

Improving human safety in cultural heritage buildings: experiments on effectiveness of wayfinding systems in a theatre

Gabriele Bernardini*, Marco D'Orazio, Enrico Quagliarini

Highlights

This paper involves individuals' safety in historical buildings in case of fire. An innovative continuous wayfinding system is proposed by using photoluminescent adhesive tiles placed on the paths floor. The system effectiveness is evaluated through evacuation drills in a significant case study (an Italian-style historical theatre). Evacuation times are reduced up to 30% while using the proposed system in respect to the traditional one, also because of the efficient addressing of secondary paths to occupants.

Abstract

Current fire safety regulations in historical buildings are generally limited to the number and dimension of exits and evacuation paths. This approach clearly clashes with preservation criteria because of the need of invasive layout modifications. On the contrary, a "behavioural design" approach could solve this conflict by proposing evacuation facilities based on effective human behaviours. This work proposes an innovative wayfinding system based on photoluminescent continuous signs. Experiments in a significant real world scenario demonstrate the possibility to considerably decrease the evacuation timing without building layout modifications.

Keywords

Building heritage fire safety, Historical theatres, PLM materials, Reversible systems for human safety and occupants' evacuation, Continuous wayfinding system

1. INTRODUCTION

Building Heritage is characterized by high hazard and vulnerability levels in relation to the buildings features (building layout and materials, including wooden structures) and to the occupants (high density levels, people who can be often foreign with architectural spaces, people with motion disabilities) [1–3].

Italian-style historical theatres [4] represent a good example of high fire risk historical buildings needed to be studied for decreasing their safety risk in respect to their architectural values. In fact, they: are portrayed as one of the most typologically common structures of our Country, as they are a historic product of 1700 and 1800 cultures; are characterized by typical wooden structures of particular historic and artistic value (i.e.: the upper circle box

Gabriele Bernardini

DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università di Ancona, via Brezze Bianche, Ancona, 60131, Italia

Marco D'Orazio

DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università di Ancona, via Brezze Bianche, Ancona, 60131, Italia

Enrico Quagliarini

DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università di Ancona, via Brezze Bianche, Ancona, 60131, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-071-2204246;
fax: +39-071-2204582;
e-mail: g.bernardini@univpm.it

and its slabs, the overhead scenery, the roofing trusses); are open to the public; have a very particular architectural shape and spaces distribution; contains hazardous elements and activities (e.g.: inflammable materials in storage rooms; old wiring); are often subject to massive and invasive modifications due to fire regulations. In case of fire, the occupants' evacuation is highly influenced by social features ("social attachment", information exchange [5]), interactions with smokes and related visibility/health problems [6], path choice depending on the familiarity with the building layout [7]. In particular, people generally move towards the known main entrance (because of memory effect [7]), while secondary exit paths are generally ignored, especially because of the low familiarity level with the structure and the inadequate characterization of signs. The same problems can be noticed in other historical buildings, because of the complex layout (with usual difficulties especially for Elderly), and contemporary use leading high occupants' densities (such as for cultural activities, e.g.: museums, theatres, concert halls).

Related current fire safety regulations are mainly based on dimensional requirements (width, length) of evacuation paths and exits (e.g.: adding evacuation stairs; opening new exit doors; introducing fire-proof walls and doors) [2,8,9], but denote a schematic approach in relation to effective human behaviours at all [10]. Hence, these spaces are often unable to supply an adequate safety level to them, while the related needed building layout modifications highly interfere with the preservation and the minimal intervention criteria.

On the contrary, our research is aimed at increasing the evacuation safety levels for occupants by designing systems (both building components, architectural interventions, smart devices definition) that can help these occupants during the whole evacuation procedure, by taking advantages of a "behavioural" point of view. The related "behavioural design" (BD) activities are: understanding human behaviours and their needs during the emergency process, and then define behavioural models for representing evacuation interactions; designing systems (mainly, wayfinding systems) for interacting with them during the evacuation; testing the proposed solutions through experiments or behavioural models (and related simulation tools).

2. STATE OF ART

The BD, which is oriented to both fire scenario definition and human behaviours analysis to provide not-invasive solutions for occupants' safety so as to preserve the architectural characteristics of the involved building, takes advantages of the Fire Safety Engineering (FSE) approach proposed by recent

1. INTRODUZIONE

Il problema della sicurezza antincendio negli edifici storici e con valore artistico si scontra spesso con quello dell'applicazione dei criteri di conservazione del patrimonio. Gli edifici storici, infatti, mostrano alti livelli di rischio e di vulnerabilità legati sia ai caratteri ad essi intrinseci (come tipologia strutturale, layout distributivo, materiali utilizzati), sia ai requisiti funzionali richiesti (come l'alta densità di occupanti che spesso non conoscono l'edificio, o presenza di persone con disabilità motoria) [1-3].

I teatri storici italiani [4] rappresentano un caso esemplare e diffuso a livello nazionale per alto valore del patrimonio, criticità di rischio incendio (per, ad esempio, strutture in legno, magazzini con materiale scenico infiammabile), alta densità di affollamento, e occupanti che normalmente non sono familiari con l'ambiente. In caso di incendio, l'evacuazione di questi spazi è particolarmente condizionata da aspetti sociali (attaccamento sociale, interpretazione delle informazioni [5]), interazione con l'incendio e i fumi da esso prodotti [6], scelta della via di fuga per persone che hanno scarsa conoscenza del layout distributivo [7]. In particolare, l'esodo si svolge specialmente verso un'unica direzione (attraverso la via di ingresso) [7], mentre le vie di fuga secondarie (solitamente laterali rispetto all'ingresso) non sono utilizzate né identificate; questo è vero a maggior ragione negli organismi storici, a causa del compatto sistema distributivo interno e della modalità di accesso all'edificio stesso.

La normativa attuale propone generalmente un approccio schematico limitato ad incrementare il livello di sicurezza aumentando il numero di vie di fuga e di uscite disponibili, nonché la loro larghezza [2,8,9]: l'adozione di questo approccio implica spesso modifiche invasive all'organismo edilizio originario (ad esempio, l'introduzione di nuove scale di emergenza, l'apertura e la chiusura di varchi con opere massive di compartimentazione antincendio). Allo stesso tempo, gli interventi correlati non sempre riescono ad aiutare le persone in caso di evacuazione, poiché l'approccio normativo, di tipo deterministico, non tiene in considerazione l'effettivo uso degli spazi in caso di emergenza e l'effettiva relazione comportamentale che intercorre tra uomo e ambiente [10].

Al contrario, un approccio di tipo comportamentale ("behavioural design") può essere in grado di offrire soluzioni (interventi architettonici, componenti edili e smart devices) in grado di fornire le informazioni utili a migliorare il processo di esodo, pur senza intervenire profondamente sul patrimonio edilizio. Il "behavioural design" si propone l'obiettivo di progettare lo spazio e i suoi componenti a seconda dell'effettivo comportamento dall'utente.

2. STATO DELL'ARTE

L'ottica metodologica del behavioural design nell'antincendio è riscontrabile nell'approccio ingegneristico

European fire safety guidelines [11] and the national regulations [12,13]. FSE is essentially based on the estimation of the Available Safe Egress Time (ASET) and the Required Safe Egress Time (RSET) [6,11]. ASET depends on evaluations of time-concentrations curves for toxic products, smoke and heat in a fire: its quantification involves the development of scenario modifications, and it is essentially based on fire characteristics (including its spreading) and building features [6]. The RSET estimation is founded on human behaviours and interactions between man and the surrounding environment (i.e.: alarm systems; wayfinding signs; building layout) [10], during both pre-movement phase [14] and effective motion phase [15]. The egress of all occupants has to be performed in conditions of not-exceeded tenability criteria in the building itself (ASET>RSET) [11].

Previous works [16–18] demonstrate how the use of efficient wayfinding systems could significantly decrease the occupants' egress time and so RSET, avoiding massive interventions on the building layout. These solutions can help people also in case of very low familiarity in respect to the architectural spaces or in particular environmental conditions (e.g.: darkness, smoke) [19]. Figure 1 resumes the main works about wayfinding system perception and influence: these researches are aimed at defining representation models and criteria for elements application in significant environment.

PLM wayfinding systems [22,23] generally show high levels of effectiveness in lights on, blackout and smoke conditions [28]. Furthermore, they can be rapidly applied, do not need any electrical supply, are composed by non-invasive elements (by guaranteeing a “reversible” intervention), and have a low level of maintenance. They can be distinguished between punctual systems (placed at paths intersections, plano-altimetric variations and over/near the exit doors) and continuous systems (at least 1 directional sign per 5 m of path) [34]. Minimal features of this signage systems are defined by regulations and guidelines [22,24]. They are really useful both along corridors and staircases because they could clearly outline the architectural spaces in low visibility conditions and in case of high density of evacuees along the path [35]. Different tests with high population sample and smoke conditions are performed [32,33], but investigations on PLM application in historical buildings (and, in particular, in theatres) are skipped.

Hence, this work would like to fill this gap by starting from the BD point of view. A continuous PLM wayfinding system based on human attitudes in evacuation is firstly defined. Then, the application to the fire evacuation safety in a significant historical Italian-style theatre is used to providing an evaluation about these innovative concepts of emergency wayfinding elements.

all'ingegneria antincendio (FSE), derivanti dalle linee guida europee [11] e recentemente integrate nel panorama normativo nazionale [12,13]. FSE definisce due grandezze di progettazione fondamentali [s]: Available Safe Egress Time (ASET) e Required Safe Egress Time (RSET) [6,11]. ASET dipende dai caratteri dell'incendio (e del suo sviluppo) e dell'edificio, inclusi materiali, tecniche costruttive e strumenti di contrasto: esprime il tempo entro il quale l'edificio continua a soddisfare i caratteri di sicurezza [6]. RSET è il tempo necessario ad evacuare la struttura da parte degli occupanti: è influenzato nella sua durata dal comportamento umano, ovvero dalle interferenze dell'individuo con le altre persone e con l'ambiente (spazi architettonico, sistemi di allarme, segnaletica ed altri elementi di wayfinding, prodotti dell'incendio) [10]. Il criterio progettuale deve considerare che ASET>RSET [11]: una delle strategie più efficaci è quella di intervenire per la riduzione di RSET velocizzando il processo di esodo sia nella parte di pre-movimento [14] che in quella di esodo effettivo [15].

Studi precedenti [16–18] hanno dimostrato che l'adozione di sistemi di wayfinding efficaci riesce a ridurre il tempo di esodo convogliando le persone lungo le uscite più indicate e aumentando la loro velocità, anche se le persone non conoscono l'edificio [19]. RSET viene quindi diminuito pur senza interventi invasivi sul layout edilizio. La Figura 1 riassume i principali lavori che si sono occupati della percezione degli elementi di wayfinding, in maniera tale da poter definire modelli di rappresentazione e criteri progettuali per design e collocamento nell'ambiente.

La segnaletica fotoluminescente (PLM) [20,21] ha dimostrato la sua efficacia ed efficienza essendo utilizzabile in diverse condizioni di illuminamento e presenza di fumi [22]; inoltre i sistemi PLM possono essere posti in opera rapidamente, senza bisogno di assistenze elettriche, offrono un intervento reversibile, e mostrano un basso livello di manutenzione. I sistemi PLM si distinguono in puntuali (posti ad intersezioni, cambi di direzione e uscite; sono i più utilizzati) e continui (almeno un segnale ogni 5m di percorso) [23], e i loro requisiti minimi sono stabili dalla normativa [21,24]. Essi sono utili sia in percorsi orizzontali che lungo le scale, grazie alla definizione dello spazio in condizioni di visibilità critiche, e particolarmente efficaci in caso di alta densità di occupanti [25].

Le precedenti attività sperimentali, pur coinvolgendo prove con campioni di popolazione numerosi [26,27], non hanno ancora investigato le potenzialità di questi strumenti di guida in edifici storici come i teatri. Questo studio intende definire un sistema di wayfinding basato sull'analisi comportamentale e testare la sua efficacia, in confronto alla segnaletica di emergenza tradizionale, su un teatro storico scelto come caso di studio rappresentativo.

3. METODOLOGIA

Il lavoro si è articolato in due fasi. La prima ha visto la definizione del

Experimental activity	Analysis	Reference
Individual behaviours	Sign identification distance: statistical distribution of identification distances in laboratory conditions (both lights on and blackout conditions); testing different signs and regulations (mainly: English and Chinese)	[20]
	Sign identification probability: modelling the influence of correct sign identification response depending on the angle between the individuals' motion and the sign position	[36]
	Influence on individual's evacuation procedure: in terms of evacuation speeds or timing and in terms of chosen path, by including: <ul style="list-style-type: none"> - Real world tests in smoke conditions (simulated by blind folds) - Virtual reality experiments 	[28] [17,37]
Evacuation drills	Influence on the overall evacuation procedure: in terms of evacuation speeds or timing and in terms of chosen path, by including: <ul style="list-style-type: none"> - Real world drills in smoke conditions (simulated by blind folds) - Questionnaires on signs liking 	[16,18,31] [35]

Figure 1. Behavioural design for wayfinding: main studies about influences during evacuation.

3. METHODS

The work is divided in two phases. The first phase offers the definition of the innovative wayfinding system by taking advantages of the BD approach (the question is: “which are the individuals’ needs during an evacuation in respect to the wayfinding elements?”). The second phase involves the analysis of system effectiveness in a real world application by performing fire drills in a historical theatre. The system effectiveness is evaluated by comparing key performance indicators (evacuation times, speeds and selected paths) for the proposed system and the traditional ones (punctual wayfinding systems as summarized by Figure 2).

3.1. WAYFINDING SYSTEM DEFINITION

The proposed wayfinding system is based on the preservation of the historical building features (i.e.: minimal intervention criteria, reversibility criteria for the intervention) and on the behavioural needs in emergency evacuation, as also summarized by Figure 1.

The wayfinding system should have a low impact in terms of application and maintenance: for this reason, adhesive PLM signs are chosen. They are characterized by a minimum value of average luminance in in-situ application of about 500mcd/m² after 2 minutes of blackout conditions and 300mcd/m² after 10 minutes, according to ISO 16069:2004 (minimal value ≥ 20 mcd/m²). From a behavioural point of view, previous works evidence how placing

sistema di wayfinding sulla base degli studi comportamentali, ovvero in ottica behavioural design. La seconda fase è stata l'analisi del sistema in un caso reale tramite prova di evacuazione in un teatro storico. L'effettività del sistema proposto è stata valutata confrontando gli indici caratteristici di prestazione nell'esodo (tempo, velocità e percorsi scelti) con il caso di evacuazione aiutata dalla segnaletica tradizionale.

3.1. DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI WAYFINDING

Il sistema di wayfinding proposto è definito sulla base, da un lato, dei requisiti funzionali legati al criterio di minimo intervento e reversibilità per la preservazione dei caratteri originali dell'edificio storico, e sull'altro, dei risultati degli studi in Figura 1 sul comportamento umano in emergenza e sul rapporto uomo-ambiente.

Il sistema deve prevedere un basso impatto a livello di messa in opera e manutenzione: per questo motivo sono stati scelti elementi adesivi foto luminescenti, caratterizzati da una luminanza minima dopo 2 minuti di almeno 500mcd/m² e dopo 10 minuti di 300mcd/m²; essi ottemperano alle direttive minime legate alla ISO 16069:2004 per gli elementi in opera (≥ 20 mcd/m²).

Da un punto di vista comportamentale, studi precedenti hanno evidenziato come componenti di tipo continuo collocati sul piano orizzontale sembrano elevare la velocità di fuga maggiormente rispetto alla segnaletica verticale, nonché a ridurre i tempi di scelta durante l'esodo [30]; inoltre essi risultano ancora visibili in caso di fumo nell'ambiente dovuto [16]. Infine, elementi di indicazione direzionali a forma di freccia e a V di

continuous wayfinding system on the floor could increase the evacuation speed (and so reduce the evacuation timing) [37]. About the directional indicator, a chevron with a dimension of about 50mm is generally characterized by an identification distance of about 18m in emergency lighting conditions, for different age of the tested sample [20]. In addition, previous experiments [20] confirm the efficiency of a white arrow on a green background, also according to current regulations [24]. The PLM signs are able to help people in both lights-on and blackout conditions because of the supplied proper spatial description and the possibility to be seen also in smoke conditions [31,35], especially when they are applied on the floor and on the staircases (here, recommended positions involves at least the steps and the handrail). Additional variations in path sections and configurations (e.g.: doors, geometrical bottlenecks) should be evidenced by similar PLM elements (e.g.: PLM strips).

The traditional wayfinding facilities are generally based on Punctual Systems (PS), and could involve PLM materials. On the contrary, this work proposes a Continuous System (CS) for wayfinding based on the previous behavioural aspects, and by adopting adhesive PLM signs. Figure 2 summarizes the elements for the existing PS system and for the innovative CS one. All proposed and used signs are in compliance with current safety regulations [24,34,38].

3.2. EXPERIMENTAL TESTS

An historical Italian-style theatre, the “Gentile da Fabriano” theatre (Fabriano, Italy), is chosen for the experiments. This Italian-style theatre was designed by Cleomene Luigi Petrini and Domenico Rossi and built between 1864 and 1884. It is a typical Italian horseshoe-shaped theatre with 721 seats on 4 tiers and a gallery, and it respects Italian regulations about fire safety [8].

In order to evaluate the systems effectiveness in case of significant occupants' density and to also fill the current state-of-art gap on collective evacuation drill in historical buildings, the experiment involves 92 individuals from 18-80 years (about half of the sample is composed by females). The parterre and first tier are used for the drill, as shown by Figure 3: the PS is placed on the right side, while the CS is placed on the left side. Figure 3 also identifies the cameras positions that are used for recording the experiments. Individuals' positions were randomly chosen by taking account a homogenous distribution for the two sides (by having similar positions in specular parts). The drill was performed with emergency lighting [39]. Before the experiments, lights are turned on for about 15 minutes in order to “recharge” the PLM signs (average illuminance in in-situ applications of about 40 lux).

dimensione 50mm sono generalmente identificati senza dubbio da parte delle persone fino ad una distanza di circa 18m in condizioni di visibilità di emergenza, investigando un campione significativo di popolazione di diverse età [28]; l'efficacia della combinazione di sfondo verde e elemento bianco indicata in normativa [24] è inoltre generalmente confermata dalle prove sperimentali [28]. I sistemi PLM inoltre sono efficaci sia in condizioni di fumo che di scarsa illuminazione, specialmente perché in grado di dare indicazioni sulla conformazione spaziale [25,31] qualora applicati a pavimento, e soprattutto sulle scale (almeno sui gradini; anche per fascia fermapiè, corrimano); eventuali restringimenti geometrici o elementi mobili di passaggio (porte, uscite) devono essere opportunamente segnalati da elementi anche lineari.

I dispositivi tradizionalmente impiegati negli spazi architettonici sono di tipo puntuale (Sistema Puntuale – SP), anche PLM, conformemente alle normative attuali in materia di sicurezza ed evacuazione di emergenza. Sulla base delle considerazioni comportamentali, si propone invece un sistema di tipo continuo basato su elementi PLM adesivi (Sistema Continuo – SC). La Figura 2 sintetizza gli elementi dei due sistemi testati in questa esperienza dal punto di vista grafico e quantitativo. Tutti i segnali usati e i materiali in essi impiegati sono conformi alle normative di settore [23,24,32].

3.2. TEST SPERIMENTALI

Per i test sperimentali, come elemento rappresentativo nel panorama dei teatri storici all'italiana, è stato scelto il teatro “Gentile da Fabriano” (Fabriano - AN), progettato da Cleomene Luigi Petrini e Domenico Rossi, e costruito tra il 1864 e il 1884. Il teatro, con pianta a ferro di cavallo, 4 ordini di palchi ed un loggione, può ospitare 721 persone, e soddisfa i requisiti prescrittivi delle leggi italiane in materia di prevenzione incendi [8].

Al fine di valutare l'efficacia del sistema in condizioni di affollamento significativo, e data soprattutto l'assenza in letteratura di prove collettive di evacuazione significative in edifici storici, si è messa in atto una prova di massa alla quale hanno partecipato 92 persone tra i 18 e gli 80 anni, equamente distribuite tra entrambi i sessi. Le persone sono state distribuite uniformemente in platea ed al primo ordine; la Figura 3 individua inoltre i punti di presa delle telecamere fisse che hanno registrato la prova, e mostra che in metà del teatro (parte destra guardando dal palco) sono stati collocati i segnali del SP, mentre nell'altra quelli del SC. La prova è stata condotta in condizioni di illuminazione di emergenza [33], mentre i materiali PLM sono stati caricati per almeno 15 minuti prima della prova in illuminamento ambientale medio di 40lux (luogo di messa in opera, ovvero lungo i percorsi nel teatro). I partecipanti sono stati invitati ad assistere ad uno spettacolo, e sono informati dell'evenienza di una prova di evacuazione durante l'evento, ma non è stato loro detto quando essa si sarebbe svolta. Ai partecipanti è

Voluntary participants are invited in the theatre for a performance. For safety issues, the drill is announced, but starting time is not addressed. No previous information about evacuation paths is given to participants. Emergency lighting starts working, while the fire alarm rings and the voice alarm announces: “Please, the evacuation drill is started. The audience is invited to not hurry and to exit the theatre by following the wayfinding systems”. Each person is allowed to choose the evacuation path without changing the wayfinding system. The evacuation drill ended when the last occupant exited the theatre.

stato detto che, al momento dell'avvio della sirena d'allarme e del successivo allarme vocale, esse avrebbero dovuto evacuare l'edificio seguendo il percorso preferito, ma senza cambiare sistema di guida, ovvero limitando le scelte alla propria metà teatro di origine.

Per ciascuno dei due sistemi, i dati raccolti riguardano velocità di fuga, tempi totali di esodo (con confronto quantitativo tra i due sistemi), e percorso scelto (con confronto semi-quantitativo grazie alle riprese delle telecamere). Infine ai partecipanti è stato chiesto tramite questionario se il sistema da loro usato fosse stato utile durante esodo (principalmente per la scelta della via di fuga) e se





Composing element: dimensions; description; positions; references		CS	PS
directional PLM sign applied on the wall (height: 2m), placed at directional changes and over the exits; minimal dimensions: 200x200mm; arrow dimension: 35mm; green background CIE Yxy=(16.33, 0.25, 0.53); references: [24,38]		X	X
Adhesive round PLM sign, applied on the floor (at the middle of the corridors); dimensions: diameter: 10cm; arrow: 50mm; distance between two consecutive elements: 70cm (7 signs for 5m); green background CIE Yxy=(16.33, 0.25, 0.53); references: [24]		X	
PLM strip applied on the staircase steps (in order to evidence the steps itself); dimensions: 2,5x60cm		X	
PLM strip applied on evacuation handle (in order to evidence the exit); dimensions: 2,5x60cm		X	X

Figure 2. Elements composing the tested wayfinding systems: description; figures; presence in the CS and in the PS.



Figure 3. Application (position) of PS (right side of the theatre) and CS (left side of the theatre) during the evacuation drill.

Evacuation speeds, time and path choices are collected in order to compare PS and CS effectiveness. Data are retrieved by analysis videotapes from applied fixed cameras. In addition, at the end of the drill, individuals are asked to fill out a questionnaire about their own evacuation wayfinding system liking (“Did you find the system helpful in evacuation choices?”).

4. RISULTATI

Figure 4 shows, from qualitative and quantitative point of views, how the CS increases the safety level for the building occupants during the evacuation. In fact, evacuation times are reduced up to 27%, as a counterweight to average evacuation speed increasing (up to 30%). The pre-movement phase [14] seems to not influence the evacuation timing for the two systems, because the 90% of population starts its evacuation at the voice alarm. CS effectively supplies a clear information to evacuees, as shown by Figure 4 high percentage of people who appreciate the system (according to questionnaires answers). The CS high effectiveness is mainly due to the possibility of the description of architectural spaces also in low visibility conditions. Figure 5 shows how,

avessero avuto problemi di visibilità ed identificazione delle informazioni da esso fornite.

4. RISULTATI

La Figura 4 dimostra come da un punto di vista quantitativo e qualitativo il sistema continuo proposto (SC) riesca effettivamente ad incrementare il livello di sicurezza delle persone in evacuazione. Infatti si ottiene una riduzione significativa (fino al 27%) del tempo di evacuazione, corrispondente ad un aumento della velocità di esodo. Il tempo di pre-movimento [14] non ha inciso sulle differenze di tempo totale registrate tra i due sistemi, in quanto il 90% circa del campione ha comunque iniziato l'evacuazione all'annuncio vocale di evacuazione. Il sistema SC riesce effettivamente a dare un'informazione chiara alle persone sulla direzione da seguire, come sottolineato dall'alto livello di gradimento degli stessi: fattore cardine è da un lato la fotoluminescenza degli elementi, che in condizioni di illuminamento ridotto ha aumentato la possibilità di comprendere le informazioni, e dall'altro l'aver un percorso chiaramente marcato in maniera continua. La Figura 5 mostra come SC riesca inoltre a far individuare agevolmente alle persone le vie di fuga secondarie: il 90% delle persone che hanno utilizzato il SP partendo dalla platea hanno deciso di utilizzare l'uscita centrale

while using the CS, people easily move towards secondary paths. In particular, at the parterre, the 90% of occupants in PS conditions move towards the main entrance, because of significant memory effect influence. These people are asked to explain the reason of this choice: the 33% of the sample uses this path because of the familiarity to this path (memory effect) or the presence of many people moving along it (herding behaviours) [40]. On the contrary, more than the 30% of sample for CS choose the lateral parterre door. In this way, overcrowding phenomena along the main path (the one of the main entrance) are sensibly reduced and evacuation times could be significantly reduced.

principale; al contrario, per il SC si è notato che oltre il 30% delle persone sceglie invece l'uscita laterale alla platea, andando a decongestionare il percorso principale). Chiedendo ai partecipanti il motivo della scelta durante il questionario, il 33% di chi ha usato il SP ha ammesso di aver scelto la via principale perché era quella da cui era entrato (effetto memoria) o perché stava seguendo il flusso principale di evacuazione (effetto gregge) [34].

5. CONCLUSIONI

Il rischio incendio negli edifici storici è particolarmente sentito per i caratteri insiti dell'edificio, nonché

Quantities in motion		PS	CS	$\Delta T(\%)$	$\Delta V(\%)$
T – evacuation time (s)	average	91	68	-25.2%	
	maximum	167	122	-26.9%	
V – evacuation speeds (m/s)	average	0.28	0.37		+30.4%
	maximum	0.47	0.60		+31.6%
Questionnaires answers					
Signs system were:					
	Useful during the evacuation	34%	87%		
	Hard to be seen and understood	33%	5%		

Figure 4. Differences between quantitative and qualitative results for the PS and the CS.



Figure 5. Tracing the evacuation paths for the parterre.

5. CONCLUSIONS

Fire risk in the historical building is a very important issue because of intrinsic vulnerability aspects, the complex architectural layout, and the presence of many people (who are not familiar with the space itself). The impact of a fire would be able to provoke very large damages not only to the heritage but also to the occupants. Current regulations propose massive interventions on the building configuration in order to increase individuals' safety level. On the contrary, this goal could be easily gained by applying innovative wayfinding systems that are perceived and used by people in a correct and efficient way.

This study proposes a robust innovative wayfinding system by taking advantages of a "behavioural design" approach: understanding individuals' needs; developing solution to accomplish their requests; testing the solutions by validations activities; defining rules for describing human interactions with the proposed solution, so as to also develop models for their simulation.

The proposed system is based on continuous PLM signs, which: could give an efficient support to evacuating pedestrians also in low visibility conditions (black-out, smoke presence); could offer a good description of the architectural spaces to occupants also in low visibility conditions; is also easy-to-apply and remove because composed by adhesive elements and no supplies are needed.

An Italian-style historical theatre is chosen as a representative case study within historical buildings in order to verify the proposed system effectiveness in respect to current punctual exit signs. This kind of buildings has significant problems in case of evacuation because of the high occupants' densities, the large presence on the national territory and the current use of these buildings.

Results show how evacuation times significantly decrease in collective drills (up to -27%) while occupants are guided by the proposed system. Advantages are essentially due to the clear path and spaces identification given by the short distances between two consecutive signs. Hence, this study generally suggests that wayfinding systems on existing buildings should involves a smaller distance between signs in both corridors and stairs, and the correct marking of all plan layout variations (path direction variations, stair-steps). CS can be easily introduced in historical Italian-style theatre in order to decrease the total evacuation time. According to the innovative performance-based fire safety engineering, this means an increasing of the occupants' safety level. The absence of supply and physical modifications of the building allows to effectively preserve architectural and cultural heritage features.

Future researches should enlarge the sample dimension of similar innovative systems in historical buildings, by also including other buildings typologies

per la presenza di persone all'interno di uno spazio spesso complesso e non perfettamente conosciuto. Se un incendio si presentasse in un edificio storico, i danni sarebbero ingenti sia per il patrimonio artistico e culturale sia per gli occupanti. La normativa adotta misure di sicurezza invasive per garantire alle persone di poter abbandonare il luogo in sicurezza: questo implica la messa in discussione dei caratteri specifici dell'organismo edilizio e la sua corretta conservazione. Al contrario, gli strumenti del behavioural design riescono a offrire soluzioni a basso impatto, reversibili, e soprattutto efficienti per la sicurezza delle persone. Il presente studio si è occupato della definizione di un sistema di wayfinding progettato sulla base dei requisiti comportamentali e non invece ispirato alla logica deterministica secondo cui è l'elemento (e lo spazio) a produrre un effetto d'uso (anche sociale) sull'individuo. Il sistema è di tipo fotoluminescente per essere visibile anche in condizioni di bassa visibilità ed illuminamento ambientale critico, e continuo per dare un'informazione costante lungo il tragitto; esso inoltre è facilmente rimovibile e non richiede assistenze murarie o elettriche. Come caso di studio, si è scelto quello significativo di un teatro storico all'italiana, poiché tale tipologia di edificio storico, molto diffuso sul territorio nazionale, vede implicito sia un potenziale rischio incendio elevato che un'alta densità di occupanti esposti. Sebbene le persone non siano avvezze al sistema proposto, non essendo questo applicato normalmente negli edifici, la prova collettiva di evacuazione ha dimostrato un miglioramento nel processo di evacuazione con una riduzione massima dei tempi di esodo del 27% e un incremento della velocità fino al 30% rispetto ai normali sistemi di wayfinding puntuali. A controprova, il livello di gradimento secondo questionario ai partecipanti è stato elevato. Pertanto, visti i canoni di compatibilità con l'intervento reversibile sulla struttura e l'aiuto fornito in evacuazione, si ritiene che il sistema possa essere proposto per incrementare il livello di sicurezza negli edifici storici. Naturalmente ulteriori prove potranno suffragare l'effettiva efficacia del sistema su grande scala. Il presente studio dimostra inoltre le capacità dell'approccio di progettazione orientato dal behavioural design: il sistema proposto infatti si conforma alle necessità e ai comportamenti umani, e riesce quindi a sfruttare i benefici della risposta degli individui. L'importanza di comprendere e codificare il comportamento umano effettivo in situazioni ambientali di stress (come può essere quella dell'emergenza evacuazione) è cruciale quindi per una corretta progettazione dello spazio. Nel campo affrontato, si invita a future ricerche sulla percezione dei segnali di evacuazione e sui criteri di scelta dei percorsi di esodo, attraverso prove reali tradizionali, test in realtà virtuale, esperimenti individuali con strumenti di monitoraggio dell'attività umana innovativi e oggettivi (come i sistemi EEG), analisi di casi reali. Infine, il livello successivo dovrà necessariamente integrare le analisi

and uses (e.g.: museums, hospitals). Furthermore, some investigations should focus on the optimization of the systems (in terms of signs position, and number minimization), by taking advantages of deeper experimental activities about human behaviours and perception of the wayfinding elements. To this purpose, innovative techniques that directly measure typical individual quantities to these tasks (e.g.: brain activities, pupils motion) should be involved. Finally, a higher level of aesthetic design and architectural integration of sign should be reached, for mainly reducing the “visual” impact of wayfinding systems in normal conditions use. The definition of low-impact wayfinding technologies could jointly involve the integration between signs systems and sensors-based technologies (both about occupants’ behaviours and building response to fire).

6. REFERENCES

- [1] Biao Z, Xiao-meng Z, Ming-yong C., Fire protection of historic buildings: A case study of Group-living Yard in Tianjin. *Journal of Cultural Heritage* 2012;13:389–96. doi:10.1016/j.culher.2011.12.007.
- [2] Confederation of Fire Protection Associations Europe. *Managing Fire Protection of Historic Buildings*. 2013.
- [3] Lena K. [et al.], How Do People with Disabilities Consider Fire Safety and Evacuation Possibilities in Historical Buildings? - A Swedish Case Study. *Fire Technology* 2010;48:27–41. doi:10.1007/s10694-010-0199-0.
- [4] Quagliarini E., *Wooden structures in Italian style theatres between the 18° and 19° century (in Italian)*. Firenze, Italy: 2008.
- [5] Nilsson D., Johansson A., Social influence during the initial phase of a fire evacuation—Analysis of evacuation experiments in a cinema theatre. *Fire Safety Journal* 2009;44:71–9. doi:10.1016/j.firesaf.2008.03.008.
- [6] Chu G., Wang J., Wang Q., Time-dependent fire risk assessment for occupant evacuation in public assembly buildings. *Structural Safety* 2012;38:22–31. doi:10.1016/j.strusafe.2012.02.001.
- [7] Weckman H., Lehtimäki S., Männikkö S., Evacuation of a theatre: exercise vs calculations. *Fire and Materials* 1999;23:357–61. doi:10.1002/(SICI)1099-1018(199911/12)23:6<357::AID-FAM711>3.0.CO;2-5.
- [8] Italian Government. DM 19/08/1996: Fire safety criteria for entertainment public spaces (Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio dei locali di intrattenimento e di pubblico spettacolo). 1996.
- [9] Ministry of Interior (Italy). D.M. 20-05-1992 n. 569 - Fire safety in historical buildings used as museum and art galleries. 1992.
- [10] Kobes M. [et al.], Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal* 2010;45:1–11. doi:10.1016/j.firesaf.2009.08.005.
- [11] Confederation of Fire Protection Associations Europe. *Fire safety engineering concerning evacuation from buildings - Guidelines No 19:2009*. CFPAGEUROPE; 2009.
- [12] Ministry of Interior (Italy). DM 9-5-2007 - fire safety engineering (Decreto del Ministro dell’interno 9 maggio 2007 - Direttive per l’attuazione dell’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio). 2007.
- [13] Ministry of Interior (Italy). DM 03/08/2015: Fire safety criteria (Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell’articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139.). 2015.
- [14] D’Orazio M. [et al.], Design and experimental evaluation of an interactive system for pre-movement time reduction in case of fire. *Automation in Construction* 2015;52:16–28. doi:10.1016/j.autcon.2015.02.015.
- [15] Proulx G., Movement of people: the evacuation timing. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, vol. Section Three, Chapter 13. 3rd edition, 2002, p. 342–66.
- [16] Kobes M. [et al.], Way finding during fire evacuation; an analysis of unannounced fire drills in a hotel at night. *Building and Environment* 2010;45:537–48. doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.004.
- [17] Vilar E. [et al.], Effects of competing environmental variables and signage on route-choices

del comportamento con strumenti che siano in grado di comprendere cosa le persone fanno in tempo reale, ed adattarsi ai loro cambiamenti fornendo risposta immediata alle loro esigenze (ad esempio, tramite lo sviluppo di reti di sensori e attuatori).

- in simulated everyday and emergency wayfinding situations. *Ergonomics* 2014;57:511–24. doi:10.1080/00140139.2014.895054.
- [18] Proulx G., Bénichou N., Photoluminescent Stairway Installation for Evacuation in Office Buildings. *Fire Technology* 2009;46:471–95. doi:10.1007/s10694-009-0102-z.
- [19] Benthorn L., Frantzich H. kan, *Fire alarm in a public building: How do people evaluate information and choose evacuation exit? Fire alarm in a public building: How do people evaluate information and choose evacuation exit?* Department of Fire Safety Engineering Lund Institute of Technology Lund University; 1996.
- [20] Tonikian R. [et al.], *Literature review on photoluminescent material used as a safety wayguidance system*. National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction 2006.
- [21] DIN. DIN 67510, Photoluminescent pigments and products. 2009.
- [22] Jeon G.-Y., [et al.], Evacuation performance of individuals in different visibility conditions. *Building and Environment* 2011;46:1094–103. doi:10.1016/j.buildenv.2010.11.010.
- [23] ISO. ISO 16069, Graphical symbols - Safety signs - Safety way guidance systems (SWGS). 2004.
- [24] Italian Organization for Standardization (UNI). UNI 7543:2004 - Safety colours and safety signs. 2004.
- [25] Proulx G. [et al.], *Assessment of Photoluminescent Material During Office Occupant Evacuation*. National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction 1999.
- [26] Purser D.A., Bensilum M., Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations. *Safety Science* 2001;38:157–82.
- [27] Xudong C. [et al.], Study of announced evacuation drill from a retail store. *Building and Environment* 2009;44:864–70. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.012.
- [28] Wong L.T., Lo K.C., Experimental study on visibility of exit signs in buildings. *Building and Environment* 2007;42:1836–42. doi:10.1016/j.buildenv.2006.02.011.
- [29] Nassar K., Sign Visibility for Pedestrians Assessed with Agent-Based Simulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2011;2264:18–26. doi:10.3141/2264-03.
- [30] Vilar E., Rebelo F., Noriega P., Indoor Human Wayfinding Performance Using Vertical and Horizontal Signage in Virtual Reality. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 2012:1–15. doi:DOI: 10.1002/hfm.15.
- [31] Jeon G.-Y., Hong W.-H., An experimental study on how phosphorescent guidance equipment influences on evacuation in impaired visibility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2009;22:934–42. doi:10.1016/j.jlp.2009.08.008.
- [32] Italian Government. DLgs 9/4/2008 n.81: Annex XXV - General requirements for emergency signs (allegato XXV, Prescrizioni generali per i cartelli segnaletici). 2008.
- [33] Italian Organization for Standardization (UNI). UNI EN 1838:2000, Lighting applications. Emergency lighting. 2000.
- [34] Lakoba T.I., Kaup D.J., Finkelstein N.M., Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution. *Simulation* 2005;81:339–52. doi:10.1177/0037549705052772.