

# Multi-hazard emergency management in historical centers: methods and tools for increasing mass-gathering safety in case of earthquake

Gabriele Bernardini\*, Chiara David, Silvia Santarelli,  
Enrico Quagliarini, Marco D’Orazio

---

## Highlights

Mass-gathering events (MEs) emergency safety in historic city centers is analyzed in combination to seismic risk issues. Overcrowding in compact urban fabric, low people’s familiarity level with spaces/emergency procedures, built heritage modifications due to the earthquake occurrence are combined in a simulation tool. Spontaneous evacuation process is simulated and results are analyzed by means of safety key performance indicators. Proposed risk reduction strategies are based on spontaneous evacuation issues and their effectiveness is validated through simulations.

---

## Abstract

The use of historic city centers for touristic purposes, i.e. mass gatherings events (MEs), needs a multi-hazard approach which should jointly consider building heritage and hosted individuals’ emergency safety, by including effects of individuals’ behaviors to provide effective risk-reduction strategies (i.e.: interventions on critical Building Heritage; outdoor spaces layout reorganization; emergency management; wayfinding systems;). This work evidences the capabilities of such approach in case of MEs-earthquake emergency combinations, by taking advantaging of a validated evacuation simulator, through a case-study application.

---

## Keywords

Evacuation safety, Human behaviours in emergency, Seismic risk, Mass gathering events, Historical city center

---

## 1. INTRODUCTION

The safety of individuals during an emergency in historical scenarios (i.e. urban city centers) is influenced by the built environment risk level (historic buildings, urban spaces) and the interaction between users and the built environment itself, including possible hazard-affected environmental changes (e.g.: building damages) [1]–[3]. When historic areas host tourist attractions or crowd events, the high density of people (who are unfamiliar with urban spaces and emergency procedures) add further exposure-affecting elements to be considered in risk and emergency assessment as well as in the design of risk-reduction solutions [4],[5]: in this sense, understanding and simulating

### Gabriele Bernardini

DICEA - Dip. di Ingegneria  
Civile, Edile e dell’Architettura,  
Università Politecnica delle  
Marche, via Brezze Bianche 12,  
Ancona, 60131, Italia

### Chiara David

DICEA - Dip. di Ingegneria  
Civile, Edile e dell’Architettura,  
Università Politecnica delle  
Marche, via Brezze Bianche 12,  
Ancona, 60131, Italia

### Silvia Santarelli

DICEA - Dip. di Ingegneria  
Civile, Edile e dell’Architettura,  
Università Politecnica delle  
Marche, via Brezze Bianche 12,  
Ancona, 60131, Italia

### Enrico Quagliarini

DICEA - Dip. di Ingegneria  
Civile, Edile e dell’Architettura,  
Università Politecnica delle  
Marche, via Brezze Bianche 12,  
Ancona, 60131, Italia

### Marco D’Orazio

DICEA - Dip. di Ingegneria  
Civile, Edile e dell’Architettura,  
Università Politecnica delle  
Marche, via Brezze Bianche 12,  
Ancona, 60131, Italia

\* Corresponding author  
Tel.: +39-0712204246;  
Fax: +39-0712204582;  
e-mail: g.bernardini@univpm.it

users' behavior becomes an essential element [6]–[8]. Historical centers are characterized by specific location and intrinsic vulnerability and hazard features that increase their risk, especially in relation to natural disasters. Among these, earthquakes are the most significant ones because of the sudden onset of critical built environment conditions influencing the individuals' possibility reach safe areas and, then, to be rescued (i.e.: buildings damages, debris interfering with the use of urban evacuation paths network in emergency conditions) [9],[10]. Overlapping risks and effects (including behavioral ones) according to a multi-hazard perspective [11] becomes, therefore, a key element to effectively increase the hosted users' safety in these scenarios, while respecting the peculiar characteristics of historical spaces and possibility fruition task of architectural space even during crowd events and mass-gatherings (MGs) (i.e.: minimizing the impact on the Heritage; localizing interventions where they are necessary). This work is aimed at providing a first step in achieving this goal: according to a “behavioral design” approach [12], planning and design methods and tools are applied to propose risk-reduction solutions based on the combination of analyses about earthquake-stricken urban scenario description and users' response in emergency, by considering MGs conditions. Analyses are carried out by means of an evacuation simulator: results are evaluated through Key Performance Indicators-KPIs) to highlight the critical emergency conditions in relation to the current management solutions. Types of mitigation interventions (i.e.: on building vulnerability/expected damage; evacuation assistance/wayfinding; urban layout design) are then defined to support the evacuees during the evacuation process. The effectiveness of proposed solutions is finally analyzed through simulations. This work applies this process to a significant case study (Foro Annonario, Senigallia-AN, that usually hosts MGs) and takes advantages of an evacuation simulator developed by the research group [1].

## 2. LITERATURE REVIEW

Current methods for risk assessment, emergency planning and mitigation strategies definition in historic centers generally adopt a specialized approach focused on specific disaster conditions to be faced [13],[14]. For the Italian case, earthquake emergency management and planning methods are generally connected to a full urban scale standpoint [14], while MGs emergency safety tools adopt a fire safety-based approach which has been codified within recent national regulations [15]. However, either these approaches are based on a schematic standpoint, which does not take into account possible effects overlapping in a multi-hazard perspective as well as behavioral responses and

### 1. INTRODUZIONE

*La sicurezza delle persone in caso di emergenza in scenari storici quali i centri urbani è influenzata da livello di rischio del costruito (edifici storici, spazi urbani) ed interazione tra i fruitori e il costruito stesso, ivi incluse le possibili modifiche ambientali causate dall'emergenza [1]–[3]. Negli ambiti storici a vocazione turistica o ospitanti grandi eventi, le elevate densità di persone, non familiari con spazi e procedure d'emergenza, aggiungono ulteriori elementi di esposizione da considerare nella valutazione dell'emergenza e nella progettazione di soluzioni di riduzione del rischio [4],[5]: comprendere e simulare il comportamento dei fruitori rappresenta un tassello essenziale [6]–[8]. Inoltre, ubicazione e caratteristiche intrinseche rendono i centri storici vulnerabili a disastri naturali: tra questi, i terremoti rappresentano quelli più significativi per l'insorgenza di modifiche critiche al costruito tali da influenzare la possibilità per le persone di raggiungere zone sicure ove essere soccorse (i.e.: danneggiamento degli edifici, macerie che limitano l'uso dei percorsi urbani) [9],[10]. Considerare la sovrapposizione di rischi ed effetti (inclusi quelli comportamentali) operando in ottica multi-hazard [11] diventa, quindi, un elemento chiave per aumentare effettivamente la sicurezza delle persone in questi scenari, pur rispettando i caratteri peculiari degli spazi storici e la possibilità di fruizione degli stessi anche per grandi eventi (i.e.: minimizzare l'impatto sul patrimonio e collocare l'intervento ove necessario). Lo studio intende fissare un primo step nel raggiungimento dell'obiettivo: sfruttando i criteri del behavioural design [12], si applicano metodi e strumenti per definire soluzioni di riduzione del rischio basate sull'analisi combinata, tramite simulatore di evacuazione, della modifica dello scenario in seguito a sisma e della risposta delle persone all'emergenza in caso di grande affollamento. L'analisi quantitativa (tramite Key Performance Indicators-KPIs) dei risultati di simulazione evidenzia le criticità del processo in relazione alle correnti soluzioni di gestione, e permette di derivare tipologie d'intervento (i.e.: ridurre vulnerabilità/danno del costruito; gestione della folla; guida in evacuazione; design del layout urbano), da implementare dove esse possono supportare gli evacuanti. L'efficacia delle soluzioni proposte viene infine analizzata al simulatore. Per mostrare le capacità dell'approccio multi-hazard, il lavoro sfrutta l'applicazione con simulatore sviluppato dal gruppo di ricerca [1] a caso di studio significativo (Foro Annonario, Senigallia-AN, usato per grandi eventi).*

### 2. STATO DELL'ARTE

*Per valutare le condizioni di emergenza nei centri storici e pianificare la riduzione dei rischi, si usa, ad oggi e a livello internazionale, una parzializzazione per differenti disastri, proponendo una specializzazione delle strategie a seconda dell'evento di riferimento [13],[14]. In particolare, gli aspetti di*

human-environment interactions in the damaged scenario [12],[16]. In fact, current guidelines concerning earthquake emergency management in historic centers seems to limit the identification of gathering areas, evacuation paths and access routes to the geometric relationship between buildings height and facing path width (street or square), by defining them as possible unavailable emergency paths if their ratio  $\geq 1$  [14],[17]. Buildings and infrastructural elements (i.e., network of routes) vulnerability, complexity of compact historic urban fabric, occupants' features and their relationship with urban spaces layout (number/position of users, individual's characteristics such as age or mobility issues, behaviors, level of knowledge of surrounding built environment) seem to be significantly excluded [9],[12],[17]. Regulations for outdoor MGs (compare with Title III of "Testo Unico delle Leggi di Pubblica Sicurezza") [15] outlines minimum requirements to be adopted, but still adopt a simplified definition of emergency conditions, by defining solutions in terms of escape path capacity [18],[19].

These quick approaches overlook specific behavioural aspects which can be provoked by overcrowding conditions during MGs in historical scenarios [5],[12]. In fact, in MGs, visitors can gather in few focal points within the urban fabric, where densities can be  $\geq 1.2$  or  $2 \text{ pp/m}^2$  [18],[19], or even  $4 \text{ pp/m}^2$  (upper limit adopted in crowding evaluations by Law Enforcement Agencies and local authorities [8]). When they are in such conditions, people may not be able to reach (at all or in a reasonable time) gathering areas because of:

- crowd motion (e.g.: pushes between people and possible crushing in motion, counter-flows motion and evacuation flows merge, interaction with rescuers) [5],[8];
- earthquake effects, also due to low seismic intensity [9], which could provoke individuals' motion slowing down (especially in case of overcrowding) and direct damages to people placed outdoor;
- limited wayfinding activities due to the poor knowledge of urban spaces (i.e. for tourists) and to the absence of clear and precise directional information on path to be used and areas to receive rescuers' support [20]. While moving, people tend to use landmarks such as temporary installations and well-known monuments/spaces, by increasing the possibility of herding effects in path choices, and so an increase in pedestrians' density and motion slowing [21].

According to a performance-based approach, used by fire safety engineering [22] and proposed by international researches for outdoor spaces applications [5],[6],[12], such emergency man-environment interactions can be investigated through evacuation simulators, to evaluate critical issues in the evacuation

*gestione che riguardano la sicurezza in caso di sisma sono consolidati all'interno di strumenti pensati per la scala urbana [14], mentre quelli di emergenza dei grandi eventi sono codificati in aspetti di pratica antincendio, confluita nella recente normativa [15]. Entrambi gli approcci adottano comunque un punto di vista schematico, che non tiene conto né della possibile sovrapposizione di effetti in ottica multi-hazard, né della risposta comportamentale e dell'interazione uomo-ambiente nello scenario di danno [12],[16]. Le attuali linee guida per valutazione e pianificazione dell'emergenza sisma nei centri storici riducono il problema dell'individuazione nel layout urbano di aree di raccolta e percorsi di accesso/collegamento alla stima dell'interferenza data dal rapporto geometrico tra altezza dell'edificio e larghezza dello spazio su cui esso si affaccia (strada o piazza), indicando come non usabili in emergenza i percorsi con rapporto  $\geq 1$  [14],[17]. Sono esclusi aspetti specifici di vulnerabilità di edifici ed infrastrutture (i.e. network dei percorsi), complessità del layout, rapporto tra occupanti e layout (numero/posizione delle persone; caratteristiche individuali come età o capacità motorie; comportamenti; conoscenza della fabbrica urbana storica) [9],[12],[17]. La normativa per manifestazioni temporanee all'aperto (vedi Titolo III del Testo Unico delle Leggi di Pubblica Sicurezza) [15], traccia i requisiti minimi da adottare per generali condizioni di emergenza, ma adotta una definizione semplificata dell'emergenza, relazionandola essenzialmente a problemi di capacità delle vie di fuga (concetto di modulo antincendio [18],[19]). Questo approccio speditivo trascende i caratteri comportamentali aggravati dall'influenza delle condizioni di grande affollamento [5],[12]. Infatti, nei grandi eventi, i visitatori si possono concentrare in punti focali del tessuto urbano, con densità maggiori di  $1.2$  o  $2 \text{ pp/m}^2$  [18],[19]), e, talvolta, di  $4 \text{ pp/m}^2$  (limite adottato nelle valutazioni delle Forze dell'Ordine [8]). Le persone, sottoposte a queste condizioni locali, possono non riuscire a raggiungere (affatto o in tempi consoni) i punti di raccolta perché ostacolati da:*

- *movimento della folla (es.: spinte tra persone con possibile schiacciamento nel moto; esodo contro-corrente e unione di flussi di evacuazione; interazione con i soccorritori) [5],[8];*
- *effetti del sisma, sin da modeste intensità sismiche [9], che possono provocare rallentamento (in relazione soprattutto alla densità di affollamento rispetto alla superficie libera da utilizzare nell'esodo) e possibilità di danno diretto alle persone ammassate lungo gli spazi urbani;*
- *basso livello di orientamento per scarsa conoscenza degli spazi urbani (i.e. turisti) e in assenza di informazioni di wayfinding, chiare e puntuali, su percorsi da usare (i.e. evitare quelli con elevata vulnerabilità) e luoghi dove ricevere soccorso [20]. Le persone tendono a muoversi usando landmarks (i.e. installazioni temporanee) legate*

process and then define effective strategies to support evacuees. The design criteria of Behavioral Design (BD) approach [7],[12] take advantages of this methodology, also for issues connected to urban historical contexts, by: 1) defining models of human response in emergency, starting from an analysis of real events; 2) implementing models in assisted design software, and validating them; 3) applying the simulators to evaluate users' safety levels (i.e.: on case studies) through KPIs [7]; 4) on the basis of simulation results, proposing risk mitigation strategies, based on effective evacuees' response and on the interaction with them, by placing interventions where necessary and trying to minimize the impact on the Heritage; 5) evaluating the solutions effectiveness through simulation or real tests, so as to compare safety conditions without and with proposed strategies [7],[23]. Previous research activities developed methodological points 1 and 2 by obtaining an Earthquake Pedestrians' Evacuation Simulator in urban environment (EPES) [1], based on real-world behavioral data. EPES represents human-environment interactions according to a microscopic approach, by using Agent-Based Model (ABM) and Social Forces Model (SFM), and includes criteria for representing earthquake-induced building damages.

### 3. PHASES AND METHODS

According to Section 2 discussion, this work is composed by the following phases based on the BD approach (for each phase, reference BD methodology phase and definition paragraph in this study are pointed out):

- *definition of KPIs (quantitative and qualitative indices) about safety level for multi-hazard conditions in historical scenarios*, based on simulation data analysis about evacuees' movement and post-earthquake damage scenario definition (phase 3; section 3.1);
- *post-earthquake evacuation simulator (EPES) application to a significant case study*, to evaluate individuals' safety levels referring to "spontaneous" evacuation process (i.e.: human response according to real-World emergency behaviours) [12]. Scenario seismic intensity and crowd density are univocally chosen, and advanced evacuation supporting systems (wayfinding devices, building components, rescuers' interactions) are not considered (phase 3; section 3.2);
- *KPIs-based analysis of "spontaneous" evacuation conditions, proposal of risk-mitigation solutions and their effectiveness evaluation through simulation*. Solutions will be mainly aimed at supporting evacuees' choices by reducing critical interferences highlighted by "spontaneous"

ai grandi eventi e al costruito storico, aumentando la possibilità di scegliere gli stessi percorsi, con conseguente aumento di densità e rallentamento del moto [21].

Sfruttando un approccio presente nell'ingegneria antincendio [22], e la cui utilità è stata indicata anche da studi precedenti a livello internazionale [5],[6],[12], l'analisi delle interazioni in condizioni di emergenza può essere affrontata tramite simulatori di evacuazione, al fine di valutare criticità e strategie efficaci a supportare le persone.

I criteri di progettazione del Behavioral Design (BD) [7],[12] sfruttano tale metodologia, anche in contesti storici urbani, per: 1) definire modelli di risposta umana all'emergenza, partendo da analisi di eventi reali; 2) implementare i modelli in codici di calcolo per la progettazione assistita, e validare gli stessi; 3) applicare i simulatori per valutare i livelli di sicurezza delle persone, su casi di studio, tramite KPIs [7]; 4) sulla base delle simulazioni, proporre strategie di mitigazione del rischio, basate sull'effettiva risposta degli evacuanti e sull'interazione con essi, collocando gli interventi ove necessario e cercando di minimizzare l'impatto sul costruito storico; 5) valutare l'efficacia delle soluzioni con analisi al simulare o prove reali comparando le condizioni senza e con tali interventi, in accordo anche alle linee guida degli strumenti metodologici consolidati e al recente avanzamento nella ricerca [7],[23]. Precedenti attività di ricerca hanno sviluppato i punti 1 e 2 ottenendo un simulatore di evacuazione post-sisma in ambiente urbano (EPES-Earthquake Pedestrians' Evacuation Simulator) [1], basato su dati comportamentali sperimentali, e che rappresenta microscopicamente le interazioni uomo-ambiente grazie a tecniche Agent-Based (ABM) e alle forze sociali (SFM), ed include criteri di creazione di scenari post-sisma.

#### 3. METODOLOGIA

In accordo allo stato dell'arte di Sezione 2, lo studio si articola nelle seguenti fasi secondo l'approccio al BD (tra parentesi è indicato, per ogni fase, il punto metodologico di riferimento e la sezione relativa nel prosieguo):

- *definizione metodologica dei KPIs (indici quantitativi e qualitativi) per descrivere il livello di sicurezza in condizioni multi-hazard negli scenari storici a partire dai dati di simulazione circa movimento delle persone e scenario di danno post-sisma* (punto 3; sezione 3.1);
- *applicazione del simulatore di evacuazione post-sisma (EPES) a caso di studio rilevante, valutando il processo di esodo in condizioni "spontanee" nello scenario corrente del caso di studio, ovvero così come esso avverrebbe in accordo alle analisi sperimentali su casi reali [12]. Le analisi sono condotte considerando specifico scenario di intensità sismica ed affollamento, e non prevede l'ausilio di sistemi evoluti (devices, componenti edili, squadre di soccorso) nell'esodo* (punto 3; sezione 3.2);

conditions simulations, and will include interventions on built environment, positioning of rescuers' teams, evacuation wayfinding (phases 4 e 5; section 3.3).

### 3.1. KPIS FOR SAFETY EVALUATION ACCORDING TO A MULTI-HAZARD APPROACH

KPIs can be used by safety designer validate management and planning design actions. They collect and combine simulation data to compare multiple scenarios outlines according to the BD approach.

They are physical quantities (in absolute or percentage terms) representing emergency phenomena concerning both modification of the post-event scenario (i.e.: buildings damages, related interference with evacuation paths and gathering areas) and crowd's and rescuers' evacuation motion in the damaged scenario.

They can: highlight the evolution of the emergency conditions during the simulation time; compare safety levels among different initial conditions (i.e.: overcrowding, earthquake severity, building vulnerability); compare safety levels affected by evolutionary evacuation phenomena (i.e.: behaviors activation during the evacuation time, also because of environmental drivers (e.g. debris along paths).

Table 1 and Table 2 summarize the proposed KPIs used for environmental drivers (post-event conditions) and evacuation quantities, by including: related definition and adopted symbol, with unit of measurement; computation procedure and KPIs domain; assessment criteria related to the proposal of risk-reduction strategies.

KPI (symbol) [unit of measurement]	Description and computation procedure – KPI domain	Assessment criteria to the proposal of risk-reduction strategies
Effective gathering area surface ( $A_a$ ) [m <sup>2</sup> ]	Gathering area surface/path width apart from temporary structures (e.g.: festival stands), street furniture, trees, inaccessible courtyards and flowerbeds, lanes for rescuers' vehicle movement (with a width of 3.5m by considering a firefighters' truck [18]), parking lots (that are all considered as occupied), possible building-related debris (as function of earthquake intensity [1]); average value or minimum value (conservative approach) – variable from 0 (the area/path is completely occupied by building debris) to the area/path dimension	Possible interventions on buildings vulnerability and microscale layout of urban spaces (e.g.: temporary structures position during MGs, parking areas definition, vehicle emergency lane identification) combined to the rescuers' access paths/strategies and crowd management to facilitate evacuees' flow motion along urban spaces; definition of alternative access routes for rescuers' vehicles in case of path width lower than 3.5m in post-earthquake conditions
Effective evacuation path width to gathering areas ( $L_a$ ) [m]		

Table 1. Key Performance Indicators (KPIs) to risk reduction strategies proposal: built environment and evacuation path network.

### 3.2. CASE STUDY APPLICATION

The case study application involves a significant part of Senigallia

- analisi delle condizioni "spontanee" tramite KPIs, proposta di soluzioni progettuali e verifica al simulatore per aumentare il livello di sicurezza degli occupanti, al fine di risolvere le interferenze nel processo evidenziate dalle simulazioni "spontanee", per mezzo, principalmente, di interventi su costruito, posizionamento dei soccorritori, guida delle persone nell'esodo (punto 4 e 5; sezione 3.3).

#### 3.1. KPIS PER LA SICUREZZA NELLA GESTIONE DELL'EMERGENZA IN OTTICA MULTI-HAZARD

I KPIs, quali valutatori di sicurezza che il progettista può utilizzare per validare le scelte di gestione e pianificazione, raccolgono dati dalle simulazioni per comparare contestualmente più scenari, nell'ottica di processo espressa dal "percorso" del BD. Essi sono grandezze fisiche (esprese in termini assoluti o percentuali) rappresentative del fenomeno d'emergenza per gli aspetti di modifica dello scenario post-evento (i.e.: danneggiamento edifici e strutture; relativa interferenza con percorsi e aree di raccolta) e di esodo/moto di evacuanti e soccorritori. Essi possono: evidenziare l'evolversi delle condizioni nel tempo dell'emergenza (i.e.: di simulazione); comparare la sicurezza tra diverse condizioni iniziali, in termini di affollamento, severità dell'evento, vulnerabilità del costruito; comparare la sicurezza delle condizioni evolutive del fenomeno, legate ai comportamenti attivati nel tempo nell'esodo anche nel rispetto dei drivers ambientali. La Tabella 1 e la Tabella 2 sintetizzano i KPIs usati nelle valutazioni di sicurezza rispettivamente per i parametri ambientali (post-evento) e quelli di evacuazione, organizzando definizione e simbologia adottata, con unità di misura; descrizione di calcolo e campo di esistenza; finalità d'uso al fine di proposta di strategie di mitigazione.

#### 3.1. APPLICAZIONE AL CASO DI STUDIO

L'applicazione al caso di studio concerne una porzione del centro storico di Senigallia, località in passato colpita da violenti terremoti

historical city center, which was stricken by many severe earthquakes (e.g.: 30/10/1930:  $M_w=5.83$ , earthquake intensity VIII-IX degree of MCS - [http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/place/IT\\_51516](http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/place/IT_51516), last access 21/04/2018).

In particular, the considered area is focused on the Foro Annonario, designed by the architect Pietro Ghinelli and built in the first half of the XIX century, which hosts many MGs during the whole year. The outdoor area is an elliptical square, as shown in Fig. 1 (surface of about 1500 m<sup>2</sup>), and is bounded by a masonry building (restored in the 90s of the XX century), that is characterized by a colonnade and composed by a rectangular central body and two semi-spherical arms. The Foro faces with a square (identified by P in Fig. 1) that is currently used as parking area, while two gallerias connect the Foro with the urban spaces behind. Considering a crowd density of 2 pp/m<sup>2</sup> [19], the Foro Annonario can host about 3000 visitors.

In case of emergency during MGs, visitors flow into the front area (P), shown in Fig. 1: such area may not safely collect all the people exiting the Foro, because its effective area  $A_a$ , (if considering parking lots as free,  $A_a < 1000$  m<sup>2</sup>) [14] implies a evacuees' density  $> 3$  pp/m<sup>2</sup>, by provoking dangerous physical contact conditions (see Table 2) [8].

Hence, visitors would move along evacuation paths towards the nearby gathering areas, as shown in Fig. 1: piazza del Duca (A); piazza Simoncelli (B), whose  $A_a$  value allows people to wait by avoiding interferences with facing buildings [14]; via Portici Ercolani (C) and Via Perilli (D), which are the rescuers' vehicles access routes, by spreading along the street and the neighboring areas. Finally, the main rescuers' vehicles access route is represented by direction (D) (direct connection with the State Road).

EPES application to the case study [1] involves the maximum acceptable crowding (3000 individuals), causally places within the Foro square in Fig. 1.

According to experimental data from real-World events [1],[9],[12], individuals are preliminarily modeled by considering such similar behaviours: they do not move during the earthquake shake, so as to avoid human body and motion instability; people start the evacuation before the shake, by moving with a preferred average speed of 2.1m/s (Gaussian distribution of speed, with standard deviation: 0.5m/s).

Finally, the considered intensity is equal to VII scale EMS98 [9]: for involved masonry building, it provokes non-structural elements (i.e.: decoration) collapses, including damages to plasters, cornices and

(es.: 30/10/1930:  $M_w=5.83$ , intensità VIII-IX grado MCS - fonte: [http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/place/IT\\_51516](http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/place/IT_51516), ultimo accesso 21/04/2018). In particolare, è scelta come area di analisi quella del Foro Annonario, complesso realizzato nella prima metà del 1800 su progetto dell'architetto Pietro Ghinelli, e che ospita numerosi eventi a grande affollamento durante tutto il corso dell'anno. L'area, schematizzata in Fig. 1, è composta da una piazza ellittica (superficie di circa 1500m<sup>2</sup>) delimitata da un corpo centrale rettangolare su cui si innestano due bracci semisferici contraddistinti da un colonnato. L'edificio, in muratura portante, è stato oggetto di restauro negli anni '90 del 1900. L'area è aperta su un lato su piazza attualmente adibita a parcheggio, mentre due gallerie la Foro con gli spazi urbani retrostanti. Considerando un affollamento di 2 pp/m<sup>2</sup> [19], la piazza può contenere circa 3000 visitatori. In caso di emergenza, essi si riversano nella zona (P) antistante, adibita a parcheggi, mostrata in Fig. 1: essa potrebbe non contenere in condizioni di sicurezza tutte le persone presenti, poiché la sua superficie disponibile, al netto dell'area di interferenza con edifici prospicienti e spazio di deflusso veicolare (a posteggio completamente libero, è minore di 1000m<sup>2</sup>) [14], vedrebbe una densità di oltre 3 pp/m<sup>2</sup>, con pericolose condizioni di contatto fisico (compara anche la Tabella 2) [8]. I visitatori si muoverebbero lungo i percorsi di esodo di Fig. 1, verso le seguenti aree di raccolta: piazza del Duca (A); piazza Simoncelli (B), la cui superficie consente l'attesa con limitata interferenza con l'edificio prospiciente [14]; via Portici Ercolani e Via Perilli (C, D), lungo le direttrici di accesso dei mezzi di soccorso, distribuendosi su percorso e aree adiacenti. I mezzi di soccorso possono entrare nell'area dall'accesso (D) (collegamento diretto con la Strada Statale). L'applicazione di EPES [1] considera l'affollamento massimo accettabile di 3000 persone, posizionato in maniera causale all'interno della piazza (area del Foro in Fig. 1). In accordo ai dati sperimentali da eventi reali [1],[9],[12], gli individui sono preliminarmente modellati similmente: rimangono ferme durante la scossa, evitando così instabilità nel movimento; l'abbandono della piazza avviene a scossa terminata con velocità media di 2.1m/s, in distribuzione gaussiana (deviazione standard: 0.5m/s). Infine, l'evento considerato è di intensità pari a VII scala EMS98 [9]: esso produce crollo in strada di elementi decorativi, inclusi intonaco, cornicioni e comignoli alla maggior parte delle strutture in muratura. In accordo ai dati di letteratura modellati in EPES [1], la maceria prodotta ha dimensioni nel range di 0.7-1.75m, permettendo il deflusso dalla folla. Tale scelta offre maggior risalto ai fenomeni di moto della folla nell'analisi delle simulazioni. Il tempo massimo di simulazione è stato posto sempre pari a 600s e, in accordo alla letteratura pregressa [5],[6],[12], sono state eseguite 10 simulazioni per scenario, derivando media e deviazione standard di ogni output di EPES.

Scenari di simulazione e progettazione

chimneys. According to literature data modeled in EPES [1], debris dimensions are in the range of 0.7÷1.75m, allowing the effective crowd movement in considered urban spaces. This choice allows simulation to focus on crowd phenomena and effects on evacuation. The considered maximum simulation is equal to 600s and, according to previous literature criteria [5],[6],[12], 10 simulations per scenario are performed, so as to calculate average and standard deviation of each EPES simulation output.

*degli interventi*  
 In EPES, i criteri comportamentali sono assegnati al singolo individuo simulato, che è influenzato nelle decisioni da evacuanti vicini, stato del costruito, caratteri dei percorsi. Egli si muove in un campo di "forze" attrattive (es.: legami affiativi e sociali tra persone; volontà di raggiungere un luogo sicuro) e repulsive (es.: evitare ostacoli; tenersi lontani da macerie ed edifici) [1]. In particolare, lo scenario di evacuazione "spontanea" è veicolato principalmente dal criterio di scelta

KPI (symbol) [unit of measurement]	Description and computation procedure – KPI domain	Assessment criteria to the proposal of risk-reduction strategies
Percentage of people arrived at the gathering area ( $N_a$ ) [%]	Percentage ratio between the number of people arrived at a gathering area and the total number of involved people (initial conditions) who can autonomously evacuate; the value can be calculated for each area – from 0% to 100%	Maximizing the number of evacuees arrived in a gathering area, by minimizing the number of gathering areas in order to focus rescuers' intervention
Crowd density at gathering area ( $\rho_a$ ) [pp/m <sup>2</sup> ]	Ratio between the number of arrived evacuees and $A_a$ , for each gathering area – from 0 pp/m <sup>2</sup> to 5.3 pp/m <sup>2</sup> [7]	Gathering areas management (i.e.: localization, evacuees' wayfinding support) to limit $\rho_a \leq 3$ pp/m <sup>2</sup> (no physical interactions between peoples in waiting areas)
Evacuation curve ([pp] versus [s])	Graphical representation of number of arrived people against the simulation time	Minimizing the evacuation time by maximizing evacuees' flows towards few selected gathering areas;
Maximum evacuation time ( $t_a$ ) [s]	Evacuation time of the last individual reaching a gathering area – is equal of lower than the imposed simulation time	minimizing the waiting time in intermediate areas where evacuees can momentarily stop during their motion. Goals can be achieved by means of wayfinding strategies and tools
Total evacuation flows per gathering area ( $q_a$ ) [pp/s]	Linear regression of the evacuation curve, where $q_a$ is the related regression line slope – if $q_a=0$ , no evacuees arrived at the considered area	KPIs relate to the "overall" evacuation speed. Wayfinding strategies, interventions on buildings (e.g.: aimed at debris limitation on the paths) and urban layout design can maximize these values compared to the number of selected gathering areas
Normalized evacuation flow per gathering area ( $q_a^n$ ) [pp/s/m]	Ratio between $q_a$ and the sum of $L_a$ related to all the path gathering to the considered area – from $q_a^n=0$ pp/s/m (no evacuees arrived) to about 4.3 pp/s/m [7]	
Tortuosity (T) [-]	Ratio between the effective evacuation path length and the ideal one length – $\geq 1$ , evaluated as average value for the whole simulated sample [1]	It is a result of hesitation phenomena in evacuation path choice (e.g.: people can move without choosing a specific direction because of evacuation information lack), interactions between people/people and rescuers/people and debris; minimization of hesitation phenomena can be obtained by means of wayfinding solutions
Percentage of people not arrived at a gathering area ( $N_n$ ) [%]	Percentage ratio between the number of people not arrived at a gathering area and the total number of involved people (initial conditions) who can autonomously evacuate – from 0% to 100%	

Table 2. Key Performance Indicators (KPIs) to risk reduction strategies proposal: behaviours-affected evacuation phenomena.

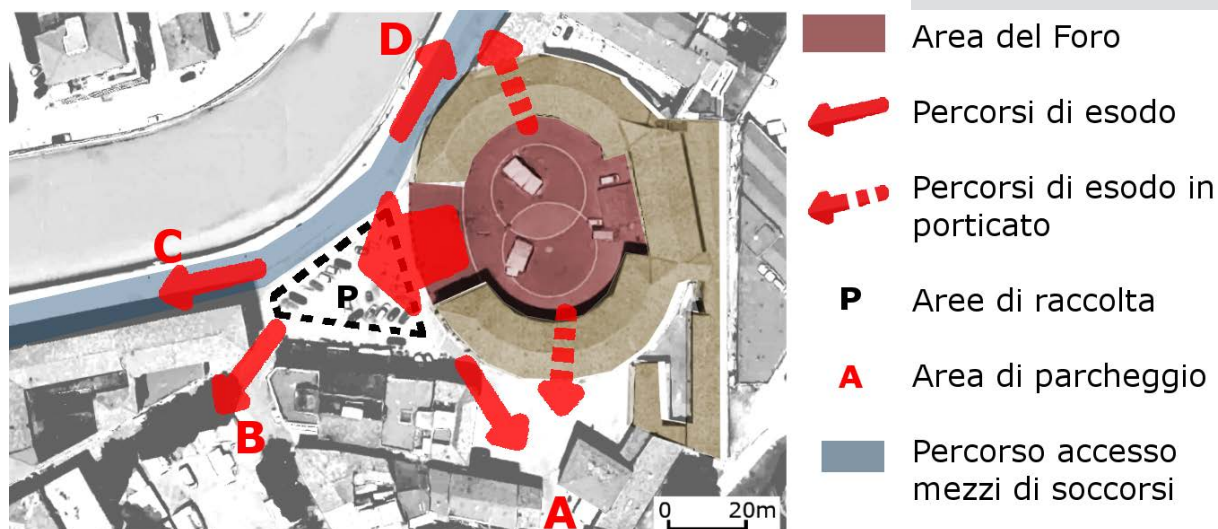


Figure 1. Preliminary detection of emergency layout in the case study: MGs-interested area (Foro), surrounding areas (parking areas) and gathering areas; evacuation path; rescuers' vehicle access routes. Image from Google Maps (last access 21/04/2018).

### 3.3. SIMULATION SCENARIOS AND RISK-REDUCTION STRATEGIES PROPOSALS

Behavioural evacuation criteria by EPES are assigned to each involved simulated individual, whose motion is influenced by decisions and movement of surrounding evacuees, historical built environment conditions and path features/post-event situations. Each evacuee moves in a “forces field”, according to the SFM approach in EPES, due to attractive (e.g.: social attachment; desire to reach a “safe” area) and repulsive (e.g.: avoid obstacles and debris; move far from buildings and debris) phenomena [1]. In particular, human behaviours in the “spontaneous” evacuation scenario is mainly characterized by the choice criterion of the evacuation path  $p$ , which is associated to the related path choice percentage  $P_p$  [%] according to Equation 1.  $P_p$  varies from 0 to 100% and depends on the following non-dimensional parameters: geometry ( $RH/L$ : ratio between path width and facing buildings height;  $d_s$ : ratio between geometric distances of shortest pedestrian’s evacuation path and the considered path  $p$ ); damages ( $A_{l,p}$ : ratio between the path area without debris and the total path area;  $L_p$ : ratio between  $p$  average width and the largest selectable path, by considering debris depth on them); social effects ( $N_p$ : ratio between the number of people moving along  $p$  and the total number of visible surrounding pedestrians); level of knowledge of urban spaces ( $M_p$ : memory effects on the considered path).

$$P_p = R_{LH} \cdot d_s \cdot L_p \cdot A_{l,p} \cdot N_p \cdot M_p \text{ [%]} \quad (1)$$

For each simulated evacuee, EPES solves Equation 1 when he/she is placed in a decision point (intersections between paths, as crossroads, and path plano-altimetric variations). In the case study, the main Foro entrance is the one from the area ( $P$ ) shown in Fig. 1: therefore, this path owns the maximum  $M_p$  value. If more available paths have the same  $P_p$ , an individual random choice is performed. If the path from which the evacuees comes from has a  $P_p$  greater than possible alternative ones, he/she can go back (for a maximum of 2 times). Based on EPES microscopic and probabilistic approach, a stochastic error (10%) is introduced to describe behavioral differences between individuals about the selection path criteria, as well as about the motion equation solving. According to Table 1 and Table 2, EPES outputs are combined to calculate KPIs, to evidence the critical evacuation process interactions and the bases for mitigation strategies definition, that are devoted to: selection of gathering areas; positioning and emergency actions of rescuers; design, architectural

del percorso  $p$  associando la relativa probabilità  $P_p$  [%] espresso in Equazione 1, in base a parametri adimensionali che variano tra 0 e 100: geometrici ( $RH/L$ : rapporto larghezza strada-altezza edifici;  $d_s$ : rapporto tra distanza dall’area di raccolta visibile più vicina e  $p$ ); di danno ( $A_{l,p}$ : rapporto tra area del percorso libera da macerie e area totale;  $L_p$ : rapporto tra larghezza media del percorso  $p$  considerando le macerie e quello più largo da scegliere); sociali ( $N_p$ : rapporto tra persone lungo  $p$  e totale delle persone visibili [ $pp$ ]); di conoscenza dei luoghi ( $M_p$ : effetto memoria [-]).

$$P_p = R_{LH} \cdot d_s \cdot L_p \cdot A_{l,p} \cdot N_p \cdot M_p \text{ [%]} \quad (1)$$

EPES risolve l’Equazione 1 per ogni persona simulata quando essa si trova ai punti di snodo (incroci e cambi di direzione del percorso). nel caso di studio, l’accesso privilegiato alla piazza avviene dal parcheggio antistante mostrato in Fig. 1, pertanto  $M_p$  è stato considerato massimo per il percorso correlato. Se più strade hanno stessa  $P_p$ , la persona sceglie casualmente tra le alternative. Se la strada di provenienza ha  $P_p$  maggiore rispetto alle alternative successive, la persona può tornare indietro (per massimo 2 volte). Inoltre, in base all’approccio microscopico e probabilistico di EPES, l’introduzione di un errore del 10% evidenzia possibili diversità comportamentali tra gli individui nella popolazione nei criteri di scelta che nell’equazione di moto.

Seguendo le indicazioni di Tabella 1, i valori di output in EPES sono combinati per calcolare i KPIs, al fine di derivare le criticità dell’esodo e provvedere alle basi di scelta progettuale relativi quali: scelta di aree di raccolta in cui convogliare la folla; azioni e posizionamento dei soccorritori; scelta e posizionamento di sistemi di wayfinding; indicazioni di micro-configurazione del layout nello spazio urbano storico. Tali strategie sono usate come input per la simulazione dello scenario in condizioni “assistite”. Sulla base dei KPIs descritti in sezione 3.1, le comparazioni tra scenari sono effettuate calcolando la variazione percentuale espressa nell’Equazione 2 [7]. La variazione viene minimizzata/massimizzata a seconda del KPI considerato, come suggerito dalla Tabella 1 e Tabella 2.

$$dKPI_{\text{assistita.spontanea}} = \frac{KPI_{\text{assistita}} - KPI_{\text{spontanea}}}{KPI_{\text{spontanea}}} \text{ [%]} \quad (2)$$

#### 4. RISULTATI

La Tabella 3 riassume le condizioni ambientali tramite i KPIs indicati in Tabella 1: esse sono le medesime per i due scenari (“spontaneo”/“assistito”) e dipendono solo da scenario fisico ed evento sismico considerato. Di seguito, vengono discussi i risultati di simulazione “spontanea” e “assistita” comparando i KPIs coinvolti.

#### 4.1 RISULTATI NELLA CONDIZIONE “SPONTANEA”

La Tabella 4 mostra i risultati per esodo “spontaneo”, secondo i KPIs considerati nello studio ed esposti in Tabella 1 e Tabella 2. Dai



implementation and positioning of wayfinding systems; microscale design interventions on the historical built environment outdoor layout. Such strategies are used as input for “assisted conditions” scenario simulations. Comparisons between “spontaneous” and “assisted” scenarios are carried out by calculating the percentage variation of each KPIs defined at section 3.1, as shown by Equation 2 [7]. The KPIs variation ( $dKPI_{assisted,spontaneous}$ ) is minimized or maximized depending on the considered KPI, as suggested by Table 1 and Table 2.

$$dKPI_{assisted,spontaneous} = (KPI_{assisted} - KPI_{spontaneous}) / KPI_{spontaneous} \quad [\%] \quad (2)$$

#### 4. RESULTS

Table 3 summarizes the environmental conditions through Table 1 KPIs: either scenarios (“spontaneous”/“assisted”) are characterized by the same values since they depend only on the built environment vulnerability and features, and on the considered seismic event. Results of “spontaneous” and “assisted” simulations are discussed below, by comparing the involved KPIs.

Gathering areas	A <sub>a</sub> [m <sup>2</sup> ]	Gross L <sub>a</sub> [m]	L <sub>a</sub> [m] apart from debris
A	350	6.5	3.5
B	800	8.0	3.5
C	600	12.0	11
D	275	11.0	10
P	1000	11.0	11

Table 3. Built environment characterization: KPIs for each gathering area in Fig. 1. The 4th column describes path width apart from debris. Hence, values should be decreased by 3.5m to include rescuers’ vehicle access lane.

##### 4.1. “SPONTANEOUS” EVACUATION RESULTS

Table 4 shows results for “spontaneous” evacuation scenario, according to the considered KPIs shown in Table 1 and Table 2. Simulation data evidence how people seem to spend a considerable time to reach the gathering areas because they seem to “spontaneously” prefer staying in the first free area near the Foro (area (P) of Fig.1).

As also shown by Fig. 2, evacuees remain in this area, which can be considered as “temporarily safe” [12] until a crowd density of about 3pp/m<sup>2</sup> is reached, which provokes physical contacts between individuals [8] and pushes them out of this area, after about 120s. People are not supported by clear wayfinding information: such conditions could hinder rescuers’ access to the areas, provoke a low q<sub>a</sub><sup>n</sup> and lead people to mainly move towards area (C), because they are directly visible from the Foro and from area (P). According

dati di simulazione emerge come le persone impiegano un tempo considerevole per raggiungere le aree di attesa poiché esse preferiscono “spontaneamente” rimanere nella prima area libera vicina alla piazza del Foro, ovvero l’area di parcheggio P di Fig.1. Come mostrato anche dalla Fig. 2, gli evacuanti restano in questa area considerata “temporaneamente sicura” [12] fino ad essere esposte a densità di affollamento 3pp/m<sup>2</sup>, tale da implicare contatti fisici tra loro [8] e a spingerli ad uscire da essa dopo circa 120s.

Qui, il fenomeno può essere di intralcio del traffico dei soccorritori nell’area di snodo principale. Il tempo impiegato è anche funzione dell’assenza di indicazioni chiare sui luoghi verso cui muoversi: questo elemento comporta anche un basso q<sub>a</sub>, nonché la scelta principale di moto verso l’area immediatamente visibile dall’uscita del Foro (C). La condizione di affollamento supera le 3pp/m<sup>2</sup> anche per tale area al termine dell’emergenza, implicando ulteriore interferenza nell’attesa dei soccorritori, poiché le persone possono occupare spazio significativo lungo la corsia di marcia di Fig. 1. Infine, le simulazioni evidenziano comunque che il 6% delle persone sembra preferire di rimanere nell’area P anche al termine della simulazione: perciò, potrebbero essere necessario indirizzare squadre

di primo intervento anche in questa area. Dall’analisi dei KPIs e da tali considerazioni comportamentali, la Tabella 3 propone una sintesi delle criticità del processo d’emergenza per indicare come migliorare la gestione dell’emergenza tramite condizioni “assistite”.

4.2 Risultati nella condizione “assistita” e comparazione tramite KPIs

In accordo alla Tabella 3, e con riferimento al caso di studio come da Fig. 3, le principali classi di strategie adottabili riguardano [7],[8],[12],[22]:

- pianificazione della posizione delle aree di raccolta, tenendo in considerazione danneggiamento, accesso dei soccorritori e possibilità di accogliere gli evacuanti in condizioni di non sovrappollamento. L’area A viene eliminata data la posizione nella fabbrica urbana, mentre la D viene interdetta per evitare l’interferenza con i soccorsi. Si codifica un’area temporanea presso P per il raggiungimento dell’area B, concentrando sistemi

to such phenomena, the crowd density of area (C) exceeds 3pp/m<sup>2</sup> at the simulation end, implying further interferences between waiting evacuees and rescuers, because people can occupy significant space along the related streets while gathering (see Fig. 1). Finally, results highlight how the 6% of simulated people seems to prefer remaining in area (P) even at the simulation end: first responders' immediate access to this area should be guaranteed by management procedures. According to such behavioural aspects and considered KPIs, Table 3 proposes a summary of critical aspects to outline how emergency management can be improved in "assisted" conditions.

Gathering area	Critical evacuation conditions	N <sub>a</sub> [%]	q <sub>a</sub> <sup>n</sup> [pp/s/m]	ρ <sub>a</sub> [pp/m <sup>2</sup> ]
A	Possible interference in area access due to L <sub>a</sub> value apart from building debris and due to possible rescuers' vehicle access to the area. This area is not used in a relevant way mainly because its position in the compact urban factory and its single access.	1	0.01	0.1
B	Possible interference in area access due to L <sub>a</sub> value apart from building debris and due to possible rescuers' vehicle access to the area. This area is underused in comparison to its position and dimension.	1	0.01	<0.1
C	Areas widely used because of their position in the urban fabric (direct access and visibility from the initial MGs position). People wait along the related streets, by provoking interferences with rescuers' access to the stricken areas. Possible overcrowding conditions (compare ρ <sub>a</sub> ). Evacuees reach these areas from P, so they should be guided towards other gathering points to diminishing overcrowding and increasing evacuation flows.	65	0.43	3.2
D		27	0.22	3.1
P	People spontaneously gather in this area and remain here because it is the nearest "safe" area. Wayfinding support here is not provided. Overcrowding conditions before 120s. Possible interferences between evacuees' motion and parking lots during MGs.	6	NA	>3.0
Overall data	2820 individuals arrived in 600s	94	q <sub>a</sub> = 4.7 pp/s	-

Table 4. "Spontaneous" evacuation results (NA=not applicable). See Table 3 to La and Aa-affected evaluations.

## 4.2 "ASSISTED" EVACUATION RESULTS AND COMPARISONS THROUGH KPI<sub>s</sub>

According to Table 3 evacuation issues outlines, main risk-reduction strategies could concern [7],[8],[12],[22]:

- *effective gathering areas selection in the evacuation plan, by considering buildings damages and rescuers' access, and by avoiding crowding conditions at the end of evacuation.* Area (A) is excluded from the evacuation plan layout because of its position within the urban fabric, while the evacuees' access to area (D) is blocked to limit interferences with rescuers. A temporary safe area is organized in area (P) so as to guide people towards area (B), through wayfinding systems and rescuers' support;
- *vulnerability-reduction interventions on buildings interfering with main evacuation paths and rescuers' access route.* They will be focused on building facing areas (B) and (C) and the related paths;
- *microscale layout design interventions, by modifying position and shape of temporary structures and parking areas.* The area (P) layout is modified to

di segnaletica e soccorritori nelle medesime zona;

- riduzione della vulnerabilità di edifici interferenti con i percorsi evacuanti e l'arrivo dei soccorritori. Gli interventi sono focalizzati sugli edifici prospicienti spazi e percorsi relativi alle aree B e C;
- micro-pianificazione del layout nei vuoti urbani, modificando la posizione degli ostacoli (i.e.: strutture temporanee, parcheggi). Per ridurre l'interferenza col deflusso degli evacuanti dal foro e convogliare il moto verso le aree B e C, l'area P è riconfigurata organizzando due direttrici di moto verso le stesse, mediante

disposizione delle diverse aree (es.: parcheggio) e l'uso di arredi urbani;

- soluzioni di wayfinding verso le aree di attesa in sinergia ai punti sopra elencati. Possono essere implementati: elementi (meglio se luminosi e acustici) integrati architettonicamente in arredi urbani e pavimentazione stradale, diffusi in P e puntuali agli ingressi delle aree (es.: su arredi fissi "alti" quali lampioni); squadre di soccorso posizionate in particolare nell'area P e per bloccare l'accesso alla zona D; indicazioni tramite personal devices, vista l'attitudine (confermata sperimentalmente [12]) ad interagire con essi anche durante l'emergenza per avere informazioni sul disastro; planimetrie di emergenza collocate nello spazio della manifestazione, con segnaletica correlata per l'area di raccolta;
- azioni dei primi soccorritori e delle squadre di emergenza presenti sul posto in occasione dell'evento (es.: servizio d'ordine). In particolare, il percorso di accesso dei soccorsi dall'esterno avviene dalla direttrice D. Le squadre sul posto, distribuite prevalentemente nel Foro e nell'area temporanea P supportano la popolazione durante l'abbandono della zona non sicura, attuando regolazione del deflusso (ordinato) verso le aree di raccolta, ed eventualmente

define two evacuation “channels” towards areas (B) and (C), by means of parking areas shaping and implementation of street furniture;

- *wayfinding solutions to guide evacuees towards the selected gathering areas, in combination to the aforementioned strategies.* Suggested solutions could concern: wayfinding signage systems (including luminous and acoustic ones) that can be architecturally implemented in street furniture and street pavements, placed in the area (P) and at the entrance of gathering areas (e.g.: integrated in street lights); first responders’ positioning, mainly in the area (P) and at the area (D) entrance (to block its use by evacuees); individuals’ support by personal devices, by taking advantages of their evacuees’ use to look for information about emergency conditions (according to real-world events analysis results [12]); evacuation plan maps placed in MGs areas, and gathering point signs implementation;
- *actions of first responders/rescuers (who reach the areas in case of emergency) and safety staff members (who support the MGs during its whole duration).* Rescuers’ access routes are organized along the access (D). Safety staff members are mainly placed inside the Foro and in the area (P), and they support the evacuees while they are moving towards the gathering areas, by guiding them, organizing evacuation flows and providing first medical aid to possible wounded individuals.

Such strategies are implemented in the “assisted” evacuation scenario and located as shown by Fig. 3. Table 5 provides a discussion of these solutions, by including their effectiveness in terms of considered KPIs (and their variations).

Finally, Fig. 2 shows how the implemented solutions can reduce the evacuation time of about 75%.

Gathering area	Critical evacuation conditions	N <sub>a</sub> [%]	q <sub>a</sub> [pp/s/m]	ρ <sub>a</sub> [pp/m <sup>2</sup> ]
<b>A</b>	Possible interference in area access due to L <sub>a</sub> value apart from building debris and due to possible rescuers’ vehicle access to the area. This area is not used in a relevant way mainly because its position in the compact urban factory and its single access.	1	0.01	0.1
<b>B</b>	Possible interference in area access due to L <sub>a</sub> value apart from building debris and due to possible rescuers’ vehicle access to the area. This area is underused in comparison to its position and dimension.	1	0.01	<0.1
<b>C</b>	Areas widely used because of their position in the urban fabric (direct access and visibility from the initial MGs position). People wait along the related streets, by provoking interferences with rescuers’ access to the stricken areas. Possible overcrowding conditions (compare ρ <sub>a</sub> ). Evacuees reach these areas from P, so they should be guided towards other gathering points to diminishing overcrowding and increasing evacuation flows.	65	0.43	3.2
<b>D</b>		27	0.22	3.1
<b>P</b>	People spontaneously gather in this area and remain here because it is the nearest “safe” area. Wayfinding support here is not provided. Overcrowding conditions before 120s. Possible interferences between evacuees’ motion and parking lots during MGs.	6	NA	>3.0
<b>Overall data</b>	2820 individuals arrived in 600s	94	q <sub>a</sub> = 4.7 pp/s	-

Table 4. “Assisted” evacuation results (NA=not applicable; - = not substantial). In brackets, KPIs variation in respect to “spontaneous” conditions are offered according to Equation 2.

*prestando primo aiuto medico ai feriti.*

*La Tabella 5 dettaglia le soluzioni adottate, delineandone gli effetti per ciascuna area di attesa in base ai KPIs considerati, e le variazioni rispetto alle condizioni “spontanee”. Infine, la Fig. 2 mostra come le scelte di progetto permettano l’arrivo di tutti gli evacuanti con una riduzione dei tempi massimi di circa il 75%.*

## 5. CONCLUSIONI

*Pianificare l’emergenza nel costruito storico necessita una significativa riflessione sul modo di utilizzo degli spazi secondo gli usi correnti, dal punto di vista funzionale e comportamentale. Tale assunto è significativo soprattutto per emergenze in spazi che vedono alte densità di presone che non conoscono spazi e procedure da seguire, come gli ambiti urbani ospitano grandi eventi, e quando il disastro modifica la condizione del costruito, come per il caso di eventi sismici. L’approccio al “Behavioural Design” intende assistere il progettista nella definizione di soluzioni per incrementare la sicurezza delle persone in questo tipo di ambiti, organizzando spazio e facilities sulla base del reale comportamento umano e tenendo in considerazione, in un’ottica “multi-hazard”, le interazioni tra condizioni al contorno di costruito, popolazione e calamità incorsa.*

*Per mostrare le potenzialità dell’approccio, questo contributo applica uno strumento innovativo di simulazione dell’emergenza a caso studio significativo. I risultati evidenziano come gli strumenti sviluppati in tale ambito possano supportare pianificatori e progettisti, di concerto con amministrazioni locali, nella procedura di analisi e di valutazione dell’impatto di soluzioni quali: management dell’emergenza/evacuazione; valutazione della possibilità di ospitare eventi in sicurezza in spazi urbani sensibili; interventi edili su edifici e di layout su spazi, per elementi posti in posizione strategica; soluzioni di wayfinding nel contesto urbano tramite componenti edili integrati architettonicamente. L’efficacia delle soluzioni è*

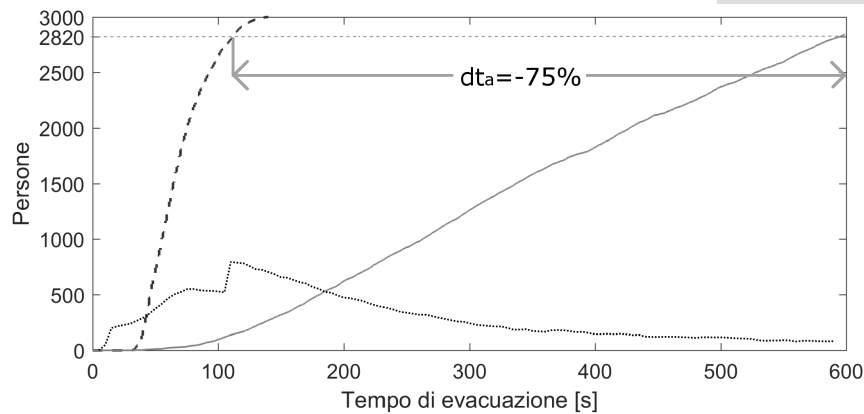


Figure 2. Overall evacuation curve for “spontaneous” (continuous gray line) and “assisted” (dashed black line) conditions. The dotted gray line refers to individuals remaining in the area (P) during the time, where people spontaneously and temporarily gather.

## 5. CONCLUSIONS

Emergency planning in historical built environment requires considerations on how to use spaces according to their current uses, from functional and behavioral standpoints. This need is significant especially when the built environment can host high density of people who do not know architectural spaces and emergency procedures (i.e. urban areas hosting mass-gatherings), and when the disaster modifies spaces conditions, as in the case of earthquakes. The “Behavioral Design” approach wants to assist safety designers in providing safety-increasing solutions in such scenarios, by organizing layout and facilities according to the probable interactions between boundary built environment conditions and users’ response, from a “multi-hazard” point of view.

This work is aimed at demonstrating the potentiality of such approach, and applies an innovative emergency simulator to a significant related case study. Results show how the developed tools can support planners and local administrations while analyzing possible emergency risks and assessing the impact of solutions concerning: emergency/evacuation management; possibility to host MGs in safe conditions, in particular urban areas; interventions on buildings and layouts placed in “strategic” urban fabric positions; architecturally integrated building components to promote individuals’ wayfinding support in the urban fabric. The solutions effectiveness is evaluated by using quantitative indices describing the main evacuation phenomena. Further methodological developments and demonstration activities are still necessary. Simulation scenarios should investigate intermediate conditions in terms of reference inputs (i.e. crowd density) and related adoptable solutions (to promote an organizational and economical sustainability). Applications to several significant typological historical urban

valutata con indici quantitativi per i fenomeni principali di evacuazione. Ulteriori sviluppi metodologici e dimostrazioni di efficacia sono necessari. Scenari di simulazione potranno indagare condizioni intermedie in input (es.: affollamento) e in termini di soluzioni adottabili (sostenibili organizzativamente ed economicamente) utili nei per i diversi input. L'applicazione a diversi casi tipologici (layout urbano storico ricorrente) potrà essere utile per definire linee guida condivise di pianificazione basate sul comportamento, prevedendo l'estensione di metodi e modelli a diversi tipi di disastri (es.: alluvione, attacco terroristico) e condizioni di affollamento (es.: residenti, turisti, visitatori occasionali).

layouts (also through case studies) could help in developing shared planning guidelines based on human behavior, by providing BD methods and models extensions to other types of disasters (e.g.: flood, terrorist act) and crowding conditions (i.e.: residents, tourists, visitors).

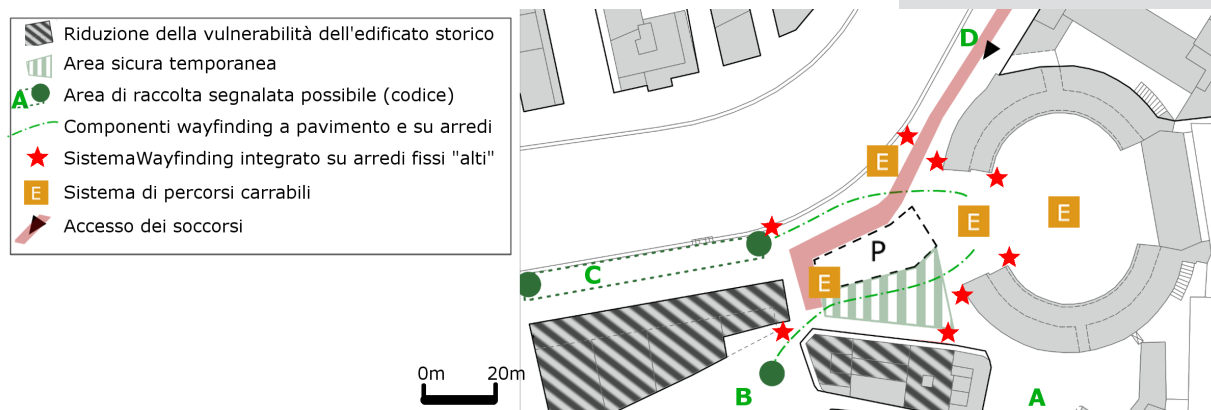


Figure 3. “Assisted” evacuation conditions and related strategies implementation for the case study (general plan).

## 6. REFERENCES

- [1] Bernardini G., An agent-based simulation model for earthquake pedestrians’ evacuation in historical urban fabric. *TEMA Tempo Architettura Matera*, 2015, vol. 1, pp. 1–6.
- [2] Maio R. [et al.], A critical discussion on the earthquake risk mitigation of urban cultural heritage assets. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2017.
- [3] Fatiguso F. [et al.], Resilience of Historic Built Environments: Inherent Qualities and Potential Strategies. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 180, pp. 1024–33.
- [4] Taneja L., Bolia Nomes B., Network redesign for efficient crowd flow and evacuation. *Applied Mathematical Modelling*, 2017.
- [5] Crociani L. [et al.], Multi-scale Simulation for Crowd Management: A Case Study in an Urban Scenario. In: *AAMAS 2016: Autonomous Agents and Multiagent Systems.*, 2016:147–62.
- [6] Wagner N., Agrawal V., An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster. *Expert Systems with Applications*, 2014, vol. 41, pp. 2807–15.
- [7] Bernardini G., *Fire Safety of Historical Buildings. Traditional Versus Innovative “Behavioural Design” Solutions by Using Wayfinding Systems*. 1st ed. Springer International Publishing, 2017.
- [8] Johansson A. [et al.], From Crowd Dynamics to Crowd Safety: A Video-Based Analysis. *Advances in Complex Systems*, 2008, vol. 11, pp. 497–527.
- [9] European Macroseismic Scale 1998. Grünthal G, ed. *European Center of Geodynamics and Sismology*, 1998, vol. 15.
- [10] Zanini M.A. [et al.], Post-quake urban road network functionality assessment for seismic emergency management in historical centres. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, vol. 13, pp. 1117–29.
- [11] Kappes M. S. [et al.], Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Natural Hazards*, 2012, vol. 64, pp. 1925–58.
- [12] Bernardini G., D’Orazio M., Quagliarini E., Towards a “behavioural design” approach for seismic risk reduction strategies of buildings and their environment. *Safety Science*, 2016, vol. 86, pp. 273–94.
- [13] Pilone E.[et al.], Municipal Emergency Plans in Italy: Requirements and drawbacks. *Safety Science*, 2016, vol. 85, pp. 163–70.
- [14] Commissione tecnica per la microzonazione sismica. *Manuale per l’analisi della condizione limite dell’emergenza (CLE) dell’insediamento urbano*. 1st ed. Roma, 2014.
- [15] circolare 7/6/17 Min. Interni n. 555/OP/0001991/2017/1; direttiva del Capo Dipartimento VVF, Soccorso Pubblico e Difesa Civile, prot. 11464 del 19/6/17; circolare 28/7/17 N. 11001/110(10) Min. Interni.

- [16] Bernardini G., Quagliarini E., D’Orazio M., Grandi eventi e terrorismo: la progettazione consapevole della sicurezza delle persone. *Antincendio*, 2017, vol. 12 anno 69, pp. 12–28.
- [17] Tai Cheng-An, Lee Yung-Lung, Lin Ching-Yuan, 2010. Urban Disaster Prevention Shelter Location and Evacuation Behavior Analysis. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2010, vol. 9, pp. 215–20.
- [18] DM 19/08/1996 coordinato con DM 6/3/2001 e DM 18/12/2012.
- [19] DM 18/3/1996 coordinato con modifiche e integrazioni introdotte dal DM 6/6/2005.
- [20] Emori N. [et al.], A Support System for Developing Tourist Evacuation Guidance. In: Kim HK, Amouzegar MA, Ao S, eds. *Transactions on Engineering Technologies*. Singapore: Springer Singapore, 2016:15–28.
- [21] Norgate S., Ormerod M., Landmarks in tourist wayfinding: a review. *Urban Design and Planning*, 2012, vol. 165, pp. 79–87.
- [22] DM 3/8/2015 coordinato con DM 8/6/2016 e DM 9/8/2016; circolare n° 3181 del 15/3/2016.
- [23] AA.VV., *Strategie di mitigazione del rischio sismico e pianificazione. CLE: Condizione Limite per l’Emergenza*. Bramerini F., Cavinato GP, Fabietti V, eds. *Urbanistica Dossier*, 2013, vol. 130, pp. 52.