

An agent-based simulation model for earthquake pedestrians' evacuation in historical urban fabric

Gabriele Bernardini^{a*}

^a Dept. of Construction, Civil Engineering and Architecture, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche 60131, Ancona, Italia

Highlights

We define a behavioral model concerning pedestrians' earthquake evacuation.
We define the pedestrians' motion law.
We define rules for the modification of the scenario because of the seism.
We develop the model on agent-based architecture and validate it.
The model is proposed for earthquake evacuations predictions at urban scale

Abstract

The majority of Italian historical urban fabric is placed in earthquake prone areas. This study introduces the analysis of human behaviors in the earthquake risk assessment at urban scale: man-environment interactions in such conditions highly influence the inhabitants safety, especially in historical city centers. On these bases, this study proposes an agent-based earthquake evacuation simulator. Validation tests are performed on an Italian historical centre, demonstrating the validity of the model. Analysis on "human" behaviors should be combined to traditional evaluation in order to define integrated "risk maps" and "interventions maps".

Keywords

Evacuation, Exposure Parameter Investigation, Evacuation Simulator, Earthquake Risk Assessment in Historical Buildings

1. INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE

La maggior dei centri storici italiani è collocata in zone a rischio sismico: per valutarne il livello di rischiosità R [1] si usano i tre parametri di pericolosità H [2], vulnerabilità V [3] ed esposizione E [4]. I fattori devono essere sinergicamente indagati vista la complessità dell'organismo urbano, formato da oggetti, reti, funzioni, attività, valenze ma anche e soprattutto persone. Mentre H e V sono largamente indagati, E è definito principalmente tramite il solo numero di persone esposte e definizioni di valore storico-artistico dei beni: si trascurano totalmente aspetti di comportamento umano durante l'emergenza ed'evacuazione. Al contrario, il comportamento umano è uno dei cardini per la definizione dell'effettivo livello di sicurezza dello spazio architettonico, come evidenziato anche in altre emergenze [5]. Comprendere e simulare il comportamento umano nei suoi aspetti dinamici in situazioni d'emergenza [6–8] diviene lo strumento essenziale per definire effettivamente la rischiosità di un centro urbano, definire "mappe di rischio" combinando la previsione comportamentale con le tradizionali valutazioni legate ai suddetti parametri.

Questo lavoro parte da questo punto di vista per definire EPES (Earthquake Pedestrians' Evacuation Simulator), simulatore dell'evacuazione post-sisma in ambito urbano basato sulle tecniche multi agente (ABM) [9] che coniuga aspetti comportamentali in evacuazione post-sisma [6,10] con strumenti di

* Corresponding author. Tel.: +39-071-220-4246; fax: +39-071-220-4582; e-mail: g.bernardini@univpm.it

previsione del danno in seguito all'evento [3,11,12]. L'analisi del comportamento in evacuazione post-sisma è attualmente limitata alla definizione di: condizioni di percezione della scossa e di partecipazione all'evacuazione [11]; presenza di comportamenti di pre-movimento e di attaccamento sociale [10,13]; comportamenti di fuga dagli edifici e volontà di mantenersi lontani da essi (ed alle macerie) [10]. Osservazioni quantitative e qualitative hanno coinvolto l'uso di video di eventi reali [6,14,15]. Gli scenari post-sisma si basano su correlazioni tra l'intensità sismica e vulnerabilità dell'edificio, stimabile con rilevazioni speditive [3,12], considerando elementi tipologici e plano-altimetrici e fattori correttivi legati a componenti peculiari. Grazie all'uso di scale macrosismiche [11], può essere quindi ricavato il danno medio della struttura e quindi stabilirne il livello di danno più probabile [11,12]. L'integrazione tra i due filoni si avvantaggia delle tecniche di sviluppo di modelli software per la simulazione comportamentale e del moto delle persone [16,17]. Uno dei modelli più potenti è rappresentato da quello alle forze sociali [7,16]: il pedone è guidato nel moto da una serie di "forze" invisibili ("sociali") dovute alle sue interazioni (repulsioni ed attrazioni) con l'ambiente e con gli altri individui. L'approccio "rules-based" tramite modellazione ABM consente inoltre l'introduzione di aspetti sociali e psicologici: desideri e necessità delle persone regolano le scelte in evacuazione [17]. Il modello si basa su analisi sperimentali per definire comportamenti e leggi di moto, e necessita di modifiche per includere i comportamenti peculiari dell'evacuazione post-sisma. Esso si avvantaggia della logica lagrangiana [18,19]: le scelte operative sono applicate a ciascun agente del sistema, e l'interazione tra gli agenti produce, globalmente, i fenomeni qualitativi e quantitativi riscontrati sperimentalmente. Coniugando aspetti di comportamento umano e di modifica dell'ambiente fisico, EPES può essere usato per valutare le scelte delle persone durante l'evacuazione, in diversi scenari. I risultati possono essere utili per analizzare interventi atti a ridurre le interferenze tra uomo e costruito nell'emergenza (ad esempio: pianificazione dell'emergenza, interventi su edifici e vie di fuga strategici a livello urbano).

2. METODOLOGIA

Il primo step coinvolge la definizione del modello comportamentale, partendo dall'analisi di 50 video di evacuazioni reali post-sisma da tutto il Mondo [20]; nella trattazione, i video sono indicati tramite il loro numero nel database tra parentesi graffe. Tutti i video hanno localizzazione spazio-temporale certa e si riferiscono ad eventi con intensità confermata superiore al IV grado della scala EMS98 (eventi sensibili) [11]. I comportamenti presenti in almeno il 30% dei casi sono considerati ricorrenti e riportati nel modello distinguendo se il loro termine di attivazione è un altro individuo o un elemento dall'ambiente. Tramite il software open source di image analysis "Tracker" [21], si sono calcolati i valori medi delle grandezze tipiche del moto (velocità, distanze tra individui). Qui si è caratterizzato il modello di simulazione tramite un approccio (ABM): le interazioni tra gli agenti rilevate sperimentalmente sono organizzate in un modello intenzionale grazie al linguaggio di modellazione grafica i* [9]. La legge di moto dei singoli individui è stata determinata tramite l'approccio alle forze sociali [7,16], apportando integrazioni e modifiche per considerare i comportamenti sperimentali propri del caso post-sisma. I criteri di formazione delle macerie sono stati

introdotti per quantificare in maniera speditiva la possibilità di danneggiamento degli edifici storici in seguito al sisma. La seconda fase ha visto l'implementazione del simulatore EPES, applicativo in linguaggio Java. L'ultima fase consta in test di validazione. I risultati delle analisi sperimentali e quelli di studi precedenti sono stati comparati a quelli ottenuti con EPES. L'approccio di validazione è di tipo lagrangiano [18] e ricalca le metodologie consolidate nei simulatori per l'evacuazione antincendio [19]. Come caso di studio, è stato scelto il centro storico di Corinaldo (AN): gli scenari sono stati ottenuti variando numero di persone da evacuare ed intensità EMS98. 10 simulazioni sono state prodotte per ogni scenario; il risultato è dato dalla loro media. I test proposti riguardano valori medi e tendenza delle velocità di evacuazione.

3. RISULTATI

3.1. Modello comportamentale

Figura 1 traccia i risultati dell'analisi dei video di evacuazioni reali: alcuni comportamenti sono presenti anche in altri tipi di evacuazioni [5,7,16], mentre altri sono peculiari dell'evento sismico. Il modello intenzionale di Figura 2 organizza le relazioni tra gli agenti individuati: la *persona* e l'*ambiente*. L'*ambiente* è definito da: *percorsi di esodo* (strade e altri spazi pubblici); *zone sicure* (spazi ampi e con basso livello di danneggiamento dove può terminare l'evacuazione, come piazze e slarghi nel tessuto urbano), *edifici* (con una determinata vulnerabilità al sisma) ed *elementi bassi* (come alberi ed arredi urbani) che sono presenti nel tessuto urbano; *dati sismici* (intensità EMS, durata e PGA). L'*ambiente* si modifica (*formazione macerie*) per causa del sisma poiché possono essere prodotte *macerie* in base alla vulnerabilità dell'edificio [11]. Gli individui i e j hanno il medesimo ruolo di *persona*. i è il soggetto attuale di valutazione: è caratterizzato da una *tipologia* (adulto, bambino, disabile) ovvero da certi parametri caratteristici di moto (velocità preferita, raggio, massa) [7,16]. i si muove nell'*ambiente* interagendo con esso: nella *decisione di evacuazione* in seguito ad eventi sensibili [6,11]; nell'*influenza degli ostacoli*, tenendosi lontano da *macerie* ed *edifici* o fuggendo velocemente da essi {15, 21, 28, 31}, ma potendo dirigersi verso *elementi bassi*; nella *scelta del percorso* {9, 23, 29}, preferendo i percorsi più sgombri da *macerie*, più larghi e che conducono verso *zone sicure* {6, 10, 31, 32, 34} [7,10]. Subisce inoltre l'*influenza delle altre persone* (individui j), poste entro un raggio di circa 3m da esso [6,16]: vuole *evitare il contatto fisico*, ma allo stesso tempo *evitare separazioni dal gruppo* cui esso appartiene (altri familiari o membri del suo stesso gruppo di evacuazione) [7]. La velocità di fuga è influenzata in direzione e verso da tali interazioni (*calcolo spostamento*): l'Equazione 1 presenta la legge di moto secondo il modello alle forze sociali con le integrazioni dalle analisi video:

$$m_i \cdot \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \vec{O}_g + \sum \vec{F}_{rep} + \sum \vec{F}_{attr} + \vec{\varepsilon}(t) \quad (2)$$

dove m_i (kg) è la massa dell'individuo i , $dv_i(t)$ (m/s) la sua velocità all'istante t di valutazione, O_g (N) la forza che orienta la direzione di moto verso il punto desiderato (ad esempio una zona sicura), $F_{rep,w}$ (N) le forze di repulsione dagli edifici e dalle macerie, $F_{rep,j}$ (N) le forze di repulsione per evitare contatto fisico con

altre persone, $F_{attr,w}$ (N) le forze di attrazione da elementi bassi, $F_{attr,j}$ (N) le forze di attrazione per coesione del gruppo [22], $\varepsilon(t)$ (N) una variazione randomica delle forze per differenti reazioni umane [16].

Tipo di comportamento	Ordine di attivazione	Comportamento	Scenario	Referente per l'attivazione
Comune ad altre evacuazioni	3	Attrazione verso le zone sicure	tutti	ambiente
	3	"Effetto gregge" ed influenza della velocità collettiva all'interno dei gruppi	tutti	persona
	3	Repulsione per evitare contatto fisico	tutti	ambiente persona
	3	Attrazione per coesione di gruppo	tutti	persona
Peculiari del sisma	1	Evacuazione per eventi di intensità sensibile	tutti	ambiente
	2	Evacuazione verso zone e attraverso strade definite "sicure" per caratteri geometrici e di occupazione di macerie	esterno	ambiente persona
	3	Distanza di sicurezza dagli edifici alti e dalle macerie ("Fear of building")	esterno	ambiente
	3	Non mantenimento della distanza di sicurezza da elementi bassi, come recinzioni, ma anche da alberi ed edifici di un piano di altezza	esterno	ambiente
	3	Formazione di gruppi durante l'evacuazione	esterno	persona
	3	Effetto guida dovuto a presenza di soccorritori o piani di evacuazione	tutti	ambiente
	4	Influenza sul termine dell'evacuazione a causa delle condizioni di panico o della mancanza di pericolo percepito	esterno	ambiente persona
	4	Interruzione del processo evacuativo durante l'evento per alto grado di scuotimento del suolo	esterno	ambiente

Figura 1. Comportamenti in evacuazione riscontrati dall'analisi dei video.

L'analisi quantitativa ha stabilito che la distanza media tra le persone nello stesso gruppo di evacuazione è di 1.80m con un deviazione standard di 0.7m [21]. La velocità media di evacuazione rilevata sperimentalmente nelle prime fasi di evacuazione su un campione di più di 150 elementi {1, 2, 3, 21} è di 2.2m/s con una deviazione standard di 0.7m/s, e con un massimo di circa 4m/s in accordo con studi precedenti [15,16]. Tali velocità inoltre decrescono con l'allontanarsi dagli edifici e con il proseguire dell'evacuazione.

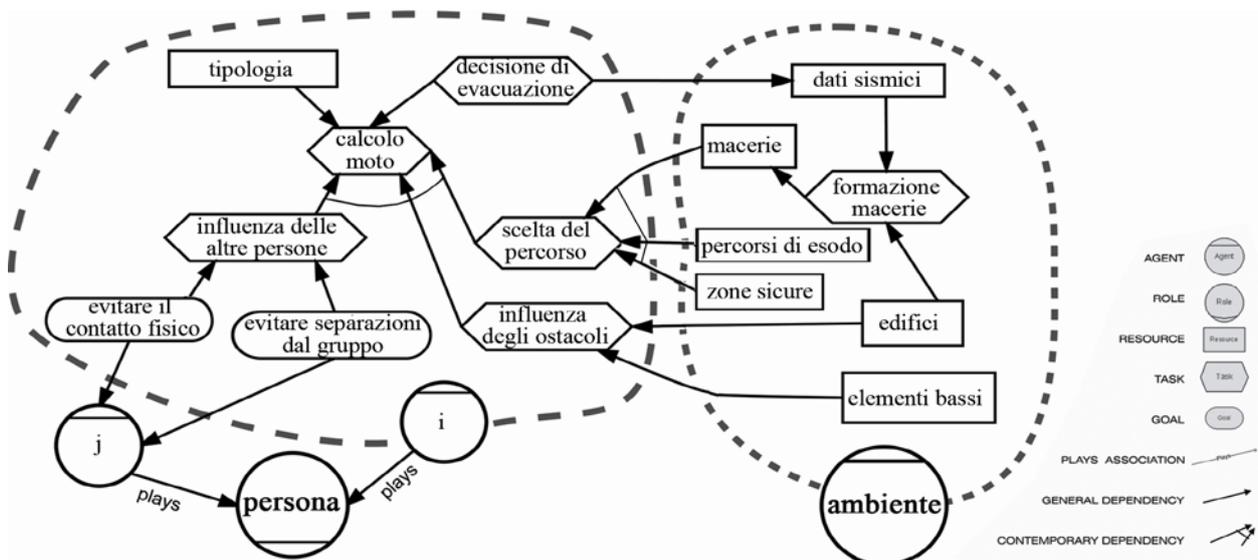


Figura 2. Modello intenzionale tramite linguaggio i*.

3.2 Implementazione e validazione

Il modello è stato implementato in EPES tramite la metodologia TROPOS [23]. Si è ottenuto infine un applicativo Java. La Figura 3 mostra l'andamento della media delle velocità di fuga all'interno di uno stesso gruppo di evacuazione per le prime fasi di moto (allontanamento dagli edifici). Il gruppo analizzato ha una densità di 0.25persone/mq e include 15 individui al fine di definire il comportamento medio in accordo all'ottica di validazione lagrangiana. I dati medi istantanei di simulazione (linea tratteggiata) sono forniti in maniera continua per ogni istante di calcolo (ogni 0.1s). L'andamento della curva è influenzato: nel primo tratto (entro i 3m dall'edificio [16]), dalla repulsione dall'edificio; quindi dall'inserimento di nuovi individui in esso, da cambi di direzione del moto, da attrazione e repulsione tra individui del gruppo. Questi elementi sono propri di tutto il processo di evacuazione. Nel confronto con i dati da valutazione sperimentale {21} (linea continua), il simulatore riesce efficacemente a descrivere la propensione delle persone a diminuire la propria velocità dopo essersi allontanate dagli edifici: la velocità media di evacuazione dall'uscita dell'edificio ad una distanza di 8m è di 2.15m/s, con una differenza percentuale col dato sperimentale pari al -2.4%. La differenza è congruente con i valori di soglia per la validazione usati per quella dei simulatori di evacuazione antincendio [19]: essa è influenzata essenzialmente dai parametri di moto della persona (*tipologia* in Figura 2) nella formulazione alle forze sociali, incluso il parametro $\varepsilon(t)$. Inoltre, il segno negativo non sovrastima la rapidità del processo di evacuazione, rimanendo così a vantaggio di sicurezza.

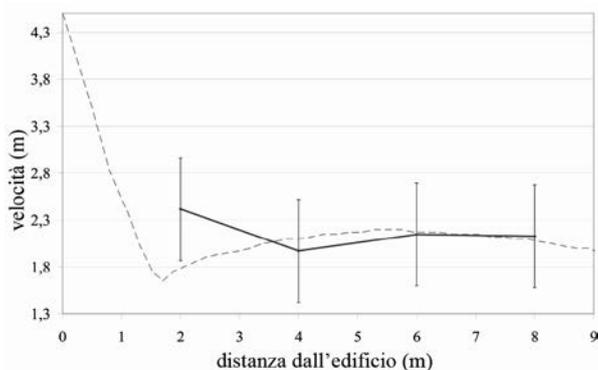


Figura 3. Confronto della velocità media dei pedoni in relazione alla loro distanza dall'edificio: calcolo della simulazione (linea tratteggiata); dati sperimentali {21} (linea continua con barra di errore legata alla deviazione standard) forniti a 2m, 4m, 6m, 8m.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro riassume i primi risultati di un innovativo approccio al rischio sismico su scala urbana che introduce l'importanza della valutazione di aspetti di comportamento umano. Un modello di simulazione di evacuazione è stato delineato partendo da osservazioni di eventi reali, e un software, EPES, è stato implementato e validato. EPES è proposto come strumento per l'analisi di fenomeni di evacuazione post-sisma a scala urbana grazie alla possibilità di unire nel modello comportamento umano e modifica dello scenario in seguito al terremoto, inclusa formazione di macerie e danneggiamento degli edifici, tramite

approccio macrosismico. I fenomeni comportamentali evinti riguardano le possibili decisioni delle persone in diversi scenari, ovvero in seguito ad eventi di diversa intensità o all'organizzazione della scelta del percorso (scelta libera o congruente a piani di evacuazione). Mappe integrate di rischio potranno quindi combinare vulnerabilità dei tronchi stradali, pericolosità del sito (che incide sia sull'edificato, sia sulle infrastrutture), grado di deflusso delle persone e livello di servizio del tronco (da libero a forzato; "colli di bottiglia"), tempo di raggiungimento delle zone sicure da parte degli abitanti. Inoltre, potranno essere testate soluzioni di riduzione del rischio (su aree esistenti o di nuova progettazione): interventi di riduzione della vulnerabilità su edifici collocati in punti realmente strategici della griglia di evacuazione; definizione di piani di evacuazione e di procedure di accesso dei soccorritori; allocazione dei punti di raccolta e delle aree di attesa.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] N. Ambraseys, Evaluation of seismic risk, in: Proc. NATO Advanced Studies on Seismicity & Seismic Risk of the North Sea, Reidel, Utrecht, 1983: pp. 317–345.
- [2] J.-U. Klügel, Seismic Hazard Analysis — Quo vadis?, *Earth-Science Reviews*. 88 (2008) 1–32.
- [3] G.M. Calvi, R. Pinho, G. Magenes, J.J. Bommer, H. Crowley, Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years, *ISSET Journal of Earthquake Technology*. 43 (2006) 75–104.
- [4] Q. Chen, Y. Chen, J.I.E. Liu, L. Chen, Quick and Approximate Estimation of Earthquake Loss Based on Macroscopic Index of Exposure and Population Distribution, *Natural Hazards*. 15 (1997) 217–229.
- [5] M. Kobes, I. Helsloot, B. de Vries, J.G. Post, Building safety and human behaviour in fire: A literature review, *Fire Safety Journal*. 45 (2010) 1–11.
- [6] M. D’Orazio, L. Spalazzi, E. Quagliarini, G. Bernardini, Agent-based model for earthquake pedestrians’ evacuation in urban outdoor scenarios: Behavioural patterns definition and evacuation paths choice, *Safety Science*. 62 (2014) 450–465.
- [7] D. Helbing, A.F. Johansson, Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics, in: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer, 2010: pp. 6476–6495.
- [8] M. Kobes, I. Helsloot, B. de Vries, J.G. Post, N. Oberijé, K. Groenewegen, Way finding during fire evacuation; an analysis of unannounced fire drills in a hotel at night, *Building and Environment*. 45 (2010) 537–548.
- [9] E. Yu, Social Modeling and i *, in: A. Borgida, V. Chaudhri, P. Giorgini, E. Yu (Eds.), *Conceptual Modeling: Foundations and Applications - Essays in Honor of John Mylopoulos*, Springer, 2009: pp. 99–111.
- [10] D. Alexander, Behavior during earthquakes: a southern italian example, *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*. 8 (1990) 5–29.
- [11] G. (ed.). Grünthal, European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), *Cahiers Du Centre Européen De Géodynamique Et De Séismologie*. 15 (1998).
- [12] S. Giovinazzi, S. Lagomarsino, A macroseismic method for vulnerability assessment of buildings, in: *Proceeding of The 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [13] M. D’Orazio, G. Bernardini, An experimental study on the correlation between “attachment to belongings” “pre-movement” time, in: U. Weidmann, U. Kirsch, M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, Springer International Publishing, Cham, 2014: pp. 167–178.
- [14] X. Yang, Z. Wu, Y. Li, Difference between real-life escape panic and mimic exercises in simulated situation with implications to the statistical physics models of emergency evacuation: The 2008 Wenchuan earthquake, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 390 (2011) 2375–2380.
- [15] M. Hori, *Introduction to Computational Earthquake Engineering*, 2nd ed., Imperial College Press, London, UK, 2011.
- [16] T.I. Lakoba, D.J. Kaup, N.M. Finkelstein, Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution, *Simulation*. 81 (2005) 339–352.
- [17] C. Rabiaa, C. Foudil, Crowd simulation influenced by agent’s socio-psychological state, *Journal of Computing*. 2 (2010) 48–54.
- [18] D.R. Parisi, C.O. Dorso, Microscopic dynamics of pedestrian evacuation, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 354 (2005) 606–618.
- [19] E. Ronchi, D. Nilsson, The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models, *NIST Technical Note*. 1822 (2013).
- [20] <https://drive.google.com/folderview?id=0B91jqaXLKo5LWGYzRDdfU1oyWlk&usp=sharing>, (n.d.).
- [21] D. Brown, W. Christian, Simulating what you see: combining computer modeling with video analysis, in: *8th International Conference on Hands on Science*, Ljubljana, Slovenia, 2011.
- [22] M. D’Orazio, L. Spalazzi, E. Quagliarini, G. Bernardini, Multi-Agent Simulation Model for Evacuation of Care Homes and Hospitals for Elderly and People with Disabilities in Motion, in: S. Longhi, P. Siciliano, M. Germani, A. Monteriù (Eds.), *Ambient Assisted Living - Italian Forum 2013*, Springer International Publishing, 2014: pp. 197–204.
- [23] P. Bresciani, A. Perini, P. Giorgini, F. Giunchiglia, J. Mylopoulos, Tropos: An agent-oriented software development methodology, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 8 (2004) 203–236.