

Francesco Livio Rossini,

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Italia

francesco.rossini@uniroma1.it

Abstract. L'industria delle costruzioni, attanagliata da una persistente crisi, ha nelle opportunità date dalla rivoluzione digitale l'occasione di efficientare l'intero comparto. Tali opportunità non sono insite tanto negli strumenti, quanto nelle innovative metodologie di gestione dei processi, legate agli sviluppi delle tecniche di intelligenza artificiale. Nell'articolo si presenta dunque l'elaborazione di un prototipo di integrazione tra Agenti autonomi e BIM: il risultato è la simulazione di alternative progettuali, a seconda delle diverse possibilità di ottimizzare le risorse a disposizione. In questo modo, nel progetto esecutivo diventa proattiva sia la fase di verifica progettuale sia l'organizzazione del cantiere, dal modello virtuale alla costruzione.

Parole chiave: BIM; Project Management; IoT; Agent-Based Simulation.

Introduzione

Dopo oltre un decennio di continua recessione economica, il concetto di crisi è ormai da considerare come condizione al contorno per la riorganizzazione radicale dell'industria delle costruzioni. In tal senso è intervenuto anche il legislatore, che ha individuato nella suddivisione delle fasi progettuali uno degli aspetti critici da riorganizzare e attualizzare, anche alla luce delle metodologie digitali espressamente sviluppate per l'edilizia come il BIM (Building Information Modeling). Pertanto, all'architetto contemporaneo è richiesto lo stesso sforzo compiuto nell'antichità per lo sviluppo dei sistemi voltati, nel Rinascimento con la prospettiva e nelle rivoluzioni industriali con la meccanizzazione. Considerando perciò che ogni epoca ha colto le proprie opportunità tecnologiche, adesso è necessario rafforzare il legame tra gestione del progetto e l'informatica, al fine di poter ottimizzare le risorse impiegate nei processi realizzativi dell'architettura, reinterprestando il progetto esecutivo sia come veicolo principale delle informazioni dal progetto virtuale alla realtà costruttiva, sia come fase di verifica – continua e sistemica – del progetto stesso. Uno dei fattori che determinano la scarsa gestibilità della com-

plexità del progetto è la frammentazione della conoscenza in compartimenti poco permeabili, costituiti dai raggruppamenti di specialisti che, ognuno per propria competenza, immagazzinano i propri metodi e risultati in 'silos mentali'. Questo comporta la presenza di tanti progetti settoriali paralleli, verificati solamente all'interno del proprio dominio di appartenenza. Nonostante gli avanzamenti nel settore del CAD (Computer Aided Design) abbiano permesso la fattibilità dell'approccio progettuale circolare e collaborativo, tuttora questi non sono adeguatamente utilizzati in una visione di progettazione integrata supportata dalla rete digitale (Carrara *et al.*, 2001).

La ricerca illustrata in questo articolo dunque ha l'obiettivo di definire le innovative modalità di integrazione del progetto esecutivo all'interno del processo edilizio, mediante approcci simulativi capaci di predire gli esiti delle scelte intraprese ben prima della loro esecuzione materiale in cantiere, nell'ottica di inquadrare il progetto esecutivo quale affidabile "piano direttivo per la realizzazione" (Ferrante, 2008), capace perciò di annullare le possibili varianti e riserve in corso d'opera.

Si illustrano quindi le potenzialità e i limiti della progettazione esecutiva condotta con l'impiego della metodologia BIM, implementata con simulazioni *Agent-based*, mantenendo una interconnessione costante tra informazioni derivanti dai diversi attori del processo e dai diversi luoghi, sia reali che virtuali, presso i quali il progetto via via prende forma secondo l'approccio "4.0". Per arrivare a ciò, è stato necessario aggiornare l'approccio progettuale, arrivando dunque a collegare iterativamente gli elementi di dettaglio propri del progetto esecutivo con il relativo cronoprogramma, per poi verificarne la congruenza e fattibilità mediante simulazioni *Agent-Based* applicate al modello BIM

Integration between BIM and Agent-based simulation for the 4.0 detailed design

Abstract. The construction industry, affected by a persistent crisis, has in the innovation provided by the digital revolution the opportunity to make the whole sector more efficient. These opportunities are not so much inherent in the tools, as in the innovative methods of process management, linked to the development of Artificial Intelligence techniques. The article therefore presents the development of a prototype of integration between Autonomous Agents and BIM: the result is the simulation of design alternatives, according to the different possibilities of optimizing the available resources. In this way, in the detailed design both the design verification phase and the organization of field, from the virtual model to the construction, becomes proactive.

Keywords: BIM; Project Management; IoT; Agent-Based Simulation.

Introduction

After more than a decade of continuous economic recession, the concept of crisis is now to be considered as a condition for the radical reorganization of the construction industry. In this sense, the legislator has also intervened, and has identified the subdivision of the design phases as one of the critical aspects to be reorganized and updated, also in the light of the digital methodologies specifically developed for the building industry, such as BIM (Building Information Modeling). Therefore, the contemporary architect is required to make the same effort as in ancient times was for the development of vaulted systems, in the Renaissance with perspective and in industrial revolutions with mechanization. Therefore, considering that every era has taken advantage of its technological opportunities, it is now necessary

to strengthen the link between project management and information technology, in order to optimize the resources used in the construction processes of architecture, reinterpreting the Detailed design both as the main vehicle of information from the virtual project to the construction reality, and as a phase of continuous and systemic verification of the project itself.

One of the factors that determine the poor manageability of the complexity of the project is the fragmentation of knowledge into compartments that are not very permeable, made up of groups of specialists who, each for their own competence, store their methods and results in 'mental silos'. This entails the presence of many parallel sectoral projects, verified only within their own domain. Although advances in the field of CAD (Computer Aided Design) have allowed the feasibility of

dell'edificio (Rossini *et al.*, 2017). Ogni componente del progetto esecutivo infatti, è stato gestito come una attività da svolgere in una determinata zona del cantiere, a carico di un certo numero di squadre lavorative (Novembri *et al.*, 2015). Considerando la vasta complessità dell'argomento e il numero esponenziale delle variabili in gioco, il prototipo digitale sviluppato prende in analisi solo una parte delle lavorazioni da svolgere, le opere strutturali, per validare dunque un metodo che poi, con gli opportuni supporti tecnici e tecnologici, si possa generalizzare all'interazione con tutte le altre categorie di lavori. La prospettiva futura è nella simulazione della costruibilità e operabilità (Ciribini, 2016) riducendo, ulteriormente, possibilità di sprechi legati a carenze progettuali anche nelle fasi successive alla mera realizzazione del bene edilizio.

Stato dell'arte

Sviluppi dell'informatica e l'evoluzione del progetto esecutivo

La progressiva introduzione dell'informatica nei tessuti produttivi industrializzati (es. automotive, aerospaziale, ecc.) non ha lasciato indifferente il mondo delle costruzioni. In questo settore difatti, le nuove metodologie digitalizzate di supporto informatico al progettista hanno iniziato a contaminare le modalità di approccio alla progettazione esecutiva che, finalmente, poteva essere svincolata dalla Regola d'arte, di natura prettamente manualistica, in favore dello sviluppo dell'approccio prestazionale che permette, grazie all'ingegnerizzazione del progetto, di ottimizzare materiali e risorse per creare soluzioni adeguate.

Il primo passo perciò è stato collegare il progetto esecutivo alla macchina, mediante strumenti CAM (Computer Aided Manufacturing), dapprima con applicazioni semplici e fortemente se-

a circular and collaborative design approach, these are still not adequately used in an integrated design vision supported by the digital network (Carara *et al.*, 2001).

The research illustrated in this article therefore aims to define the innovative methods of integration of the executive project within the building process, through simulative approaches capable of predicting the results of the choices made well before their material execution on site, with a view to framing the executive project as a reliable "master plan for the realization" (Ferrante, 2008), therefore able to cancel any possible variations and reservations during the work.

The potentialities and limits of the executive design carried out with the use of the BIM methodology, implemented with Agent-based simulations, are illustrated, maintaining a constant

interconnection between information deriving from the different actors of the process and from the different places, both real and virtual, where the project gradually takes shape according to the "4.0" approach.

In order to achieve this, it was necessary to update the design approach, thus connecting iteratively the detailed elements of the executive project with the related time schedule, and then verify the congruence and feasibility through Agent-Based simulations applied to the BIM model of the building (Rossini *et al.*, 2017). Each component of the executive project, in fact, was managed as an activity to be carried out in a specific area of the construction site, by a certain number of working teams (Novembri *et al.*, 2015). Considering the vast complexity of the subject and the exponential number of variables at stake, the digital prototype developed

realizzate, per poi instaurare un 'dialogo' tra software e macchina che, attraverso modelli e non più solo rappresentazioni, divenne in grado di realizzare i contenuti progettuali esecutivi direttamente sui materiali da impiegare (si pensi alle circa 33.000 lastre di rivestimento del Guggenheim di Bilbao).

Successivamente, l'obiettivo si è spostato dalla formalizzazione di metodologie e strumenti tarati sull'ottimizzazione dei processi all'interno di una stessa organizzazione – o di uno stesso progetto – alla realizzazione di un *network* di professionisti e macchine dove il flusso delle informazioni avviene in un ambiente informatico controllato, così da ridurre al minimo l'intervento umano (Castelo-Branco *et al.*, 2019). Questi sono infatti i presupposti dell'industria 4.0, ovvero la realizzazione di quell'ecosistema informatico in grado di fornire i requisiti tecnici necessari a «supportare l'organizzazione dei processi produttivi basati su tecnologie e dispositivi messi autonomamente in contatto lungo la catena produttiva» (Smit *et al.*, 2016).

Metodi e tecniche della progettazione esecutiva nel flusso di lavoro BIM

Dal punto di vista applicativo, la progettazione esecutiva BIM si caratterizza per la continua e reciproca influenza sulle altre fasi progettuali, e alla possibilità di utilizzare le famiglie digitali messe a disposizione dall'industria (i.e. Saint-Gobain, Grundfos, Dolomiti X-LAM, ecc.), sebbene vi siano importanti limiti di interoperabilità tra formati BIM nonostante i risultati raggiunti dal protocollo IFC (Zhang *et al.*, 2014).

Per superare tali limiti e favorire quindi il flusso di dati tra imprese e progettisti, sono stati realizzati modelli basati sul Web Semantico (Costa and Mandrazo, 2015) che consistono nella

analyses only a part of the work to be done, the structural works, to validate a method that then, with the appropriate technical and technological support, can be generalized to the interaction with all other categories of work. The future perspective is in the simulation of constructability and operability (Ciribini, 2016) reducing, further, the possibility of waste related to design issues, even in the phases following the mere realization of buildings.

State of the art

Developments in Information Technology (IT) and the evolution of detailed design

The progressive introduction of IT in industrial field (e.g. automotive, aerospace, etc.) has not left the building sector indifferent. In this sector, the new digitalised methods of IT, have progressively begun to contaminate

the methods of approaching detailed design which, finally, could move from the 'according to the book' form of agreement, to the development of the 'performative approach' which, thanks to the engineering of the project, allows the optimisation of materials and resources used to create suitable solutions.

The first step therefore, was to connect the executive project to machines, using CAM (Computer Aided Manufacturing) tools, first with simple and highly serialized applications, then establishing a "dialogue" between software and machine which, through models and no longer just representations, became capable of realizing the Detailed design contents directly on the materials to be used (f.i. the 33,000 cladding slabs of the Bilbao Guggenheim).

Subsequently, the goal shifted from

possibilità, data dalla creazione di meta-informazioni condivise in rete, di collegare ontologicamente le famiglie BIM messe a disposizione dall'industria e il quadro esigenziale del progetto: in questo modo, i progettisti possono direttamente interrogare il catalogo che, grazie a motori di ricerca semantici, sono in grado di proporre componenti adeguati alle necessità progettuali, e condividerne la conoscenza intrinseca del prodotto con il progettista (cfr. BAUKOM).

Altri esempi – meno complessi – sono dati dai plug-in eseguibili direttamente negli ambienti di modellazione BIM (es. Revit®) come, prendendo ad esempio il settore dell'illuminotecnica, ReluxCAD®: in questo modo è possibile simulare la resa del componente selezionato a catalogo oppure crearne uno nuovo, con geometrie e proprietà che poi, senza ulteriori passaggi, andranno a costituire il progetto esecutivo del componente stesso.

Limiti dello stato dell'arte e loro superamento

Oltre alla mancanza di standard condivisi pienamente interoperabili e alla necessità di dover usufruire di un ecosistema informatico particolarmente performante, il limite più evidente dell'attuale livello di digitalizzazione del progetto è nel comportamento prevalentemente reattivo degli strumenti rispetto agli input immessi dai progettisti. La mancanza perciò di un motore inferenziale interno a questi strumenti, capace di valutare autonomamente gli input rispetto agli obiettivi progettuali da raggiungere, determina ancora l'assenza di metodologie in grado di supportare il progettista a livello decisionale.

Da questa considerazione nascono le motivazioni della ricerca, ovvero cogliere le possibilità date dall'attuale sviluppo delle tecniche di intelligenza artificiale affinché il progettista, lungo lo

sviluppo del progetto, possa avvalersi di un sistema digitale capace di supportarlo a livello strategico, grazie a strumenti capaci di predire gli esiti delle scelte progettuali, e valutarne gli effetti sul piano tecnico.

Metodologia

Integrazione tra BIM e Agent-based simulation

Nell'evoluzione delle tecniche di intelligenza artificiale, uno dei principali temi di approfondimento è stato il concetto di Agente Autonomo (Fig. 1), ovvero di quella entità capace di effettuare operazioni a seconda delle condizioni interne ed esterne, degli attributi, della topologia, delle regole comportamentali e degli obiettivi prefissati, senza il diretto controllo umano (Wooldridge, 2008).

Questa indipendenza si può declinare secondo diversi livelli di complessità: un agente difatti può avere comportamenti molto semplici, puramente reattivi rispetto all'applicazione di regole condizionali del tipo *if-then*, oppure presentare livelli di intelligenza sempre maggiori quali, ad esempio, il comportamento basato sull'applicazione delle regole in relazione ad un determinato evento (*event based*), fino a giungere alla completa autonomia (Castelfranchi and Falcone, 1998) che, grazie anche a sistemi di inferenza statistica, conducono al comportamento *proactive*, ovvero la condizione in cui la macchina – oltre a prefigurare l'esito delle scelte – suggerisce una o più soluzioni in grado di raggiungere il miglior risultato in relazione alle esigenze da soddisfare. L'agente inoltre ha una natura prettamente relazionale, tesa a creare sistemi multi-agente, che meglio si adattano a modellare la realtà complessa e, perciò, le relative interconnessioni dinamiche.

formalizing methodologies and tools for the optimization of processes into the same organization – or the same project – to creating a network of professionals and machines, where the flow of information takes place in a controlled digital environment, so as to minimize human intervention (Castelo-Branco *et al.*, 2019). These are effectively the prerequisites of the 4.0 industry, i.e. the creation of a digital ecosystem capable of providing the technical requirements necessary to «support the organization of production processes based on technologies and devices put into contact autonomously along the production chain» (Smit *et al.*, 2016).

Methods and techniques of Detailed design in BIM workflow

From a practical point of view, the BIM Detailed design is characterized by the

continuous and reciprocal influence on the other design phases, and the possibility to use the digital families made available by the industry (i.e. Saint-Gobain, Grundfos, Dolomiti X-LAM, etc.), although there are important limits of interoperability between BIM formats despite the results achieved by the IFC protocol (Zhang *et al.*, 2014).

In order to overcome these limits and, thus, favour the data-flow between industry and designers, models based on the Semantic Web have been created (Costa and Mandrazo, 2015). These consist in the possibility, given by the creation of shared metadata, of ontologically connecting the BIM families made available by industry and the needs of the project: in this way, designers can directly query the catalogue which, thanks to semantic search engines, is able to propose com-

ponents suited to the design needs, and share the embedded knowledge of the product with the designer (f.i. BAUKOM).

Other examples – less complex – are given by plug-in that can be executed directly in BIM modelling environments (e.g. Revit®), such as ReluxCAD®, taking for instance the lighting engineering sector: with this tool is possible to simulate the performance of the component selected from the catalogue, or create a new one, with geometries and properties that, without further steps, will then constitute the Detailed design of the component itself.

Limits of the state of the art and their overcoming

In addition to the lack of fully interoperable shared standards, and the need to improve ICT ecosystem, the most

evident limits of the current level of digitization of the Detailed digital project is the mainly reactive behaviour of the tools, compared to the inputs entered by the designers. The lack, therefore, of an inferential engine within these tools, capable of independently evaluating the inputs with respect to the project objectives to be achieved, still determines the absence of methodologies capable of supporting the designer at the decision-making level. From these considerations arise the motivation of research, i.e. to seize the possibilities given by the current development of artificial intelligence techniques so that the designer, along the development of the project, can take advantage of a digital system, capable of supporting it at a strategic level, thanks to tools capable of predicting the results of the design choices, and evaluate the effects on the technical level.

Il prototipo è stato sviluppato per legare i risultati delle iterazioni avvenute nell'ambiente simulativo *Agent-based* con il mondo BIM, utilizzando la connessione messa a disposizione dalle API (Application Programming Interface), concretizzando dunque un aggiornamento dei dati continuo e reciproco. Pertanto, ogni oggetto BIM (istanza) sarà rappresentato all'interno del sistema ad agenti secondo proprie regole, obiettivi e comportamenti. Il dettaglio esecutivo quindi, sarà modellato come un sistema in cui ogni elemento è un agente che deve raggiungere degli obiettivi, nella misura in cui anche gli altri agenti (=oggetti BIM) dovranno soddisfare i loro: questo processo di parallelizzazione si conclude quando ogni oggetto BIM ha trovato, soddisfacendo i requisiti prestazionali imposti, la sua dimensione in relazione con le altre parti del tutto.

Il risultato è la generazione automatica di un dettaglio costruttivo soddisfacente dove, tra le altre proprietà, sono inserite le maestranze da impiegare e le aree da occupare, in maniera tale da poter verificare anche gli aspetti legati alla costruibilità del sistema (Fig. 2)

Il risultato grafico di questa interazione è una interfaccia grafica detta "canvas" che descrive, dato il progetto esecutivo degli elementi contenuti in quell'area, le tempistiche e l'effettiva area di lavoro, tenendo conto anche delle propedeuticità tra le varie attività.

Caso studio: S. Giovanni Battista in S. Angelo in Theodice, Cassino - FR

I risultati di questa ricerca sono frutto dell'approfondimento del lavoro svolto durante il Dottorato di Ricerca. Per validare di

fatti la metodologia oggetto della tesi, sono stati selezionati tre casi studio nel settore dell'edilizia di culto: la scelta del campione

Methodology

Integration of BIM and Agent-based simulation

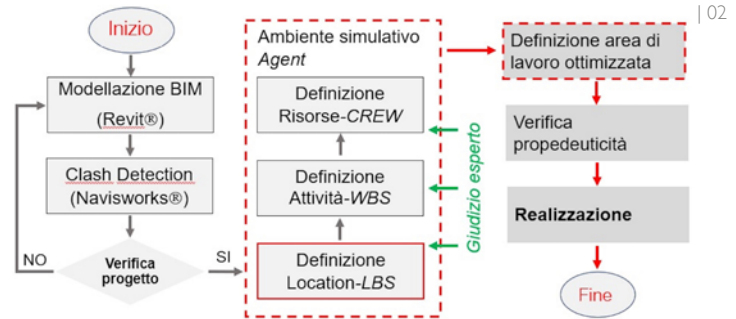
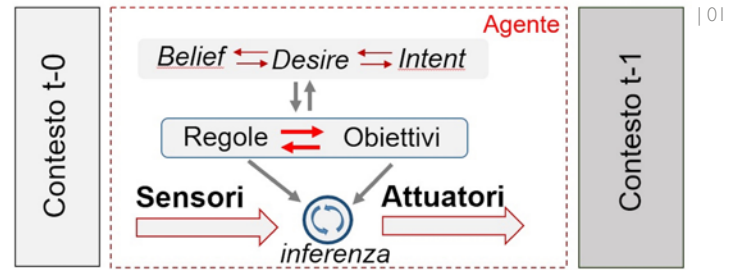
In the evolution of artificial intelligence techniques, one of the main themes of study was the concept of Autonomous Agent (Fig. 1) that is the entity capable of carrying out operations according to internal and external conditions, attributes, topology, behavioural rules and set objectives, without direct human control (Wooldridge, 2008).

This independence can be declined according to different levels of complexity: an agent can have very simple behaviours, purely reactive with respect to the application of conditional rules like the *if-then* type, or present ever different levels of intelligence such as, for example, the behaviour based on the application of rules in relation to a given event (*event based*), till to reach the complete autonomy (Castelfranchi

et Falcone, 1998) which, also thanks to statistical inference systems, lead to *proactive* behaviour, that is the condition in which the machine - in addition to prefiguring the outcome of the choices made - assess one or more solutions, capable of achieving the best result in relation to the needs to be satisfied.

The agent also has a purely relational nature, aimed at creating multi-agent systems, which are better suited to modeling complex reality and, therefore, its dynamic interconnections.

The prototype was developed to link the results of the iterations that took place in the Agent-based simulative environment with the BIM world, using the connection provided by the API (Application Programming Interface), thus creating a continuous, reciprocal, updating of data. Therefore, each BIM object (instance) will be



è stata dettata dalla necessità di analizzare lavorazioni simili date da problematiche diverse, legate alla differenza di ubicazione e, soprattutto, di epoca di costruzione delle chiese oggetto dei lavori.

Il caso studio presentato è stato scelto perché, nella definizione dei sistemi di miglioramento sismico, il ruolo del progetto esecutivo "Agent-based" è stato quello di ottimizzare le risorse in gioco, bilanciare gli interventi con i materiali allo stato di fatto, verificare la fattibilità e le tempistiche per poter definire i tempi di chiusura dell'edificio.

Il primo passo è stata la modellazione BIM dell'edificio secondo lo standard LOD 350 e, da qui, la modellazione delle regole e degli obiettivi degli Agenti. Inoltre, trattandosi di un edificio affetto da diverse carenze strutturali, per poter verificare il costo e la tipologia degli interventi da prendere in considerazione per

represented within the Agent system according to its own rules, objectives and behaviours. The executive detail, therefore, will be modeled as a system in which each element is an agent that must achieve objectives, to the extent that the other agents (=BIM objects) will also have to meet theirs: this process of parallelization ends when each BIM object has found, meeting the performance requirements imposed, its size in relation to the other parts of the whole.

The result is the automatic generation of a satisfactory construction detail where, among other properties, the workers to be employed and the areas to be occupied are gathered, in such a way as to be able to verify also the aspects linked to the constructability of the system (Fig. 2).

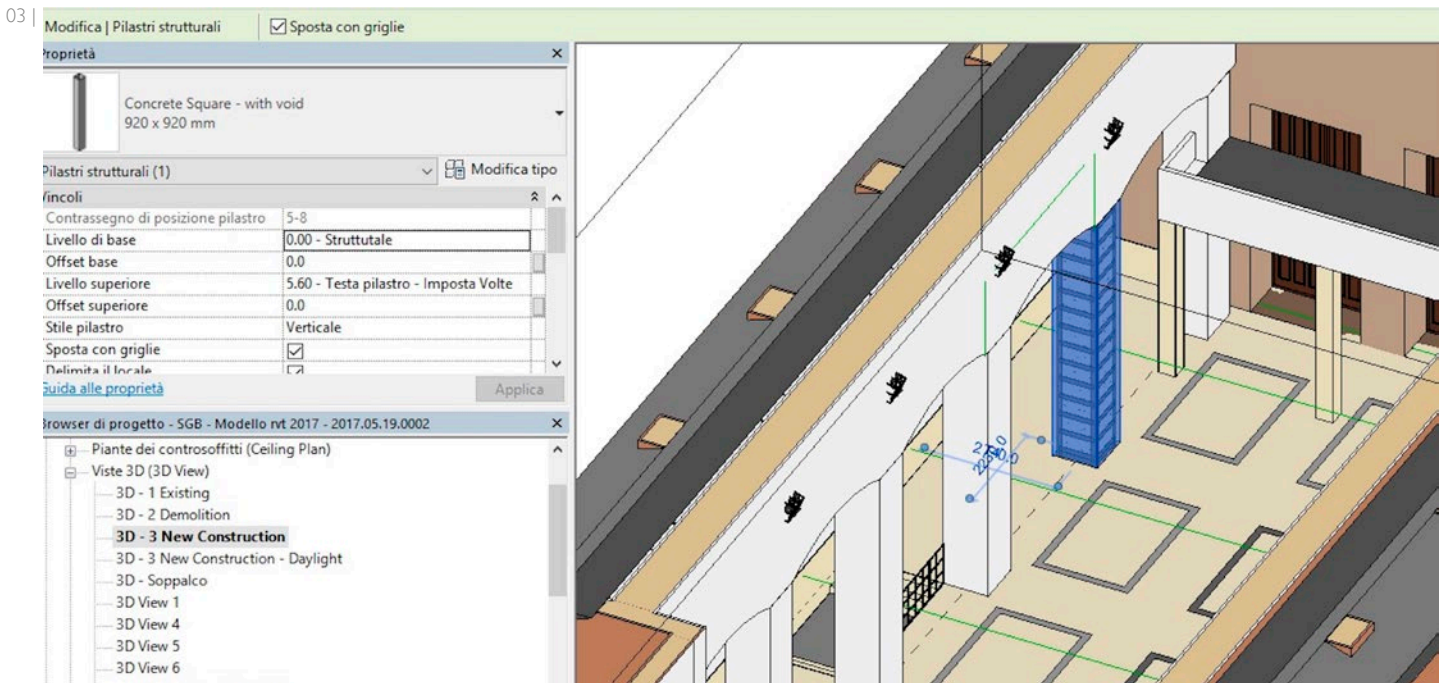
The graphic result of this interaction is a graphic interface called 'canvas' that

describes, given the executive design of the elements contained in that area, the timing and the actual working area, also verifying the consequentiality among working-activities.

Case study: S. Giovanni Battista church in Latium country, Cassino City - FR

The presented results are part of the PhD thesis, concluded in 2018. In order to validate the methodology developed during doctoral studies, three cases in the field of worship buildings were selected: the choice was addressed by the need to analyze similar working-activities given by different problems, located in different sites and, above all, in different ages.

The presented case study was chosen because, in the engineering of seismic improvement systems, the role of the "Agent-based" Detailed design was



le operazioni di miglioramento sismico sono stati integrati, fin dalle fasi preliminari, elementi di consolidamento come le calastrellature metalliche (Fig. 3).

Oltre alla validazione del modello simulativo integrato nel modello BIM, è stata comunque eseguita una verifica *clash detection* del modello e, una volta confermato il tutto, si è passati alla definizione delle specifiche aree di lavoro (*location*), a cui sono associate le attività da svolgere e le risorse disponibili.

Nella fase di simulazione vi sono stati diversi problemi relativi alla penuria di spazi dove stoccare il materiale. Difatti, considerando che i sistemi ad agenti ammettono il fallimento, molte interazioni non arrivavano allo stadio di parallelizzazione poiché,

to optimize the resources involved, balancing the working-activities with materials located in construction site, verifying also the feasibility and timing needed, to be able to define the closing times of the building.

The first step was the BIM modeling of the building according to the LOD 350 standard and, hence, the modeling of the rules and objectives of the Agents. Moreover, since the building is affected by various structural deficiencies, in order to verify the cost and type of interventions to be taken into account for seismic improvement operations, consolidation elements such as battened reinforcement were integrated from the preliminary stages (Fig. 3).

In addition to the validation of the simulative model integrated in the BIM model, a clash detection process of the model was carried out and, once everything was confirmed, we moved

on to defining the specific work areas (*locations*), which are associated with the activities to be carried out and the available resources.

In the simulation phase there were several problems related to the lack of space where to store the material. In fact, considering that Agent systems admit failure, many interactions did not reach the stage of parallelization because, in the phase in which the Agents processed data, one or more objectives could not be achieved, even considering the lowest ranges of acceptable values.

To solve this problem, two strategies were tested: the first, more elaborate and complex, provided for the definition of buffer zones, close to the workplaces of the other teams, for the positioning of the material to be removed only at the end of the working week; the second, more manageable from the

nella fase in cui gli Agenti processavano dati, uno o più obiettivi non riuscivano ad essere raggiunti, neanche considerando i più bassi intervalli di valori accettabili.

Per la risoluzione di questo problema sono state verificate due strategie: la prima, più elaborata e complessa, prevedeva la definizione di zone cuscinetto, a ridosso dei luoghi di lavoro delle altre squadre, per il posizionamento del materiale da rimuovere solo alla fine della settimana lavorativa; la seconda, più gestibile dal punto di vista organizzativo, consisteva invece nello spostamento progressivo dei materiali accumulati a terra. Il risultato è stato nettamente a favore della prima.

organizational point of view, consisted instead in the progressive displacement of the materials accumulated on the ground. The result was clearly in favour of the first solution.

Results

The integration between the Agents system and the BIM model takes place directly in the modeling software environment, without having to interrupt the work or have long processing periods. Analyzing the results of the simulations, they are plausible compared to the preliminary forecasts of the designer, arriving even to be more realistic in the prediction of the duration of activities. From the IT point of view, however, there are many problems related to interoperability between the various tools and, in general, the presence of numerous bugs due to the prototype nature of the system. Finally, the expe-

rience has recorded a saving of 3 working weeks out of the 10 budgeted; from the economic point of view, instead, it has been possible to record a reduction of 20%.

Conclusion and discussion

The design is composed of a series of interdependent choices, carried out by actors with different skills and expectations, who confront each time with non-repeatable cases. The proposed system therefore has the goal, thanks to the evidence of the simulation, to predict the outcomes and performance of the proposed technical solutions. This possibility allows the designer to balance his creativity with the actual possibility of realizing the work according to the economic limits and feasibility of itself, reducing the possibility that the creative power of a project is then degraded at the time of

Risultati

L'integrazione tra il sistema ad Agenti e il modello BIM avviene direttamente nell'ambiente del software di modellazione, senza dover interrompere il lavoro o avere lunghi periodi di elaborazione. Analizzando i risultati delle simulazioni, risultano plausibili rispetto alle previsioni preliminari del progettista, arrivando addirittura ad essere più realistiche nella previsione della durata delle lavorazioni. Dal punto di vista informatico invece, vi sono molti problemi legati all'interoperabilità tra i vari strumenti e, in generale, la presenza di numerosi banchi dovuti alla natura prototipale del sistema. L'esperienza condotta ha registrato infine un risparmio di 3 settimane lavorative sulle 10 preventivate; dal punto di vista economico invece, si è potuto registrare un ribasso del 20%.

Conclusioni e discussione

La progettazione è composta da una serie di scelte interdipendenti, eseguite da attori con diverse competenze e aspettative, che si confrontano volta per volta con casi non ripetibili. Il sistema proposto dunque si pone l'obiettivo, grazie all'evidenza della simulazione, di predire gli esiti e le prestazioni delle soluzioni tecniche proposte. Questa possibilità permette al progettista di poter bilanciare la propria creatività con l'effettiva possibilità di realizzare l'opera secondo i limiti economici e di fattibilità della stessa, riducendo la possibilità che la potenza creativa di un progetto venga poi svilita all'atto della realizzazione (si pensi al centro congressi "Nuvola").

Al contempo, la possibilità di poter verificare gli esiti delle scelte esecutive può orientare il progettista già dalle fasi prodromiche

realization (e.g. the conference center Cloud, based in Rome).

At the same time, the possibility of being able to verify the results of the executive choices can guide the designer from the prodromal phases of the process, quickly identifying which solutions are actually viable. The danger, common to all the hyper-digitalised sectors, is, however, the flattening of the designer's creativity which, in effect, may end up preferring "perfectly tested" solutions that are very similar to each other instead of the intuition, that has always driven architecture towards innovation.

The future perspectives of this research are in the interconnection of models with advanced sensors, according to the IoT (Internet of Things) paradigm. In this way, the Agent is put in constant communication with the real environment, allowing a continuous collection

of data necessary, for example, for planning of periodic maintenance and extraordinary interventions.

del processo, andando ad individuare velocemente quali sono le soluzioni effettivamente percorribili. Il pericolo, comune a tutti i settori iper-digitalizzati, è però l'appiattimento della creatività del progettista che, in effetti, può finire con il preferire soluzioni "perfettamente collaudate" ma molto simili tra loro, in luogo della intuizione che, da sempre, spinge l'architettura verso l'innovazione.

Le prospettive future di questa ricerca sono nella interconnessione dei modelli con sensoristica evoluta, secondo il paradigma IoT (*Internet of Things*). In questo modo, l'Agente è messo in costante comunicazione con l'ambiente reale, permettendo una costante raccolta di dati necessari, ad esempio, alla pianificazione della manutenzione periodica e degli interventi straordinari.

REFERENCES

- Carrara, G., Fioravanti, A. and Novembri, G. (2001), "Knowledge-based System to Support Architectural Design", in Penttila, H. (Ed.), *Architectural Information Management, Proceedings of eCAADe 2001 Conference*, Helsinki, pp. 80-85.
- Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F. and Oliveira, T. (2019), "Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union", *Computers in Industry*, Vol. 107, pp. 22-32.
- Castelfranchi, C. and Falcone, R. (1998), "Toward a theory of delegation for Agents-Based systems", *Robotics and Autonomous systems*, Vol. 24, pp. 141-157.
- Costa, G. and Mandrazo, L. (2015), "Connecting building component catalogues with BIM models using semantic technologies: an application for precast concrete components", *Automation in Construction*, Vol. 57, pp. 239-248.
- Ciribini, A.L.C. (2016), *BIM e Digitalizzazione dell'ambiente costruito*, Grafill editore, Palermo, p. 156.
- Ferrante, T. (2008), *Legno e innovazione*, Alinea, Firenze, p.17.
- Novembri, G., Fioravanti, A. and Rossini, F.L. (2015), "Geometria qualitativa nel BIM world. Generazione della Location Breakdown Structure per un processo di costruzione sostenibile", in *Sostenibilità ambientale, economia circolare e produzione edilizia, Proceedings of ISTeA 2015*, Milano, p. 502-521.
- Rossini, F.L., Novembri, G. and Fioravanti, A. (2017), "BIM and Agent-Based model integration for construction management optimization", in 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC) 9-12 July, Heraklion, Crete, Greece.
- Smit, J., Kreutzer, S., Moeller, C. and Carlberg, M. (2016), "Industry 4.0. a Study for the European Parliament", available at: <http://www.europarl.europa.eu/studies> (accessed 25 march 2019).
- Wooldridge, M. (2009), *An introduction to Multi-Agent systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2008.
- Zhang, C., Beetz, J. and Vries, B. (2014), "An ontological approach for semantic validation of IFC models", *Proceedings of the 10th European Conference on Product & Process Modelling*, Wien, 2014, pp. 519-526.