsa per le rampe (6,9 m in diagonale per ogni rampa) più quella dei pianerottoli.

La persona si muoverà con una velocità:

**0,54 m/s** che risulta da una densità di 1,88 p/m<sup>2</sup> ( $v = k - akD$ ).

Il percorso sarà quindi di  $3 \times (6,9 \text{ m} + 2,4 \text{ m}) = 43 \text{ m}$

Il tempo necessario sarà quindi:  $43/0,54 = 80 \text{ sec} \approx 1,8 \text{ min}$

Il tempo complessivo di esodo, quindi, è di circa **12,5 min + 1,8 min** dato che, dopo che la prima persona del quarto piano raggiunge la porta in fondo alle scale, inizierà a formarsi la fila di coloro che la seguono.

**1,8 min**

**12,5 min**

Tempo per percorrere le scale  
Da parte della prima persona

+

Tempo necessario a tutte le  
Persone per uscire dalla porta

# **alternative al calcolo tradizionale: i modelli di calcolo numerico**

## indizi e consapevolezza dell'incendio

\* da Handbook Fire safety Engineering - Bryan - Behavioral Response to Fire and Smoke - Tabella riferita a dati di incendi domestici

indizio	%
odore del fumo	26
segnalazione da altre persone	21
percezione del fumo	52
vista del fuoco	46
rumore provocato da altri	18
segnalazione da familiari	13
percezione del calore	4



## processo di percezione dell'incendio

\* da Handbook Fire safety Engineering - Bryan - Behavioral Response to Fire and Smoke - Tabella riferita a dati di incendi domestici

**Riconoscimento** - passaggio dalla percezione di indizi vaghi alla indicazione che è in corso un incendio

**Validazione** - tentativo di passare dalla percezione iniziale alla sua conferma

**Definizione** - mettere in relazione la percezione con i dati acquisiti (dimensione, posizione dell'incendio ecc.)

**Valutazione** - attività cognitive svolte per definire la risposta dell'individuo alla minaccia

**Impegno** - meccanismi utilizzati per avviare la risposta comportamentale necessaria per mettere in atto il comportamento ipotizzato

**Ri-valutazione** - meccanismi utilizzati in caso di insuccesso dei comportamenti precedentemente definiti

# Il Modello di flusso

La capacità di esodo dei componenti approssima una funzione lineare della larghezza effettiva della porta.

Il tempo di movimento è determinato dalla distanza da percorrere e dalla velocità, secondo la relazione tempo (s) = distanza (m) / velocità (m/s).

Sia la distanza che la velocità non sono determinati a priori. Sulla prima, infatti, è determinante la scelta della persona, mentre la seconda è funzione della densità di persone e delle loro caratteristiche. Influenzano la velocità, inoltre, il fumo e la visibilità dei percorsi, la larghezza e la pendenza degli elementi, il tipo di superficie di muri e pavimenti.

Nel modello di flusso le informazioni di base devono disporre dei dati su:

- velocità (su corridoi, rampe, scale – per queste ultime si calcola la velocità diagonale tra le testate delle rampe);
- flusso: il numero di persone che passa attraverso una particolare sezione del sistema di esodo per unità di tempo (persone/sec che oltrepassano una porta, una linea immaginaria in un corridoio ecc.);
- flusso specifico: il flusso per unità di superficie del componente di esodo (persone/sec-m di larghezza di un determinato elemento).

Componente di esodo		k (m/s)
Corridoi, rampe, passaggi, porte		1,40
Alzata (mm)	Pedata (mm)	
190	254	1,00
172	279	1,08
165	305	1,16
165	330	1,23

*Velocità media per persone con difficoltà motorie (tratta da The SFPE Task Group on human behaviour in fire – Society of Fire Protection Engineers – 2003)*

individuo	Larghezza al torace (m)	Profondità del corpo (m)	Velocità normale (m/s)
Media	0,50	0,30	1,30
Maschio adulto	0,54	0,32	1,35
Femmina adulta	0,48	0,28	1,15
Bambino	0,42	0,24	0,90
Anziano	0,50	0,30	0,80

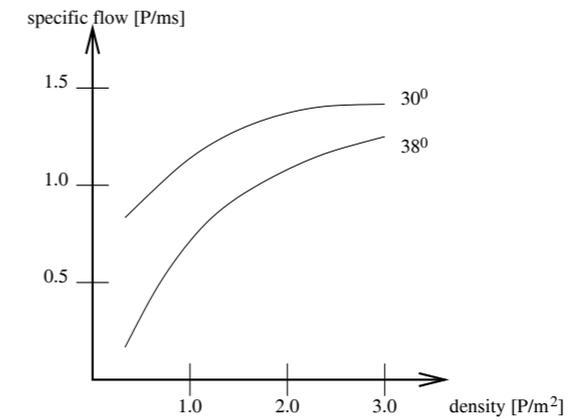
*velocità e dimensioni delle persone (tratta da Evaluation of fire safety, D Rasbah)*

caratteristiche	Velocità in piano	Scale in discesa	Scale in salita
Sedia a ruote elettrica	0,89		
Sedia a ruote manuale	0,69		
Stampelle	0,94	0,22	0,22
Bastone	0,81	0,32	0,34
Bastone o appoggio rollator	0,51 0,61		
Nessun aiuto	0,93		0,41
Senza disabilità	1,24	0,70	0,70

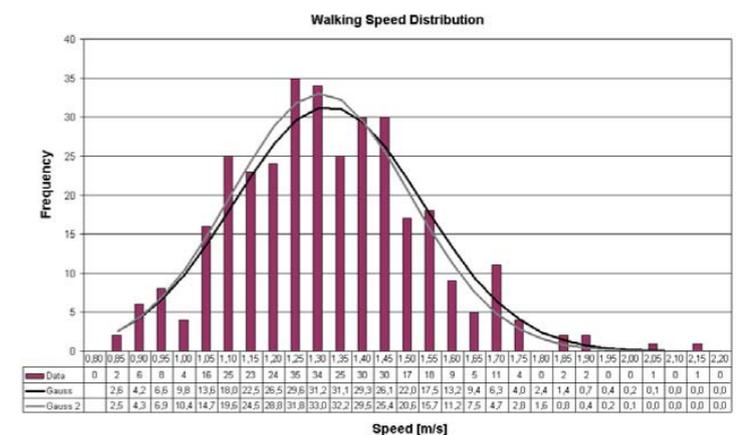
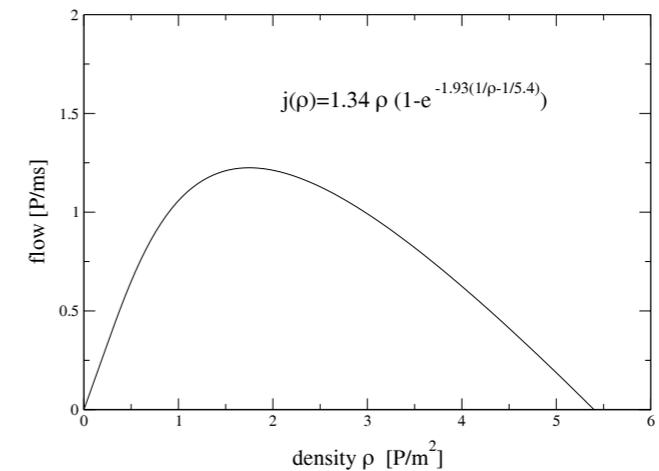
*Velocità media per persone con difficoltà motorie (tratta da The SFPE Task Group on human behaviour in fire – Society of Fire Protection Engineers – 2003)*

# I modelli di movimento

- Si concentrano sullo spostamento delle persone da un punto ad un altro dell'edificio. La legge che governa il movimento nella maggior parte dei modelli è quella della correlazione tra velocità e densità.
- In alcuni casi i modelli prevedono la possibilità di ottimizzare i risultati dell'esodo, e cioè considerano la possibilità che non tutte le persone si spostano lungo il percorso più breve ma che si distribuiscono in modo da realizzare la densità che produce il tempo di esodo più breve. In assenza di questa tecnica, i modelli di movimento seguono il criterio di spostare le persone con la minima distanza possibile.
- La maggior parte dei modelli di movimento utilizza una griglia grossolana, costituita da nodi (i locali) ed archi (la distanza tra i punti mediani dei nodi).
- La rappresentazione dell'esodo considera le persone come un gruppo omogeneo con le stesse capacità di movimento e che, quindi, si spostano fino all'uscita nel modo più rapido.
- Quindi, non si considerano le differenze dovute al comportamento delle persone.



Empirical flow-density-relation



## Modelli parzialmente comportamentali

I modelli parzialmente comportamentali calcolano in primo luogo lo spostamento delle persone, anche se **prevedono l'influenza del comportamento in un modo semplificato**, simulando il tempo di pre-movimento (distribuito tra le persone presenti), le difficoltà motorie, il sorpasso e l'effetto di fumo e calore.

La maggior parte di questi modelli ricorre alla legge che della correlazione tra velocità e densità per calcolare il movimento delle persone.

Rispetto ai modelli comportamentali quelli parzialmente comportamentali introducono le differenze tra le persone in termini fisici (dimensioni del corpo, ritardo nel movimento ecc.) piuttosto che sotto il profilo cognitivo.

## Modelli comportamentali

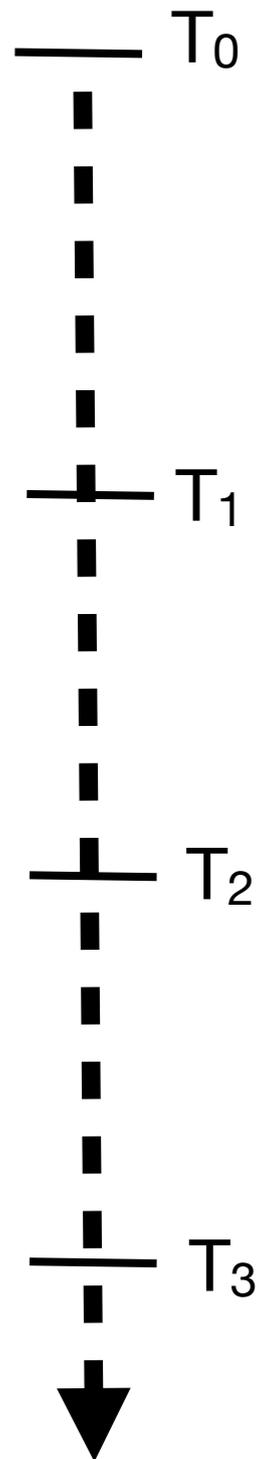
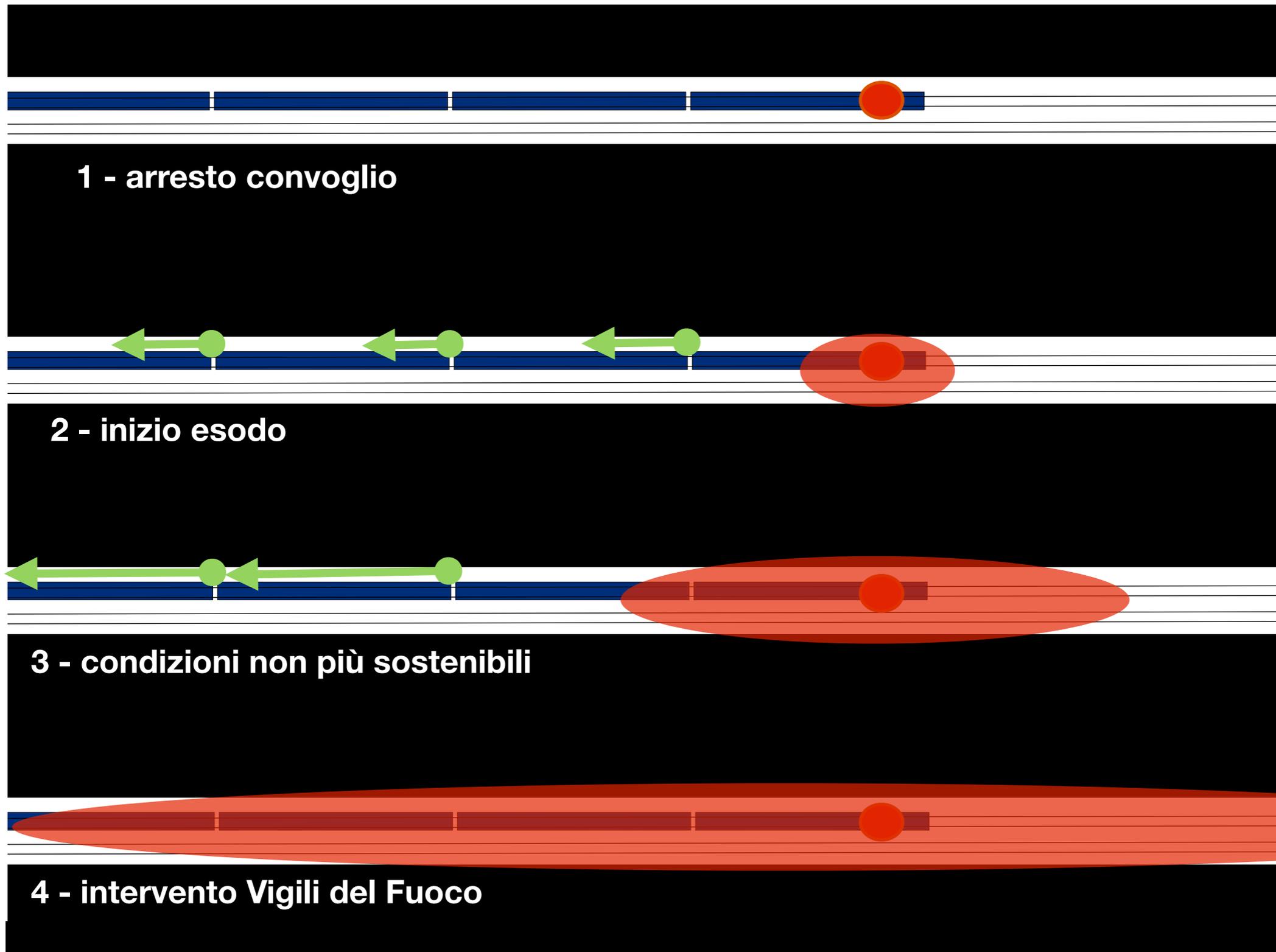
I modelli comportamentali prendono in considerazione **le decisioni ed il comportamento delle singole persone**, oltre al movimento verso l'uscita.

Le regole di comportamento in base alle quali le persone si muovono (ad esempio, se una persona nota del fumo nel vano scala non vi entrerà e cercherà un'altra uscita) sono definite in ciascun modello.

Quasi tutti i modelli comportamentali hanno la possibilità di assegnare probabilità alle attività svolta da ogni persona. Queste sono associate sia alla verosimiglianza di effettuazione che alla distribuzione dei tempi per ogni azione secondo la probabilità di accadimento.

# **esodo in emergenza da carrozze ferroviarie**

# pianificazione dell'emergenza nei tunnel ferroviari - simulazione dell'incendio - simulazione dell'esodo



# Simulazione dell'esodo da carrozze ferroviarie

per realizzare modelli di simulazione dell'esodo da carrozze ferroviarie validati, si devono acquisire:

## 1. dati sul materiale

- 1.norme di progettazione
- 2.norme di gestione
- 3.norme di certificazione
- 4.gestione delle emergenze
- 5.gestione delle attività ordinarie

## 2.dati storici

- 1.esame degli incidenti avvenuti
- 2.analisi dei temi comuni che possono influenzare il comportamento (passaggio tra carrozze, possibilità di uscita dai finestrini, efficienza dell'illuminazione di emergenza nelle diverse condizioni, propagazione dell'incendio)

## 3.dati sperimentali

- 1.riproduzione delle condizioni reali

indicazioni qualitative sul comportamento umano

indicazioni quantitative sul comportamento umano

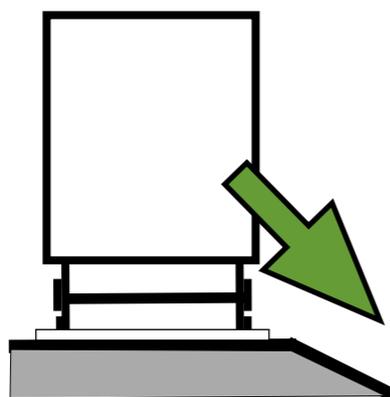
- FSE**
- scenari relativi all'incendio
  - carrozze a uno o due piani
  - esodo su marciapiede alto o basso
  - carrozze inclinate o ribaltate
  - (larghezza corridoi, altezza gradini ecc.)

# La valutazione dell'esodo da carrozze ferroviarie: risultato di sperimentazione su carrozze USA (non applicabile in Europa)

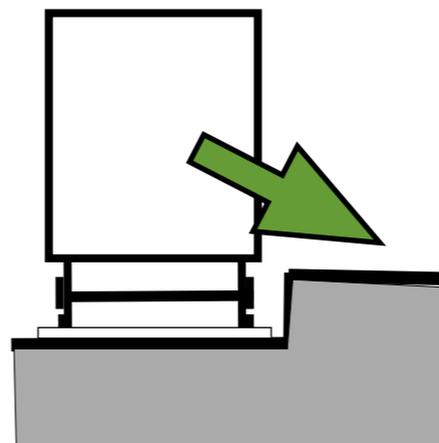


**risultati della simulazione** (84 persone per carrozza, 250 simulazioni, cambio posizione ogni 10 simulazioni)

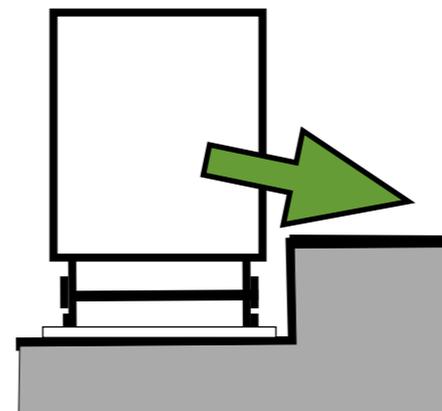
20 persone/minuto



40 persone/minuto



52 persone/minuto



**Stefano Marsella - CNVVF - esodo in emergenza: metodi di calcolo e di simulazione**

**fine**