

IMPLEMENTAZIONE DEI GAME ENGINE NELLA VERIFICA D'USO DEGLI EDIFICI ESISTENTI

VERIFICATION OF EXISTING BUILDINGS USES WITH GAME ENGINE

Antonello Sanna*, Angelo Luigi Camillo Ciribini,
Giuseppe Martino Di Giuda***, Gianluca Gatto*,
Valentina Villa****, Emanuela Quaquero*,
Lavinia Chiara Tagliabue** and Giuseppe Desogus***

* Università degli Studi di Cagliari - Cagliari, Italia.
asanna@unica.it, gatto@diee.unica.it,
equaquero@unica.it, gdesogus@unica.it

** Università degli Studi di Brescia - Brescia, Italia.
angelo.ciribini@unibs.it, lavinia.tagliabue@unibs.it

*** Politecnico di Milano - Milano, Italia. giuseppe.digiuda@polimi.it,

**** Politecnico di Torino - Torino, Italia. valentina.villa@polito.it

Abstract

La capacità degli edifici storici di accogliere nel tempo differenti funzioni ha permesso, di fatto, di conservarli e adattarli agli usi più diversi. La necessità sempre più attuale di procedere ad “adeguamenti normativi” rischia di rendere questo processo molto complesso se letto nei termini delle problematiche relative alla conservazione. Il lavoro di ricerca intrapreso sul Padiglione Mandolesi ha l’obiettivo di indagare puntualmente le problematiche appena accennate, con la complicazione di dover lavorare alla conservazione del Moderno. Qui si propone di utilizzare, in alternativa alla verifica meccanicistica della rispondenza ai requisiti normativi legati alla gestione delle emergenze, una metodologia alternativa legata alla modellazione informativa e all’uso dei game engine attraverso la modellizzazione dei comportamenti umani. Lo studio è stato condotto utilizzando i due modelli di simulazione: agent based e narrative driven. Questi modelli presentano entrambi delle limitazioni: la simulazione Agent based lascia un’eccessiva libertà agli agents, rendendoli solamente reagenti al mondo esterno e all’interazione con gli altri utenti, mentre la modellazione narrative driven fornisce una riproduzione del comportamento lungo una sequenza di attività predefinite e fissate, senza possibilità di modificare il proprio percorso, rendendo pressoché impossibile l’analisi delle condizioni d’uso di uno spazio. La soluzione adottata deriva dall’uso contemporaneo dei due sistemi: la modellazione agent based permette la dovuta arbitrarietà agli agents, i quali tuttavia devono sottostare ad un livello di controllo più rigido e predeterminato che impone la scelta, in maniera probabilistica, tra attività presenti all’interno di una sequenza predefinita secondo la logica narrative driven. I risultati sono particolarmente significativi e “certificano” come l’uso di tecniche quali quelle della crowd simulation possano essere alternative e integrative alle verifiche standard, validando modelli d’uso dinamici degli edifici.

Abstract

The capability of historic buildings to accommodate and adapt with different functions over time, made it possible to preserve and adapt them to the most varied uses. The current need is to proceed to “regulatory adjustments” that impact on the structural parts, the envelope, and safety of use. This process risks becoming much more complex with conservation issues. This research work, validated on the Mandolesi Pavilion, aims to promptly investigate the problems described above, taking into consideration the complication of working on the conservation of the Modern. As an alternative to the more mechanical verification of compliance with the regulatory requirements linked to the management of emergencies, an alternative methodology is proposed, that is the dynamic one, linked to information modeling and the use of game engines through the modeling of human behaviors. The study was conducted using the two simulation models: agent based and narrative driven. Both models have limitations. The Agent-based simulation leaves agents freer, making them only reacting to the outside world and interacting with other users; the narrative driven modelling, instead, provides a reproduction of the behavior, according to a sequence of predefined and fixed activities, without giving them the possibility to modify their own path. The latter makes it almost impossible to analyze the conditions of use of a space. The solution adopted derives from the simultaneous use of the two systems: the “agent based” modelling, allows the due arbitrariness to the agents, which must undergo a more rigid and predetermined level of control. The choice is set in a probabilistic way, between activities present within a predefined sequence according to the “narrative driven” logic. The results are particularly significant and “certify” how the use of techniques, such as crowd simulation, can be alternative and integrated to standard checks. This system validates the dynamic use of buildings models, thus allowing to significantly reduce the impact on existing buildings.

Keywords: building and design techniques, BIM, crowd simulation, validation, emergency, conservation.

1. Introduzione

Il contesto italiano in materia di prevenzione e protezione incendi prevede norme verticali, riferite a singoli tipi di edificio, attività o settore, e norme orizzontali, applicate alla maggior parte degli edifici. Tra queste ultime si inserisce il D.P.R. 10/03/1998 “Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell’emergenza nei luoghi di lavoro”. Esse contengono prescrizioni e limiti normativi per i quali è obbligatorio il rispetto tanto per edifici di nuova costruzione quanto per l’adeguamento normativo di edifici esistenti. Quest’ultimo può risultare di complessa applicazione nel caso di edifici storici in quanto

da una parte può risultare onerosa l'integrazione di aspetti impiantistici e di prestazione dei materiali, dall'altra l'adattamento di impianti planimetrici esistenti alle prescrizioni normative può non essere sufficiente per garantire la sicurezza degli occupanti nel caso d'insorgere di emergenze. Si è quindi indagata la possibilità di sfruttare analisi integrative con approccio di tipo dinamico ad implementazione della normativa tradizionale, allo scopo di verificare l'effettivo raggiungimento delle condizioni di sicurezza in caso di emergenze in fabbricati storici. Il D.M. 09/05/2007, "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio", definisce gli aspetti procedurali e i criteri da adottare nell'applicazione dell'approccio ingegneristico-prestazionale alla sicurezza antincendio, la Fire Safety Engineering. La FSE, per la prima volta introdotta dalla norma ISO TR 13387, consente, di definire soluzioni idonee al raggiungimento di obiettivi progettuali mediante analisi di tipo quantitativo. L'approccio prestazionale non si occupa, quindi, di verificare il rispetto della normativa, bensì di valutare computazionalmente, tramite modelli di calcolo e simulazioni, la rispondenza del progetto antincendio ai requisiti stabiliti, ossia a soglie prestazionali come temperatura e valori di affollamento. Secondo quanto riportato nel D.M. 09/05/2007 l'utilizzo della FSE è preferibile "in presenza di insediamenti di tipo complesso o a tecnologia avanzata, di edifici di particolare rilevanza architettonica e/o costruttiva, ivi compresi quelli pregevoli per arte o storia" a causa della maggiore onerosità e complessità del metodo e, di conseguenza, l'applicazione è indirizzata a situazioni difficilmente valutabili con un approccio tradizionale. Il decreto, inoltre, si inserisce in un processo ad ampia scala che sta investendo il settore normativo italiano, ovvero la transizione da una normativa prescrittiva ad una normativa di tipo prestazionale e valutativo, di provenienza tipicamente anglosassone. Risulta fondamentale, per una corretta valutazione delle operazioni di evacuazione, considerare il comportamento umano come variabile di progetto. L'impiego allo scopo di simulazioni reali di evacuazione è stato escluso in quanto spesso i soggetti coinvolti tendono a sottovalutare l'importanza della simulazione, riducendone di fatto l'utilità [1]. L'analisi del comportamento umano delle folle in situazioni di reale emergenza, inoltre, risulta molto complesso in quanto può prevedere l'esposizione di persone fisiche a condizioni ambientali potenzialmente pericolose [1]. È stata, di conseguenza, privilegiata l'implementazione di simulazioni computerizzate delle evacuazioni nel progetto dell'adeguamento antincendio. Queste analisi, che tengono in considerazione comportamenti sociali e interazioni tra soggetti, rappresentano un'alternativa e un'integrazione al tradizionale progetto antincendio per verificare le conseguenze di eventi rischiosi sugli utenti, senza prevedere alcun pericolo per persone o cose. Le simulazioni computerizzate per l'analisi delle evacuazioni, oggetto di studio negli scorsi decenni per l'industria dei videogiochi e per la progettazione di percorsi pedonali in ambito urbano [1], se effettuate in fase progettuale, permettono di progettare spazi in cui sia minimizzato il numero di feriti o morti a causa di un'emergenza [2]. I principali vantaggi del metodo consistono nella possibilità di visualizzare la reazione degli utenti, di verificare il tempo di uscita dall'edificio, di misurare l'affollamento effettivo in ogni punto delle vie di fuga con la conseguente definizione della probabilità che si generino situazioni di pericolo, causate da un'elevata densità di persone in corrispondenza di punti critici come le uscite di emergenza.

2. Metodologia

I principali fattori che caratterizzano una simulazione sono [2]: le caratteristiche geometriche degli spazi in cui avviene l'analisi, il comportamento degli utenti prima e durante l'evacuazione, le modalità di propagazione dell'evento rischioso e le condizioni ambientali in cui si inserisce il fabbricato o l'area interessata. Le simulazioni computerizzate delle evacuazioni utilizzano infatti diversi modelli matematici, tra i quali i modelli di comportamento umano, i modelli di propagazione degli eventi rischiosi, ecc. [2]. Nel caso in esame gli aspetti considerati sono stati l'ambiente fisico della simulazione e il comportamento umano dei partecipanti alla stessa. Il primo fattore di cui tenere conto è il modello con cui è simulato il comportamento dell'utente. La ricerca del tragitto ottimale verso una destinazione dipende fortemente dalla condizione psicologica in cui si trova l'individuo: in condizioni normali il principio che guida la scelta di un percorso è il minimo sforzo, ossia la via che necessita del minor dispendio in termini di tempo ed energia; in condizioni di panico si rileva una minore attenzione alle zone di comfort personale, alla distanza da altre persone e alla ricerca del percorso ottimale [1]. Un tipico comportamento scatenato dal panico è l'effetto gregge, il quale porta gli individui a perdere l'abilità di agire logicamente e indipendentemente, con la conseguenza che non prendono decisioni individualmente, ma seguono gli altri nella speranza che questi li conducano in una zona sicura [1]. Questo effetto può causare alte concentrazioni di persone in corrispondenza di alcune uscite, mentre altre potrebbero essere quasi inutilizzate. Si distinguono, quindi, due tipologie di simulazioni in funzione del comportamento dell'utente: la prima in cui ogni individuo agisce autonomamente in relazione alle caratteristiche personali, indipendentemente dalle scelte degli altri soggetti presenti; la seconda in cui tutti i soggetti agiscono come una massa unica. Questi ultimi sono definiti spesso modelli macroscopici [1] e si basano sull'analogia con flussi di particelle in movimento. Tuttavia, considerare una sola delle due tipologie di simulazione risulta una forte semplificazione. Nessuno dei due casi estremi, infatti, conduce ad un tempo ottimale di evacuazione [3]. La scelta è quindi ricaduta su simulazioni di tipo microscopico, tra le quali si annovera la simulazione agent-based [4], analizzata e applicata nella presente ricerca sul caso studio del Padiglione Mandolesi, edificio della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari. La simulazione agent-based costituisce un compromesso in quanto ciascun utente modellato mantiene le proprie peculiarità e la capacità di agire autonomamente; allo stesso tempo il suo comportamento condiziona le scelte e i movimenti degli individui circostanti [4], con la prospettiva di osservare e valutare gli effetti delle singole azioni (micro-livello) sull'insieme generale degli individui (macro-livello), generando fenomeni comportamentali del sistema anche molto complessi [5]. Si ha un effetto di individualizzazione del movimento delle folle [6]. Sono di seguito riportate le peculiarità della simulazione agent-based [6]:

- modellazione del sistema come somma di singoli comportamenti degli utenti;
- modellazione degli utenti controllati da una A.I. (intelligenza artificiale) diffusa che ne determina le azioni;

- l'agent è un ente in grado di processare dati e informazioni provenienti dall'ambiente esterno, ovvero reagisce al comportamento degli altri utenti e si muove nello spazio riconoscendo ostacoli, scale, aperture, secondo regole semplici definite K.I.S.S. (Keep It Simple and Stupid) [7];
- caratteristiche specifiche dell'individuo [8]: posizione, velocità, visibilità intorno a sé, tempo di reazione allo scattare del segnale di emergenza, definito tempo di pre-movimento Δt_{pre} dalla norma ISO TR 13387;
- possibilità di rappresentare molteplici gruppi di individui con caratteristiche particolari, aumentando la complessità del macro-fenomeno di utilizzo dell'edificio;

La simulazione agent-based pura, tuttavia, presenta una limitazione: è possibile popolare il modello di un edificio, tuttavia il movimento degli utenti risulta caotico [5]. Analogamente alle simulazioni di pre-occupancy effettuate in fase progettuale per verificare le modalità di utilizzo degli spazi e le interazioni tra fruitori [9], risulta necessario formalizzare una struttura di attività che l'utente deve svolgere. Ne deriva l'esigenza di un secondo tipo di simulazione, definita simulazione narrative driven, che formalizza la sequenza di attività degli utenti. Questa componente narrativa, sviluppata e introdotta nell'ambito dei videogame, rappresenta la storia da seguire dal giocatore e rende l'esperienza di gioco coinvolgente [5].

Una simulazione narrative driven pura presenta tuttavia notevoli limiti, ossia l'eccessiva rigidità della componente narrativa che definisce una struttura di attività articolata nel tempo, poco adattiva alle possibili variazioni dello stato del modello; essa fornisce una riproduzione del comportamento lungo una sequenza di attività predefinite e fissate, senza tuttavia possibilità di modificare il proprio percorso, rendendo pressoché impossibile l'analisi delle condizioni d'uso di uno spazio [5].

La soluzione adottata prevede l'uso contemporaneo dei due sistemi: la modellazione agent based permette la dovuta arbitrarietà agli utenti, la logica narrative driven guida le loro azioni lungo una sequenza predefinita di attività [9]. Nonostante ciò, gli spostamenti degli utenti non sono prevedibili a priori in quanto a ciascuna attività sono associati diversi spazi fisici, che svolgono la medesima funzione ad esempio, tra i quali l'utente può scegliere in base a diverse funzioni di probabilità. L'effettiva libertà di movimento dell'individuo in più ambienti o, al contrario, l'accessibilità limitata degli spazi solo ad insiemi predefiniti di utenti, dipende dalle condizioni di utilizzo del fabbricato impostate per ciascuna simulazione. Ad ogni tipologia di utente modellata, ad esempio staff e pubblico in un auditorium, è associata una specifica sequenza di attività, ovvero uno specifico insieme di spazi che è possibile visitare. Un altro aspetto non trascurabile sono le interazioni più o meno complesse tra le diverse tipologie di individui, i quali possono assumere ruoli nella simulazione di evacuazione. A questo proposito la letteratura scientifica afferma l'importanza di considerare l'effetto del controllo sociale da parte del personale addetto alla gestione dell'emergenza durante le evacuazioni [6]. Nell'analisi di eventi complessi, come la gestione di situazioni di emergenza in arene o stadi, può garantire il successo o, altresì, l'effetto fatale dell'intervento di soggetti addetti alla gestione della sicurezza. Il caso emblematico è rappresentato dal concerto degli Who del 03/12/1979 a Cincinnati, Ohio, durante il quale morirono undici persone prima dell'i-

nizio del concerto, travolte dalla folla che tentava di accedere all'auditorium quando le porte erano ancora chiuse. L'intervento del personale che non aprì gli accessi, non accorgendosi della situazione di emergenza, contribuì ad aggravare la situazione [6].

Il secondo aspetto da considerare è l'ambiente in cui si svolge la simulazione. Spesso sono sufficienti le informazioni planimetriche di uno spazio, permettendo di definire vie di fuga, posizione delle uscite di emergenza e delle eventuali aree protette presenti [2]. Risulta inoltre possibile modellare gli aspetti relativi alla compartimentazione, ad uscite di emergenza utilizzabili solo durante l'evacuazione e altre limitazioni nell'uso degli spazi. L'interpretazione dei dati provenienti dalla simulazione si articola in due fasi. Una prima fase di immediata verifica del tempo totale richiesto dall'evacuazione, riportato nella letteratura internazionale con RSET (Required Safe Escape Time). Questo tempo considera il tempo di rilevazione dell'incendio, il tempo di allarme, il tempo effettivo di evacuazione e il tempo di reazione degli utenti prima di iniziare a muoversi verso le uscite di emergenza. I primi due valori sono trascurati nell'analisi in quanto si considera come inizio della simulazione di evacuazione il termine del segnale di allarme. L'ultimo valore, invece, definito tempo di pre-movimento nella ISO TR 13387, è modellato tramite una funzione di probabilità che considera un valore massimo e minimo, definiti nel PD 7974-6:2004, "The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings", in funzione di parametri connessi con il livello di gestione della sicurezza, la complessità dell'edificio e la tipologia del sistema di allarme. Il tempo di riferimento ASET (Available Safe Escape Time), così come definito dalla ISO TR 13387, è il tempo massimo necessario ad evacuare da un edificio tipo di caratteristiche simili a quello in esame, tra cui numero di piani e di corpi scale. Allo scopo si considerano i limiti massimi definiti dalle norme antincendio di tipo verticale, come la lunghezza massima delle vie di fuga, e i valori di velocità degli utenti definiti da manuali [10], dipendenti dalla densità di persone presenti, di cui si riporta un grafico in Fig. 1. La verifica si ritiene soddisfatta quando $RSET < ASET$.

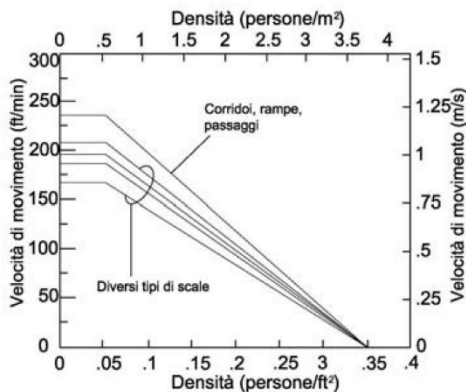


Fig. 1. Valori della velocità di evacuazione in funzione della densità [10].

Una seconda fase di verifica dell'affollamento nelle vie di fuga secondo limiti integrati nel software di analisi. È possibile così valutare in ogni punto la massima densità di persone presenti durante l'evacuazione, individuando eventuali punti critici lungo le vie di uscita, nei quali potrebbero verificarsi incidenti a causa del sovraffollamento.

3. Padiglione Mandolesi: applicazione del metodo al caso studio

Il metodo presentato è stato applicato al Padiglione Mandolesi, situato a Cagliari, progettato dall'ing. Enrico Mandolesi e realizzato allo scopo di ospitare gli istituti di giacimenti minerari, chimica applicata e arte mineraria della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari. Il padiglione si compone di un piano interrato occupato principalmente da magazzini, di un auditorium a doppia altezza, in parte interrato e con ingresso in corrispondenza del piano terra. Inoltre, presenta due piani di elevazione, separati dall'interrato tramite un piano pilotis, con locali di studio, ricerca e laboratori disposti lungo le pareti perimetrali e aule per la didattica alternate a corti interne dedicate a ventilazione e illuminazione nella fascia centrale. In corrispondenza delle testate dell'edificio sono collocati servizi igienici, ascensori e corpi scala, dove sono posizionati, al livello del piano pilotis, gli accessi per i piani superiori. Il padiglione, progettato nel 1962 e consegnato nel 1970, è stato, con ogni probabilità, ideato e realizzato senza tenere conto di questioni legate all'evacuazione, in quanto la prima normativa sulla progettazione antincendio di edifici scolastici risale al 1992. In merito al rispetto dell'attuale normativa, inoltre, si riscontra solo una richiesta di valutazione di conformità del progetto di adeguamento antincendio risalente al 26/06/2014.

Per la verifica tramite simulazione dell'evacuazione è stato necessario costruire un modello digitale del padiglione, nel quale gli utenti potessero muoversi. Inoltre, la simulazione è stata adattata al caso studio come segue:

- differenziazione degli utenti in base alla localizzazione nell'edificio, distinti tra staff dell'auditorium, spettatori e occupanti di studi, laboratori e aule. Ciascuna utenza poteva così accedere solo agli spazi ad essa riservati;
- struttura delle attività: ingresso e accesso ai diversi ambienti di lavoro, verificarsi di un evento pericoloso e attivazione dello stato di emergenza, evacuazione del fabbricato da parte di tutti gli utenti presenti;
- individuazione del numero di utenti in ciascun locale in relazione alla destinazione d'uso secondo i valori massimi di affollamento definiti dal D.M. 26/08/1992 o, nel caso in cui il numero di utenti effettivi fosse molto diverso da quello previsto da norma, è stato considerato il valore relativo alla capienza massima dell'ambiente secondo i dati di utilizzo dell'edificio.

4. Verifica normativa e simulazione dell'evacuazione

Per quanto riguarda la verifica antincendio tradizionale, si sono riscontrate criticità riguardanti la carenza di impianti e mezzi di spegnimento incendi, la necessità di sostituzione di serramenti esistenti con porte REI, fattori non ulteriormente integrabili tramite la simulazione.

La verifica tradizionale per una corretta evacuazione ha previsto inizialmente la validazione dei due corpi scale esistenti per il deflusso dai piani primo e secondo, che, secondo D.M. 26/08/1992, necessitano di essere convertiti in corpi scale protetti. Inoltre, in base all'utenza massima prevista, il numero di moduli necessari per il deflusso dai piani superiori, pari a $6 \times 0,60$ m, è risultato verificato con le rampe delle due scale di larghezza pari a circa 1,70 m e con tolleranza del 5% prevista dal D.M. 10/03/1998. Quest'ultimo prevede, in presenza di laboratori di chimica, un livello di rischio incendio medio, con lunghezze massime delle vie di fuga pari a 45 m con la possibilità di una doppia uscita e a 30 m per i tratti con singola via di fuga, verificate per entrambi i piani dell'edificio. Di conseguenza, fatta eccezione per alcuni adeguamenti impiantistici e di prestazione dei materiali, la verifica tradizionale di evacuazione del Padiglione Mandolesi risulta soddisfatta sia per i piani fuori terra che per l'auditorium. La verifica tramite simulazione con software di crowd simulation ha previsto inizialmente il calcolo del tempo di riferimento di evacuazione, l'ASET, pari a 2 min e 50 s, valore che si avvicina al tempo soglia definito dal D.M. 10/03/1998 per luoghi di lavoro a rischio d'incendio medio, pari a 3 min. Dalla simulazione sul modello digitale del padiglione è risultato un tempo di evacuazione RSET compreso tra 4 min e 50 s e 5 e 15 s, in funzione dell'arbitrarietà di scelte e movimenti degli utenti, che causa una variazione dei risultati nell'iterazione dell'analisi. Di conseguenza la verifica $RSET < ASET$ non risulta soddisfatta. Inoltre, tramite mappe dell'affollamento misurato in ogni punto delle vie di fuga, come mostrato in Fig. 2, si sono rilevati valori molto elevati di densità di persone in corrispondenza degli accessi ai corpi scale per entrambi i piani di elevazione. Valori superiori a 3 pp/m² sono considerati pericolosi, specialmente se registrati in una evacuazione in caso di emergenza.

Questo risultato evidenzia una rilevante criticità a causa della potenziale situazione di pericolo generata dall'elevato numero di persone in probabili condizioni di panico che

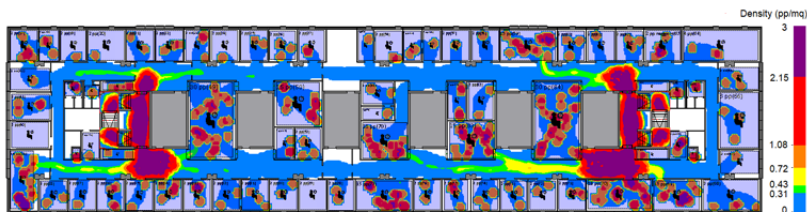


Fig. 2. Mappa di densità del piano primo del Padiglione Mandolesi, con fenomeni di affollamento in corrispondenza dell'accesso ai corpi scala.

tentano di accedere ai corpi scala, come evidenziato nella **Fig. 4**, diversamente da ciò che accade nella fase di accesso al fabbricato in cui, come mostrato dalla **Fig. 3**, le scale non risultano sovraffollate e sono adeguate al flusso di utenti.

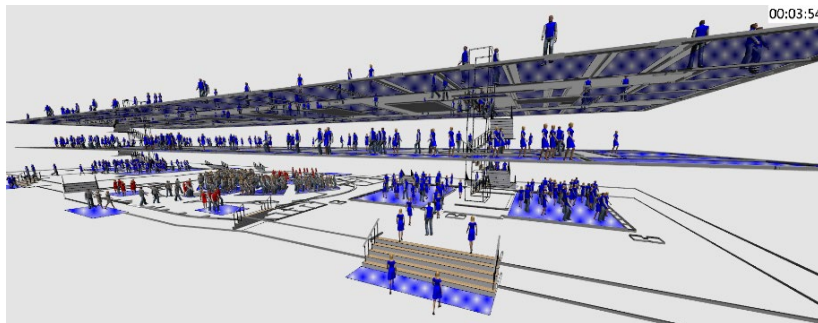


Fig. 3. Fase di ingresso nell'auditorium e ai piani superiori.

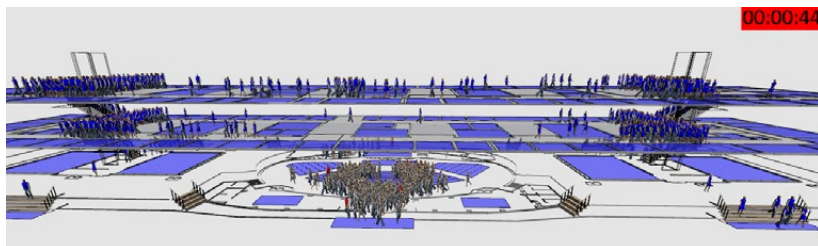


Fig. 4. Fase di evacuazione con evidenti situazioni di affollamento in corrispondenza dei corpi scala.

5. Conclusioni

I risultati discordanti ottenuti tramite verifica tradizionale e simulazione di evacuazione sul Padiglione Mandolesi evidenziano i limiti dell'utilizzo della normativa tradizionale per la validazione di edifici esistenti. Il rispetto dei valori di lunghezza massima delle vie di fuga, definite secondo D.M. 10/03/1998, dovrebbe essere garanzia di una corretta evacuazione di tutti gli utenti dal fabbricato. La simulazione dinamica di crowd simulation pone l'accento sulle importanti criticità riguardanti i flussi di utenti in uscita in caso di emergenza. Ne deriva che la verifica delle operazioni di evacuazione per il padiglione non risulta soddisfatta, contrariamente a quanto risultato dall'applicazione dell'approccio tradizionale.

L'evoluzione futura della ricerca può comportare l'utilizzo di analisi di tipo dinamico per la formalizzazione di piani di emergenza dedicati che permettano, in funzione di specifici eventi pericolosi, di garantire un'evacuazione in sicurezza degli occupanti del Padiglione Mandolesi.

Bibliografia

1. Almeida JE, Rosseti RJF, Coelho AL (2013) Crowd Simulation Modeling Applied to Emergency and Evacuation Simulations using Multi-Agent Systems
2. Bakhadyrov I, Maher A (2003) Technological Advances in Evacuation Planning and Emergency Management: Current State of the Art
3. Helbing D, Farkas I (2002) Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestr evacuation Dyn* 21:21–58
4. Ijaz K, Sohail S, Hashish S (2015) A Survey of Latest Approaches for Crowd Simulation and Modeling using Hybrid Techniques. *17th UKSIM-AMSS Int Conf Model Simul* 111–116 . doi: 10.1109/UKSim.2015.46
5. Simeone D (2015) *Simulare il comportamento umano negli edifici. Un modello previsionale*. Gangemi editore, Roma
6. Santos G, Aguirre BE (2004) *A Critical Review of Emergency Evacuation Simulations Models*
7. Axelrod R (1997) *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton University Press, Princeton
8. Tang F, Ren A (2008) Agent-Based Evacuation Model Incorporating Fire Scene and Building Geometry. *Tsinghua Sci Technol* 13:708–714 . doi: 10.1016/S1007-0214(08)70112-3
9. Locatelli M, Pellegrini L (2017) *La modellazione informativa per il Progetto Iscol@, il nuovo campus dell'istruzione a Posada*. Politecnico di Milano
10. Nelson HE, Mowrertratta FW (2002) Emergency movement. In: National Fire Protection Association (ed) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer-Verlag New York, pp 367–380