

“Il Building Information Modeling e la Gestione della Sicurezza nei Cantieri di Grandi Dimensioni”
“Building Information Modeling and Large Construction Site Health and Safety Management”

A. L. C. Ciribini^(*), A. Vanossi^(), S. Mastrolembo Ventura^(*), M. Paneroni^(*),
M. Bolpagni^(***), G. Caratozzolo^(*)**

^() Università degli Studi di Brescia*

*^(**) Politecnico di Milano*

*^(***) Istituto per le Tecnologie della Costruzione-Consiglio Nazionale delle Ricerche*

angelo.ciribini@gmail.com, a.vanossi@gmail.com, silviamaestrolembo@gmail.com,

michela.paneroni@hotmail.it, marzia.bolpagni@libero.it, giovanni_caratozzolo@hotmail.com

Topic: Il management dei processi realizzativi di grandi opere.

Abstract

Building Information Modeling has been increasingly used for the Management of Construction Sites in terms of Health and Safety Management. The authors, continuing a strand of research already initiated elsewhere, have, first of all, developed the use of model checking to improve the content of the Health and Safety Construction upon the use of an Information Model in order to enhance the Logistics (and Safety) Management on a Large Construction Site. The main findings stemming from the research programme have shown that it is possible to establish a real-time communication and information management system so to identify the crucial interferences into the road network of the construction site, as well as so to enhance the overhauling of the Health and Safety-Related issues.

1. Introduzione

L'implementazione del Building Information Modeling (BIM) nella gestione logistica della sicurezza in grandi cantieri è stata già oggetto di alcune analisi metodologiche (Cheng and Teizer, 2013) e sembra avere un certo impatto sull'analisi critica spazio-temporale. I metodi più utilizzati per introdurre l'argomento implicano l'associazione di geometrie tridimensionali al piano lavori (Gilbane, 2013). Si tratta essenzialmente di un approccio visivo che ha il vantaggio di consentire un'identificazione rapida ed efficiente delle criticità attese.

Il progetto di ricerca si propone di evidenziare tre tematiche specifiche: la visualizzazione di aspetti legati alla sicurezza in cantiere di grandi dimensioni, l'aggiornamento logistico della viabilità del cantiere stesso e l'ottimizzazione della realizzazione di opere nel rispetto dei regolamenti vigenti. Per conseguire il primo obiettivo, il layout di cantiere è stato trasferito in un ambiente BIM-based al fine di visualizzare in modo efficace la gestione delle risorse, mezzi e addetti, identificando, così, le zone maggiormente affollate. È stata creata, inoltre, una Open Street Map in grado di riconoscere in tempo reale le vie all'interno del cantiere, migliorando la gestione della circolazione e fornendo un valido supporto anche ad operatori di diverse nazionalità. Infine l'approccio BIM, in particolare il rule checking, è stato utilizzato per controllare che il progetto rispettasse i requisiti di sicurezza sviluppati dalla stazione appaltante e dalle imprese.

2. Gestione delle risorse di cantiere: addetti e mezzi nelle aree di lavoro

La condivisione delle informazioni relative alle risorse di cantiere è uno dei principali problemi nella gestione delle aree di lavoro, soprattutto quando si tratta di un cantiere di grandi dimensioni in cui vi è la presenza contemporanea di più team operativi e di un elevato numero di figure professionali (dai coordinatori alla sicurezza ai progettisti, fino a imprese e subappaltatori), che devono comunicare tra di loro.

Tradizionalmente lo scambio della mole di informazioni relativa alle fasi di lavorazione tra gli attori che partecipano alla realizzazione dell'opera, avviene per mezzo di documenti cartacei che includono disegni bidimensionali, tabelle, ma anche semplicemente attraverso una comunicazione verbale. Si tratta di una carenza significativa nel processo di distribuzione delle informazioni che impedisce ai soggetti preposti di prendere decisioni in modo rapido e condiviso tra le parti (Cheng and Teizer, 2013).

Dati importanti da tenere in considerazione per

1. Introduction

The implementation of Building Information Modeling (BIM) to logistics management related to safety management on large construction sites (general constructions and infrastructures) has already received some methodological analyses and some case studies have been investigated (Cheng and Teizer, 2013). Indeed, Building Information Modeling seems to impinge on space-time critical analysis. The most usual ways to introduce the topic implies three-dimensional geometries linked to time schedules (Gilbane, 2013). It essentially deals with a visual approach, which had the advantage of allowing an efficient and rapid identification of expected criticalities.

The research project aims to highlight three specific strands: the safety visualisation on a large construction site and the logistical update of roads in the construct site and the improvement in controlling the compliance between projects and safety regulations. A BIM model of the construction site layout has been developed in order to effectively visualise the management of resources, resources, equipment and crews. This innovative approach allowed the identification on the most crowded areas. Moreover, an Open Street Map" has been created for real-time communication of the viability and to improve the understanding of the large construction site, especially for workers of several nationalities. Finally, rule checking has been used to control the project against client's and contractors' safety requirements.

2. Crew management on the large construction sites

The information exchange management concerning crews and machineries on a large construction site is one of the main question to be answered within Space management, especially when it comes to a large construction site where multiple concurrent gangs and a large amount of foremen and workers need to communicate and interact each other. Traditionally, the exchange of such a huge amount of data amongst the involved players is managed through paper documents, such as two-dimensional drawings, plans, schedules, but also simply through verbal communication. This causes a meaningful weakness into the information delivery process, because managers cannot make shared and fleeting decisions due to missing or poor information (Cheng and Teizer, 2013).

Valuable data should be taken into account for the effective management of the process concerning the location of resources, crews and equipment, as well as their relationships with specific tasks. The analysis of traditional documents often causes mistakes due to a

un'efficace gestione del processo di cantierizzazione, riguardano la posizione delle risorse; nello specifico addetti, mezzi e le loro interrelazioni spatio-temporali, in relazione alle specifiche attività svolte. Anche queste informazioni sono registrate manualmente dall'impresa; la successiva lettura dei documenti, da parte del responsabile della sicurezza in cantiere, spesso si presta ad errori dovuti sia ad un certo grado di soggettività nell'interpretazione che all'elevato numero di dati da esaminare.

2.1 Problema

Attualmente la gestione della sicurezza nel cantiere in esame avviene sulla base delle informazioni inviate settimanalmente dal principale appaltatore all'ufficio di coordinamento per la sicurezza, riguardanti le attività svolte nelle aree di lavoro previste per la settimana successiva. La comunicazione avviene mediante scambi di schemi 2D e tabelle ricche di informazioni ma carenti di coordinamento; ne consegue che i dati trasmessi risultano spesso insufficienti alla completa comprensione. Le informazioni comunicate ai coordinatori per la sicurezza riguardano: le imprese appaltatrici e subappaltatrici operative sul cantiere, i rispettivi preposti alla sicurezza, le aree nelle quali operano, una sintesi delle attività svolte, l'elenco degli impianti, dei mezzi e delle attrezzature utilizzati da ogni impresa, un numero indicativo degli addetti impegnati nelle singole attività ed una previsione delle possibili interferenze. Uno dei problemi principali è la definizione del numero di addetti e mezzi presenti in ogni sub-area del cantiere. Dato utile questo per la valutazione di quali zone siano più critiche ai fini della gestione della sicurezza e della valutazione dei rischi ai quali sono sottoposti i lavoratori, come, ad esempio, interferenze tra le lavorazioni, presenza di scavi e eccessivo affollamento di risorse.

Le tabelle non riescono ad evidenziare eventuali situazioni di criticità giornaliera e rendono di difficile associazione il dato relativo al numero di addetti e la loro posizione sul cantiere, indipendentemente dall'attività svolta (Kiviniemi, Sulankivi, Kähkönen, Mäkelä and Merivirta, 2011).

2.2 Proposta e metodologia

Il primo obiettivo della sperimentazione è produrre una visualizzazione più chiara ed efficace dei dati contenuti negli elaborati tradizionali; visualizzazione che, seppur semplicemente grafica, ha permesso di ottenere un'idea chiara della situazione in cantiere (IOSH, 2013), tenendo conto dei dati relativi ai giorni più critici relativamente all'affollamento di risorse previsto. A tal fine le aree in cui è suddiviso il cantiere sono state modellate come oggetti spaziali ("space") attraverso Autodesk Revit® 2014 diventando, in tal modo, contenitori ricchi di informazioni settimanalmente

certain degree of subjectivity in its interpretation.

2.1 Main topics to be investigated

Safety management depends on the daily or weekly information provided from the main contractor with the health and safety coordinator office including a 1-week look-ahead schedule. The data exchange is based on a .pdf file containing 2D images and schedules, which are not so easy to be understood. Usually the information transmitted to the health and safety coordinator includes: names of contractors' and sub-contractors' employees working on the construction site, restricted site areas where they are located, a summary of tasks carried out and to be performed, lists of plants, vehicles and equipment used by each contractors or sub-contractors, the approximate amount of the workers allocated to specific activities and the assessment of their potential interferences. A major criticality lies with the definition of the amount of resources to be assigned to each sub-area of construction site, dealing with the overcrowding of resources. Indeed, these sheets are not fully suitable to detect any daily critical situations and it is difficult to link data related to the amount of crews and their location on the construction site (Kiviniemi, Sulankivi, Kähkönen, Mäkelä and Merivirta, 2011).

2.2 Suggested measures

The prior target of the research project aimed to allow an effective and timely view of data and information retrievable in traditional graphical or non-graphical documents. Such attempt enabled a clear idea of site conditions (IOSH, 2013). The most critical period has been studied to detect any meaningful data related to the expected overcrowding of resources. To this end, the restricted areas, where the large construction site has been broken down, were modelled as object spaces ("spaces") in Autodesk Revit® 2014. This option allowed to identify a sort of information container or repository, to be weekly

aggiornabili. I parametri ad essi associati sono stati creati per includere le stesse informazioni contenute nei documenti tradizionali. In questo modo le annotazioni testuali non sono più semplicemente indicazioni a margine dei disegni, ma delle proprietà che caratterizzano l'elemento modellato. La parametrizzazione permette di visualizzare con "schemi colore" ed estrarre come abachi tali dati replicando, se necessario, il layout dei documenti tradizionali.

Inizialmente la trasposizione dei dati sotto forma di modello BIM ha riguardato l'analisi di quattro settimane successive. La possibilità di rappresentare attraverso "schemi colore" alcune delle informazioni associate agli oggetti parametrici, ha permesso un confronto tra le informazioni, soprattutto in merito al tema della gestione delle risorse, mezzi e addetti. Settimanalmente è stato effettuato, sulla base dei documenti cartacei, il conteggio del numero di addetti e mezzi impegnati nelle aree di lavoro. Lo "schema colore" è stato impostato in modo che venissero riportati attraverso i colori semaforici (verde, giallo e rosso) i dati numerici di riferimento suddivisi in range di affollamento. Così facendo si è resa rapida ed efficace la visualizzazione di quali fossero, nella settimana in esame, le aree maggiormente a rischio in funzione dell'indice di affollamento (Fig. 1).

L'implementazione di un parametro relativo all'attività svolta nelle aree di cantiere ha permesso, inoltre, l'individuazione immediata delle aree sottoposte ad attività di scavo (Fig. 2); così che venissero considerate come aree a maggiore rischio per le quali predisporre severe strategie di prevenzione.

Passate le quattro settimane in esame, è stata valutata la variazione del numero degli addetti e mezzi nelle aree in cui è suddiviso il cantiere. Il grafico, ottenuto mediante esportazione diretta in Excel® dei dati inseriti nel modello BIM, mostra come solo alcune aree siano state sottoposte a variazioni importanti che ne hanno cambiato lo status da zona "verde" a zona "rossa", o viceversa (Fig. 3).

updated. The associated parameters have been originated in order to incorporate the same information included in traditional documents; these data were not simply poor notes on the edges of the drawings, but special properties featuring any modelled element. Moreover, some "colour schemes" enriched the information quality. Initially, the data implementation concerned a 4-week monitoring time span. The chance of providing any careful visualisation through traffic light codes of information linked with parametric objects, enabled a comparison over several monitored weeks.

This process mainly concerned the resource management. The "colour schemes" have been set so that the numerical data (split into ranges of crowding) were reported through the traffic light colours: green, yellow and red. In doing so, a quick and effective visualisation of the location during a certain week, highlighted critical areas (Fig. 1).

Moreover, the implementation of a parameter relating to the performed activity in a special area allowed the sudden and prompt detection of zones assigned to excavations (Fig. 2).

These areas were assessed as highly risky, so severe prevention strategies were envisaged. After the expiration of the analysed time span, the change in the amount of workers and machinery operating over several areas was realised and evaluated. The graph obtained by a direct export to Excel® sheets from the BIM model shows that only few areas have been significantly changed (from red zones to green ones) (Fig. 3).

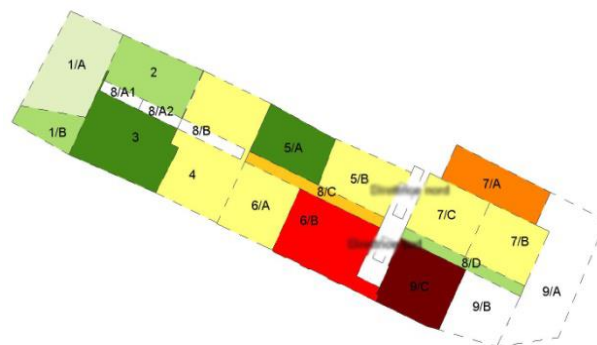


Fig. 1 Overcrowding Detection on restricted areas.

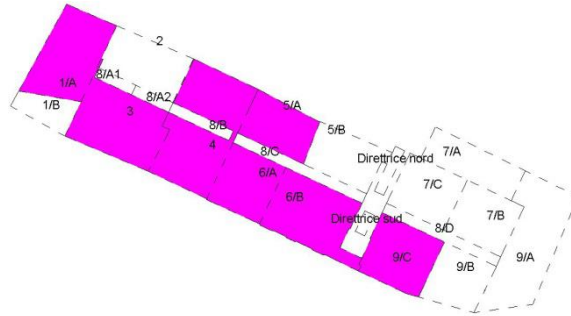


Fig. 2 Visualisation of areas to be excavated.

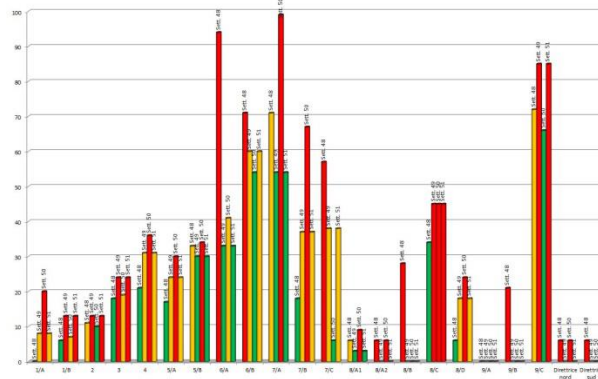


Fig. 3 Overcrowding histograms.

2.3 Scelte operative

Si è scelto di concentrare l'attenzione sulla rappresentazione di alcuni dei dati implementati nel modello al fine di testare l'effettivo miglioramento in termini di visualizzazione e comunicazione. Settimanalmente sono state estrapolate delle carte tematiche per avere un'idea chiara della situazione in cantiere; queste sono state poi inviate al coordinatore per la sicurezza in modo che potesse confrontare le previsioni rappresentate con la situazione reale.

2.4 Risultati conseguiti

L'analisi sistematica e approfondita degli elaborati ha permesso di identificare degli errori nell'inserimento delle informazioni da parte dell'impresa appaltatrice nei documenti trasmessi al coordinatore per la sicurezza. Un primo risultato è stato quindi, la richiesta di una maggiore precisione nella trasmissione dei dati. Questo processo ha permesso una chiara ed efficace visualizzazione delle aree più critiche facilitando l'individuazione grafica delle zone che necessitano di controlli e di prevenzione. Si è dimostrato, inoltre, come un approccio di questo tipo sia in grado di garantire un riscontro più rapido della situazione in cantiere ed una gestione più organizzata del flusso di informazioni.

2.3 Main findings

The research team chose to focus the attention only on a portion of Building Information Model data, in order to test the real enhancement in terms of visualisation and communication. Weekly thematic maps were extrapolated from the BIM to get a clear idea of the situation on site. Moreover, these maps were sent to the health and safety coordinator office so that it could compare the planned situation with the original assessments.

2.4 Main achieved results

The systematic and thorough analysis of data has quite often allowed to remark some failures in the information coming from the main contractor. Through the tested approach, therefore, the health and safety coordinator office imposed greater precision in data transmission to the main contractor. This process allowed a clear and effective visualisation of the most critical areas to be inspected. Moreover, such approach enabled timely and reliable information flows within the construction site.

2.5 Sviluppi futuri

Tra gli sviluppi futuri da considerare per questo tema vi è la possibilità di impostare una trasmissione in tempo reale tra modello e dati relativi agli accessi in cantiere, registrati ai varchi principali già predisposti per il controllo degli ingressi. Ne conseguirebbe un'automatizzazione del processo di analisi e, quindi, della valutazione della presenza di risorse in cantiere e del loro livello di affollamento. Per lo stesso fine si potrebbero inserire sensori in grado di rilevare la presenza delle risorse e il loro raggio d'azione (Zhang, Teizer, Lee, Eastman, Venugopal, 2013; Zhang and Teizer, 2013; Sulankivi, Teizer, Kiviniemi, Eastman, Zhang and Kim, 2012).

3. Gestione della viabilità in un cantiere di grandi dimensioni

Il tema della viabilità influisce sulla gestione della sicurezza in cantiere. È fondamentale proteggere l'utente più debole, il pedone, prevedendo percorsi protetti e distanze massime per raggiungere, dalle zone di lavoro, i punti di soccorso e le aree adibite ai servizi. Inoltre è possibile migliorare il livello di produttività e la gestione dei percorsi, mediante un'efficace visualizzazione delle strade e delle diverse configurazioni delle aree di lavoro, sulla base delle linee guida fornite dalla direzione lavori.

3.1 Problema, proposta e metodologia

Il caso di studio analizzato è un cantiere di grandi dimensioni all'interno del quale si sviluppano una molteplicità di sub-cantieri. La gestione della viabilità deve tenere in considerazione questo aspetto che comporta una difficile gestione, aggravata dalla presenza di operatori di nazionalità diverse. Il cantiere ha un'estensione elevata ed è omogeneo, questo genera difficoltà di orientamento anche a causa di una segnaletica non sufficiente alla piena comprensione della viabilità.

Visti i presupposti e la possibile difficoltà di comunicazione all'interno del cantiere, si è pensato di introdurre uno strumento e un metodo per la gestione della viabilità facilmente aggiornabile e condivisibile.

Il tema della viabilità è stato sviluppato attraverso la realizzazione di mappe liberamente modificabili (Open Street Map) la cui cartografia di base è disponibile online e può essere personalizzata attraverso un apposito editor. Le Open Street Map sono visualizzabili su sistemi android previa installazione della apposita app. Si tratta, quindi, di uno strumento esistente ma applicato in modo innovativo all'interno di un cantiere

2.5 Future works

Future works will deal with the ability to set up a link with real-time flows between the Building Information Model and data sets relating to the on-site access (recorded at main gates). This link could cause a semi-automated analytical process and, therefore, the timely assessment of resources and their crowding level. For the same purpose, the usage of sensors, capable of detecting the presence of the human resources and working extension area, will be investigated (Zhang, Teizer, Lee, Eastman, Venugopal, 2013; Zhang and Teizer, 2013; Sulankivi, Teizer, Kiviniemi, Eastman, Zhang and Kim, 2012).

3 The traffic management on large construction sites

The management of traffic in a construction site tremendously affects safety management.

In particular, the pedestrians have to be protected, through the design of secure paths, protected areas and their maximum distance.

The use of customized visualization tools can positively affect the management of the traffic and the management of temporary paths in the construction site. Indeed many path configurations can be synchronized with the construction planning and visualised by the workers in the construction site in real time.

3.1 Main topics to be investigated and suggested measures

The case history analysed is a large scale construction site, with within many small construction areas. Due to the different nationality of the workers and due to the high number of different construction companies, the management of the temporary paths in the construction site is very complicated. The site has a large dimensions, and it is almost flat, this can create a difficulty in the orientation of the workers, moreover a lack of road signs improve the level of difficulty during the displacements of the workers in the construction site.

Due to the difficulty in the communication between the workers in the construction site, the aim of the experimentation has been to provide them a tool for sharing information related to the paths network, always updated.

The tool has been developed as "open source street map", based on cloud environment, and customizable by the manager of the road viability.

The maps are available in Android devices through the installation of a free app. An existing tool used in innovative way in a large scale construction site.

Using a GPS system, the device keeps track, in real time,

di grandi dimensioni. L'utilizzo di un'apposita funzione della app permette l'acquisizione in tempo reale del percorso effettuato. Questo ha permesso agli operatori di cantiere di rilevare il tracciato stradale lasciando attiva tale funzione sul proprio smartphone durante il regolare svolgimento dei lavori.

Sulla base delle tracce acquisite, in formato gpx, vengono successivamente modellate all'interno dell'editor le strade di cantiere (Fig. 4). Inoltre attraverso l'uso di etichette preimpostate è stato possibile definirne le principali caratteristiche, quali classificazione funzionale, larghezza, direzione di marcia ed eventuali sensi unici, prescrizioni per una specifica tipologia di mezzi, blocchi temporanei e velocità massima. Successivamente sono state esplicitate le diverse caratteristiche dei principali punti di accesso all'area, tra cui nome, numeri di emergenza, autorizzazioni e orari di accesso. Sono stati rappresentati nella mappa anche tutti i sub-cantieri presenti definendone nome e numero identificativo, oltre che i punti di accesso nel rispetto delle regole alla circolazione dettate dalle linee guida fornite dal coordinamento per la sicurezza. Attraverso il comando di identificazione dei punti di interesse è possibile inoltre, localizzare punti di raccolta in caso di emergenza, mensa, servizi, telefono di emergenza, pompe antincendio, defibrillatore automatico, nonché i confini dell'area di cantiere. Creata la mappa, questa viene convertita nell'estensione supportata dal navigatore per android e caricata nell'archivio dell'app. A questo punto si dispone di una mappa offline sempre consultabile, integrata con quella già esistente per il contesto. È quindi possibile impostare come destinazione la sub-area di cantiere che si vuole raggiungere, ma anche un punto di attrazione o una destinazione tra quelle inserite nei propri "preferiti" personalizzati per impresa. Infine, la lingua può essere impostata in modo da garantire accessibilità al servizio da parte di tutti i lavoratori in un contesto multilinguistico.

of the position of the workers. In this way the workers detect the path in the construction site by activating the tool during the ordinary working operations.

Based on the construction site road detected, a digital model of the road is modelled in the editor, in .gpx format (Fig. 4). Moreover using digital tags, it has been possible to define the main characteristics of the paths, like function classification, width, and direction of travel and constrains, the requirements for a specific type of transportation, temporary modification of the paths and maximum speed.

Afterwards the main characteristics of the gates of the construction site have been defined. Characteristics like names of the gates, the emergence number, the entrance authorizations, and the timetable of the accesses. The sub construction sites have been also represented on the map, by the definition of their identification name and identification number, in addition the gates for the access have been identified, according with the safety guide. Using the interest point identification tool, it is possible to identify emergency collection areas, facilities, emergency telephone, fire pumps, automatic defibrillators, as well as the boundaries of the construction site.

Once the map is created, it is converted in a format supported by the Android navigator system and uploaded in the app archive. In this way is always available an offline map integrated with the existing maps.

Is therefore possible to set up the destination (sub area) in the construction site that workers want to achieve, but also an attraction point or a favourite destination, saved in the customized setting of the device by the construction company.

Furthermore is possible to set up the language of the app, in this way all the workers can easily use the tool.

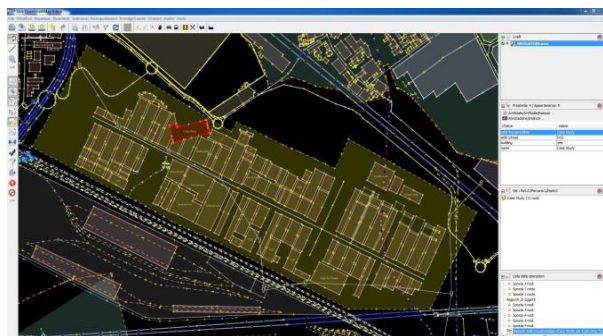


Fig. 4 Site Roads and Restricted Areas.

3.2 Risultati conseguiti

Il funzionamento della mappa per la circolazione in cantiere è stato testato durante una delle fasi di raccolta dati (Fig. 5) e si è registrato uno scarto tra viabilità modellata e strada reale talmente ridotto da poter essere considerato accettabile.

Si è riusciti a creare mappe fruibili da utenti di ogni nazionalità contenenti le informazioni principali sulla viabilità di cantiere permettendo un aggiornamento giornaliero attraverso il rilievo del tracciato stradale

Inoltre si è sviluppata una procedura per garantire agli operatori di cantiere di trasmettere tempestivamente eventuali segnalazioni. Dalle Open Street Map sono state estratte mappe cartacee georeferenzabili grazie ad un QR code. All'ingresso in cantiere gli operatori possono ricevere tale supporto su cui manualmente annotare osservazioni utili all'aggiornamento della viabilità. Dopo aver fotografato la mappa, anche solo con un semplice smartphone, è necessario inviarla ad una mail preimpostata e costantemente monitorata da un tecnico esterno. In seguito nell'editor, grazie al QR code, i file vengono posizionati correttamente all'interno della mappa editabile. In questo modo il tecnico è in grado di aggiornare il layout di cantiere e trasferirlo agli operatori.

3.3 Sviluppi futuri

Perché l'applicazione della metodologia descritta diventi una pratica consolidata è necessario che gli operatori in cantiere vengano forniti di smartphone sui quali scaricare l'applicazione gratuita di navigazione e la mappa offline personalizzata per poter essere sempre aggiornati su eventuali modifiche alla circolazione e supportati nei loro spostamenti. Vi è inoltre, la necessità di sviluppare un automatismo nella comunicazione, in tempo reale, da parte degli operatori di eventuali ostacoli o ostruzioni presenti in cantiere, in modo da permetterne la rimozione in breve tempo e contemporaneamente informare gli altri utenti del problema rilevato. Un ulteriore sviluppo riguarda la possibilità di importare il modello della viabilità in un software di analisi dei flussi di traffico. In questo modo sarebbe possibile studiare la congestione della circolazione all'interno del cantiere e nelle strade ad esso adiacenti che conducono all'ingresso, dato l'uso promiscuo di queste.

Obiettivo ultimo è la realizzazione di una app che permetta di contenere la molteplicità di analisi relative al cantiere oggetto di studio, dove si possano avere informazioni sulla viabilità ma allo stesso tempo, ad esempio, sull'affollamento di risorse, sugli edifici che man mano vengono realizzati e sulle prescrizioni da seguire in caso di emergenze.

3.2 Main achieved results

The proper functioning of the map for the circulation in the construction site has been tested during the phase of collection data (Fig. 5). A gap between road modelled and actual road network has been registered but it is so small that it can be considered acceptable.

It has been possible to create maps usable people of all the nationalities, containing the main information about the temporary roads in the construction site, daily updated through the detection system of the of roads.

In addition, it has been developed a procedure to ensure the prompt transmission of reports between the workers in the construction site.

From the Open Street Map it has been possible to extracted paper based maps. The maps have their coordinates system linked to a QR code system. At the entrance of the construction site the workers can receive the paper based map, on which they can manually annotate any comments and update the road network situation. The workers can also take a picture of the map, even with a simple smartphone, and send the images to an email address, constantly checked by an external technician. Thanks to the QR code system, the files are correctly placed on the maps. In this way, the technician is able to update the layout of the construction site and it can share it to all the workers.

3.3 Future works

In order to consolidate the procedure described, it is necessary to provide to the workers in the construction site one smartphone, on which they can download the free navigation app, and the off line customized map.

In this way they can be informed of every path modification or traffic problems, and they can be supported in their displacements in the construction site. In order to improve the efficiency of the system it is necessary to develop an up to date communication system, with the aim to have in real time information about problems, obstacles and other information related to the temporary paths.

A further step can be to link the model of the road in a traffic flow analysis software. In this way should be possible to check and compare the level of traffic in the construction site and at the same moment in the roads close to the entrances of the construction site.

Another objective is the realization of an app that allows to collect the different analysis, derived from different construction site, in order to compare them. It is so possible to have information about the roads traffic, but at the same time, for example, information about the crowding of resources, information about level of completion of the buildings and regulations to apply in case of emergencies.

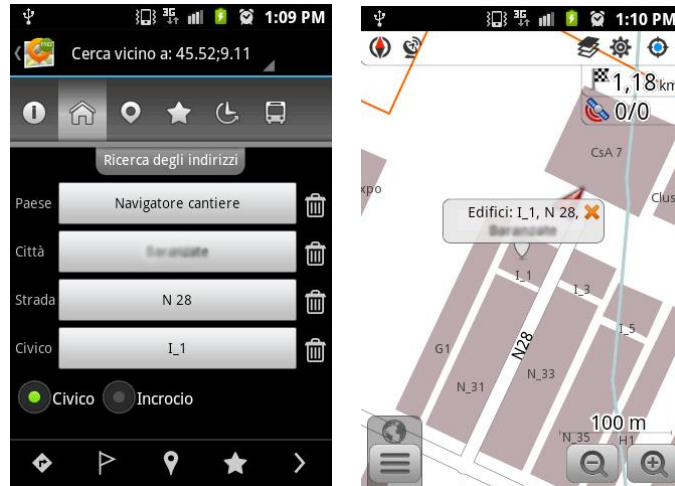


Fig. 5 Location query.

4. BIM-based site layout planning

Il tema della sicurezza in cantiere è stato indagato anche su un altro caso di studio, diverso per dimensione e tipologia costruttiva rispetto al precedente. Questo lavoro è oggetto di ricerca nell'ambito del Programma di Ricerca di Interesse Nazionale "Modellazione e gestione del patrimonio edilizio esistente". Il manufatto è una tipica cascina milanese in fase di ristrutturazione e adeguamento energetico e strutturale, soggetta ad una variazione di destinazione d'uso. Il cantiere si colloca all'interno di quello di grandi dimensioni: per questo motivo è influenzato dalle medesime scelte logistiche sulle lavorazioni e di gestione della viabilità interna.

4.1 Problema

La sperimentazione è iniziata quando il rilievo dello stato di fatto del cascinale era già stato ultimato e lo stato di progetto era in fase definitiva. L'impostazione del modello BIM, quindi, si è basata su documenti tradizionali in formato .dwg. La volontà di applicare la metodologia BIM si è scontrata con la corrente pratica progettuale, che prevede una frammentazione delle discipline e l'utilizzo di software CAD che poco si prestano ad un approccio interoperabile.

La modellazione ha riguardato anche il layout di cantiere, raccogliendo informazioni geometriche ed alfanumeriche derivanti da molteplici disegni bidimensionali, dal Piano di sicurezza e coordinamento (PSC) e dal Piano Operativo di Sicurezza (POS).

La presenza di edifici esistenti è stata la causa di una pianificazione di spazi operativi ristretti con conseguente amplificazione di rischi. A ciò si aggiunge una molteplicità di lavorazioni di demolizione e costruzione con una conseguente possibilità di congestionamento delle aree di lavoro a causa anche dei tempi ristretti disponibili per l'intervento. (Mallasi, 2006; Hu and Zhang, 2008).

4. BIM-based site layout planning

The construction health and safety management issue has been also investigated on a case study different for both size and construction type than the previous one. This work is being researched as part of the research programme of national interest "BHIMM: Building Heritage Information Modeling and Management". The case study concerns the refurbishment of a typical Milanese farmstead, as it is subject to a change of use. The construction site was already standing in that part of the territory where the large construction site is built. For that reason it is influenced by the same logistical choices about work and viability management.

4.1 Main topics to be investigated

The case study started when the traditional building surveying of the state-of-the-art had already been completed and the renovated project was in the final stage. The setting of the BIM model, therefore, was based on documents in the traditional .dwg format. The will to apply the BIM methodology has met with the current design practice, which involves a fragmentation of the disciplines and the use of CAD software that do not lend themselves to an interoperable approach.

The construction site has been also modeled, gathering geometric and alphanumeric information from a variety of 2D-drawings and documents. The presence of existing buildings has engendered a deal of overlaps and space conflicts. Moreover, it is important to notice that many demolition and construction tasks might cause overcrowding and congestion in some working areas because of the scarce available time for execution works (Mallasi, 2006; Hu and Zhang, 2008).

4.2 Proposta e metodologia

In una prima fase è stato eseguito, con il supporto del gruppo di topografia del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Brescia, il rilievo dello stato di fatto attraverso il terrestre laser scanner (TLS) Faro Focus 3D. Sono stati rilevati solamente gli esterni della cascina con laser montato su mezzo mobile effettuando la modalità Stop&Go. Successivamente e scansioni sono state georeferenziate per un allineamento semiautomatico, determinando, così, la posizione dei centri di presa mediante misure effettuate con stazione totale. È stato poi necessario ricorrere a un rilievo statico, con laser scanner e target sferici, a causa della vegetazione che copriva una porzione della superficie esterna. Dalla nuvola di punti estratta (Fig. 6), sono state estrapolate viste bidimensionali confrontabili con gli elaborati tradizionali al fine di valutarne eventuali difformità. A questo punto è stato sviluppato il modello 3D BIM dello stato di fatto e, partendo dai disegni bidimensionali, dello stato di progetto e del layout di cantiere.

La fase di rilievo si è svolta parallelamente a quella di impostazione del modello parametrico, sviluppato con il software di modellazione BIM Autodesk Revit® 2014. La fase preparatoria di modellazione ha previsto, a partire dal PSC e dalla prima bozza del piano dei lavori, la definizione delle principali macro fasi temporali in modo che ogni elemento creato potesse essere associato ad una fase costruttiva. Dal PSC, inoltre, sono state estrapolate ed associate al modello informazioni riguardo all'individuazione, all'analisi e alla valutazione dei rischi e le relative procedure esecutive, agli apprestamenti e alle attrezzature atte a garantire per tutta la durata dei lavori il rispetto delle norme per la prevenzione degli infortuni e la tutela della salute dei lavoratori. Questo ha permesso di visualizzare, tramite opportuni filtri, i componenti appartenenti alla fase analizzata. Inoltre il lavoro è risultato propedeutico alla creazione di un modello 4D BIM tramite l'unione del piano lavori al modello 3D.

Sono stati modellati, creando un'apposita libreria BIM di oggetti parametrici, tutti gli elementi che compongono il layout di cantiere. Tali oggetti non riguardano solo costruzioni permanenti, ma anche macchinari e opere temporanee presenti durante la realizzazione dell'opera (recinzioni, cancelli carrabili e pedonali, gru, macchinari movimento terra, betoniere, aree di stoccaggio, guardiane e baraccamenti) (Fig. 7, 8). Oltre ad una rappresentazione 3D, ad ogni oggetto modellato sono stati associati parametri quali la fase di lavorazione a cui appartengono, il raggio di azione e lo spazio che occupano all'interno del cantiere in modo da prevenire e valutare, in una successiva fase di analisi del modello, eventuali conflitti spaziali e temporali.

Infine dopo aver modellato il layout di cantiere, l'esportazione in formato Industry Foundation Classes (IFC) ha permesso di passare ad una prima fase di

4.2 Suggested measures

In this case, the implementation of the BIM methodology started with the so-called BIM-Surveying. The group of Topography at University of Brescia conducted the state-of-the-art survey with Faro Focus 3D terrestrial laser scanner (TLS). The exterior of the farmstead were detected with the laser mounted on a mobile vehicle carrying the Stop&Go mode. Subsequently scans were geo-referenced to be semi-automatically aligned by calculating the centre of point clouds over a known point by total station measurements. Static laser scanning with reference target spheres was necessary due to the vegetation that covered part of the exterior. From the point cloud (Fig. 6), two-dimensional views comparable to the traditional drawings were extrapolated in order to assess any differences.

At the same time as the BIM surveying phase was carried out, the model template has been set up and customized in Autodesk Revit® 2014. The model has been implemented with parameters extracted from construction health and safety plans and construction plan of work in order to define construction phases and requirements. In this way, every element modeled can be associated with a construction phase. Moreover, components belonging to the construction phase analyzed can be easily shown up with phase filters. These kind of settings are preparatory to the creation of a 4D model combining models created with the Autodesk® Revit platform with the plan of work to create 4D simulations of planned construction processes.

From the construction Health and safety plans, information were associated to the model such as evaluation of risks and related enforcement procedures, equipment to ensure the prevention of accidents and the protection of workers' health for the duration of the work. All the elements that make up the layout of the site were modeled and a BIM library of parametric objects has been created including construction machinery, protective devices and construction offices (Fig. 7, 8). These elements are defined from not only geometric 3D representation, but also alphanumeric parameters such as the processing stage to which they belong, the radius of action and the space they occupy within the construction site have been implemented. In this way, it is possible to prevent and to evaluate conflicts of space and time.

Finally, exporting to Industry Foundation Classes (IFC) is has been possible to move to Solibri Model Checker® (SMC) v9. Tests were carried out to create a customized ruleset to identify risk areas and inconsistencies with existing regulations and safety requirements.

controllo attraverso il software di Model Checking Solibri Model Checker® (SMC) v9. Sono stati effettuati dei test per creare un apposito ruleset al fine di individuare aree a rischio e incongruenze rispetto alle normative e alle prescrizioni in materia di sicurezza.

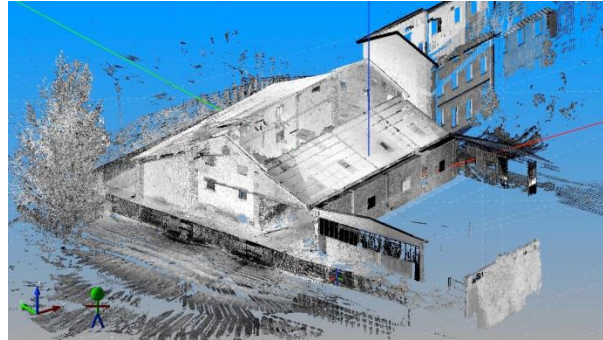


Fig. 6 Point clouds.

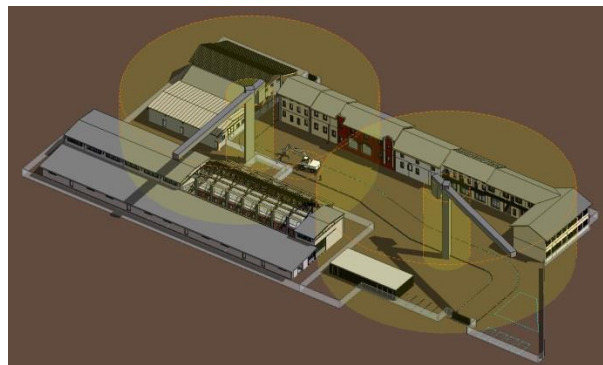


Fig. 7 3D Modeling of the construction site layout.

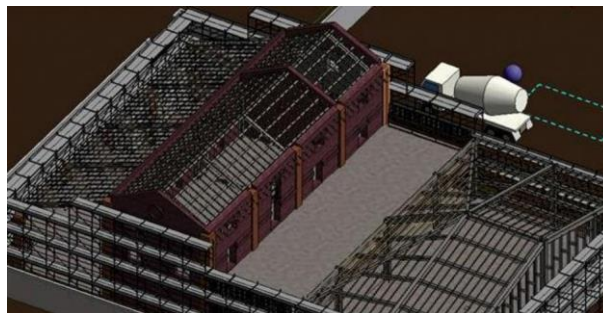


Fig. 8 Construction site temporary equipments.

4.3 Scelte operative

I temi che possono essere analizzati a livello di sicurezza del cantiere sono molteplici, ma solitamente ve ne sono alcuni che vanno monitorati costantemente, aggiornati di frequente e che caratterizzano ogni tipo di cantiere di una certa dimensione (Gilbane, 2013). Tra questi vi sono il tema della viabilità, della gestione degli spazi comuni al fine di evitare interferenze spaziali, la valutazione dei dispositivi di sicurezza adottati nei lavori di demolizione, scavo, smaltimento di materiali pericolosi e nelle lavorazioni in quota.

Completata la modellazione, si è passati ad una prima fase di model checking al fine di verificare la presenza

4.3 Main findings

There are several issues related to the health and safety management that can be investigated, but usually some need to be constantly monitored and frequently updated featuring each type of large construction site (Gilbane, 2013). Among such topics the coordination of shared areas and traffic management seems crucial, in order to avoid interferences. The evaluation of safety devices adopted during works such as demolitions, excavations, disposal of hazardous materials and working at heights is equally important.

Once the Building Information Model was carried out, an early model checking was performed to review certain

di determinati oggetti così come delle relative proprietà. Solibri Model Checker® v9, infatti, consente di effettuare un controllo dell'esistenza nel modello, e quindi nel progetto, di elementi indicati nel Piano Operativo della Sicurezza ed è inoltre possibile generare delle regole per controllare la dimensione di spazi, come ad esempio quelli delle aree di stoccaggio, affinché siano sufficienti per garantire l'accumulo di materiale (Fig. 9, 10). Altre regole sono state create per verificare la distanza tra gli oggetti e le diverse aree. Può, infatti, essere utile controllare che le baracche non siano eccessivamente distanti dagli accessi pedonali. Un'ulteriore verifica riguarda gli accessi al cantiere per assicurarsi che non vi siano elementi che ne impediscono l'effettiva apertura e che abbiano una larghezza sufficiente per permettere ai mezzi di entrare nell'area in lavorazione. Infine, per ragioni di sicurezza e di privacy, le recinzioni perimetrali devono avere un'altezza tale da impedire l'introspezione e un facile accesso ai non addetti ai lavori, è stato quindi creato un ruleset che permetta di verificarne la conformità al Piano Operativo di Sicurezza (POS).

Questo approccio innovativo consente alle parti interessate di aumentare la loro consapevolezza e quindi di gestire al meglio il cantiere.

elements as well as their properties.

Solibri Model Checker® v9, indeed, allows to check the complying objects within the Building Information Model, involving items listed into the health and safety construction plan. It is also possible to create special rule sets apt to control the suitability of the spaces, such as storage areas (Fig. 9, 10). Other rules have been defined in order to check, for example, the distance between objects and different areas: it might be useful to be ascertained that the construction site offices are not too distant from pedestrian accesses. Another test checked that there were not any elements hampering openings and that gates had sufficient width to allow the transit of vehicles. Finally, due to security and privacy, fences must be high enough to prevent unauthorised intrusions, so a rule was created to confirm their compliance with the health and safety construction plan. This innovative approach allows parties involved to increase their awareness and thus to improve the managerial performances on the construction site.

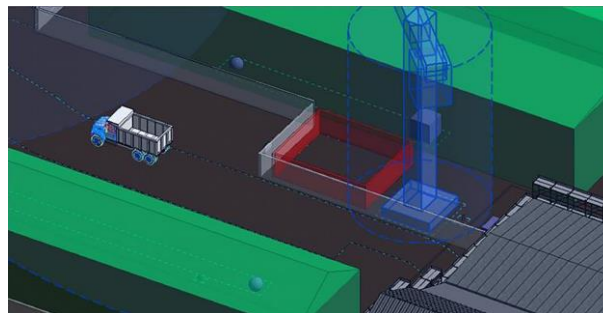


Fig. 9 Relation between tower crane and storage area.

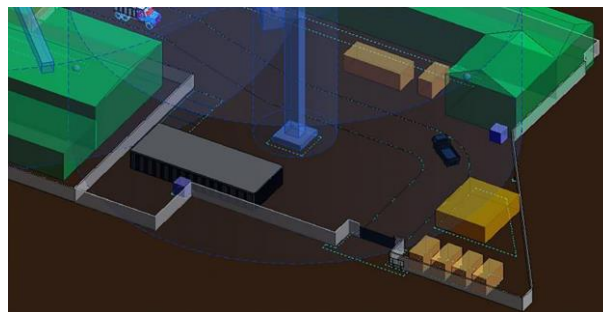


Fig. 10 Analysis of construction site areas.

4.4 Risultati conseguiti

Il trasferimento nel modello delle informazioni grafiche ed alfanumeriche, originariamente contenute in molteplici documenti e disegni bidimensionali, ha permesso una rapida ed efficace visualizzazione della cantierizzazione nelle macro fasi di lavorazione. Inoltre è stato possibile seguire l'evoluzione dinamica del progetto e del layout di cantiere, che spesso evolve per

4.4 Main achieved results

The transfer of graphical and alphanumeric information, originally contained in several documents and two-dimensional drawings, allowed a rapid and effective visualization of the construction site layout in the construction phases. It was also possible follow the dynamic evolution of the project and the construction site layout, which often evolves to satisfy the needs of the

meglio soddisfare le esigenze del processo costruttivo. Una migliore comprensione del progetto permette ai diversi soggetti coinvolti di lavorare con più consapevolezza e di poter così ottimizzare la gestione del cantiere anticipando la risoluzione di possibili problemi prima dell'inizio dei lavori. (COBIM, 2012)

Grazie alla creazione di volumi che rappresentano il raggio d'azione dei mezzi utilizzati, come ad esempio le gru, è stato possibile individuare zone di conflitto tra l'esistente e il cantiere o tra mezzi operanti nell'area cantierata.

SMC permette di implementare delle regole per controllare la conformità del layout a normative, così come a specifiche di cantiere. Questo strumento è assai efficace per accrescere la sicurezza (Bolpagni, 2013; Zhang, Lee, Venugopal, Teizer and Eastman, 2011; Hu and Zhang, 2011), specialmente in cantieri di grandi dimensioni, la cui gestione risulta spesso complessa.

È stata possibile l'individuazione delle interferenze spaziali e la verifica, per mezzo di un ruleset appositamente creato, dei requisiti minimi relativi alla presenza di recinzioni, spazi operativi dedicati allo stoccaggio dei materiali, strumenti di prevenzione incendio e raggi di azione delle gru.

4.5 Sviluppi futuri

Data la complessità delle lavorazioni di ristrutturazione ed i rischi ad esse associati, sarebbe utile sviluppare un modello 4D volto alla verifica della bontà delle scelte effettuate dal coordinatore della sicurezza e al confronto delle diverse varianti operative proposte dall'impresa appaltatrice. Il layout di cantiere spesso si evolve nel tempo e subisce delle modifiche per meglio soddisfare le esigenze del processo costruttivo. Non è sempre facile però, gestire efficacemente questi cambiamenti, soprattutto in cantieri di grandi dimensioni. L'approccio BIM, che permette di simulare virtualmente diverse configurazioni nel tempo (4D), è un valido aiuto per affrontare questa problematica (COBIM, 2012; Whyte and Larsen, 2012; Perlman, Sacks and Barak, 2014). Infatti, è possibile valutare ed analizzare, anche visivamente, la pianificazione dell'intervento in funzione di differenti configurazioni (baseline), spazi necessari per l'approvvigionamento dei materiali, spazi di manovra dei mezzi e gestione della congestione delle aree di lavoro. Per questo motivo nel modello è stato inserito un parametro che definisce il codice WBS dell'attività alla quale ogni elemento verrà associato. In questo modo, una volta importato il modello in software per il 4D modeling è possibile collegare automaticamente gli elementi parametrici al piano dei lavori. A tal fine è stata definita in partenza la granularità del modello BIM, essenziale perché vi sia coerenza tra il piano dei lavori ed il modello 3D stesso. La modellazione 3D dei mezzi di cantiere e degli elementi temporanei associati al piano lavori previsto permettono di simulare con appositi software i

construction process. A better understanding of the design allows parties involved to work with more awareness and thus be able to optimize the managerial performances and preventing several issues (COBIM, 2012).

Thanks to the creation of volumes that represent the range of the construction equipment used, such as tower cranes, it has been possible to identify conflicting areas between the existing buildings and the extension works.

As for the semi-automatic safety checks on the construction site, some test beds were carried out using SMC implementing the rule sets suitable to review the compliance of the construction site layout with enforced regulations as well as with special contractual guidelines. This tool is quite effective to improve safety performances (Bolpagni, 2013; Zhang, Lee, Venugopal, Teizer and Eastman, 2011; Hu and Zhang, 2011), especially on large construction sites.

It was also possible to identify the spatial interferences, by means of a dedicated rule set, as well as the compliance with minimum requirements, regarding the presence of fences, working spaces dedicated to the storage of materials, tools, fire prevention and rays of action of cranes.

4.5 Future works

Due to the complexity of refurbishment projects, a 4D Model might be set to review the reliability of solutions conceived by the health and safety coordination office. The comparison of different options and alternatives submitted by the main contractor might be more effective through the suggested approach. The layout quite often changes and amends over time in order to better meet the needs of the construction process. Thus, the BIM approach, which allows the virtual simulation and comparison of different configurations over time (4D), can be valuable support to address this issue (COBIM, 2012; Whyte and Larsen, 2012; Perlman, Sacks and Barak, 2014).

Indeed, it is possible to evaluate and analyze, even visually, the construction planning as a function of different configurations (baseline schedules), spaces needed for the procurement of materials, spaces for maneuvering of vehicles and congestion management workspaces. For this reason, the model has received a parameter that defines the WBS code of the activity to which each element is associated with. In this way, once imported the model into the 4D modeling software, it is possible to automatically link the parametric object to the plan of work. To this end it is fundamental to clearly define from the beginning the granularity of the BIM model, which is essential to guarantee consistency between the plan of work and the 3D model itself.

Moreover, the 3D Modelling of the construction vehicles and temporary works associated with the site management plan provides simulated workers' and equipment's flows, as well as it allows to identify hidden risks due to the lack

movimenti di operatori e mezzi in cantiere, individuando possibili rischi dovuti ad esempio alla mancanza di dispositivi di protezione (Fig. 11, 12, 13). Ulteriore ricerche potranno, quindi, essere svolte per individuare i giorni più critici. La configurazione spaziale prevista potrà essere estrapolata al fine di attuare una verifica con il ruleset creato in Solibri Model Checker® v9. Infine, il set di regole potrà essere sviluppato, integrandolo con un'analisi approfondita dei requisiti e dei parametri implementabili nel modello al fine di verificare aspetti salienti non solo geometrici, ma anche concettuali della normativa italiana in merito alla sicurezza nei cantieri.

of protective devices (Fig. 11, 12, 13). Therefore, a rule checking should be done to highlight the most critical days and find the best spatial configuration. Finally, the set of rules should be developed to integrate analysis of requirements and parameters that can be implemented in the information model in order to check non-geometrical properties, according to the enforced regulations.

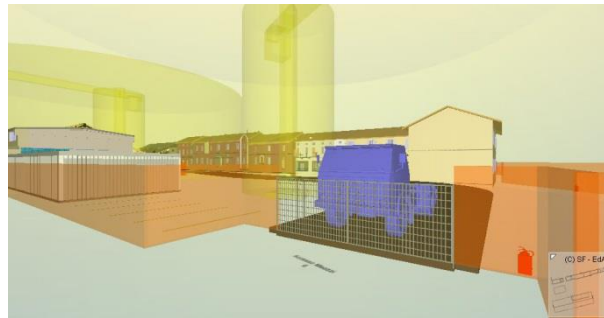


Fig. 11 Checking of the width of the gate.

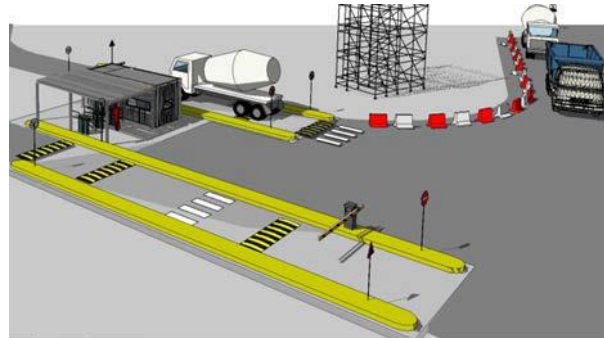


Fig. 12 3D Model of the main gate.



Fig. 13 Internal roads and crane extension areas.

5. Conclusioni

I controlli semi-automatici di conformità ai requisiti per la sicurezza nei cantieri sembrano essere ancora in una fase di sviluppo embrionale, ma è forte la convinzione circa la necessità di considerare la gestione della sicurezza già durante le prime fasi del processo di progettazione.

Il caso di studio più significativo è correlato al rischio di caduta dall'alto ed è stato affrontato dal VTT e dal Georgia Tech (Sulankivi, Teizer, Kiviniemi, Eastman, Zhang and Kim, 2010), ma anche le indagini sviluppate dall'University of Reading e Technion evidenziano come le simulazioni eseguite in un Collaborative Automatic Virtual Environment (CAVE) facilitino la comprensione di diverse sfumature che probabilmente sarebbero sfuggite ai controlli tradizionali sulla sicurezza (Zhou, Whyte and Sacks, 2012).

Un altro studio è stato condotto da ricercatori canadesi attraverso l'uso di recinzioni virtuali (Hammad, Cheng, Setayeshgar, Asen, 2012).

I primi risultati del programma di ricerca dimostrano chiaramente che, anche se è importante comprendere le implicazioni sulla sicurezza delle sequenze costruttive che si susseguono in un cantiere di grandi dimensioni, aspetti macroscopici relativi ai flussi e alle sovrapposizioni tra squadre di lavoro sembrano anche più rilevanti. In ogni caso, il progresso dell'applicazione di controlli semi-automatici per la sicurezza, estesi a tutti i tipi di infortuni e incidenti, implica che questi includano chiaramente le dinamiche spaziali derivanti dalla Critical Space Analysis (Melzner, Zhang, Teizer and Bargstädt, 2013).

A tal fine, ulteriori studi verranno svolti sull'implementazione di un serious game per migliorare ed integrare l'automated safety rule checking.

5. Conclusions

The automated safety rule check seems to be still in its infancy, however, there is the need to consider the safety-oriented matters during the early stages of the design process.

The most significant case study has been related to falls from height and has been performed by VTT and Georgia Tech (Sulankivi, Teizer, Kiviniemi, Eastman, Zhang and Kim, 2010), although also the surveys developed by the University of Reading and by Technion highlight the extent to which simulations performed at a Collaborative Automatic Virtual Environment (CAVE) make easier the understanding of several nuances that probably would escape to safety automated rule checks (Zhou, Whyte and Sacks, 2012).

Another trial has been conducted by Canadian researchers using virtual fences (Hammad, Cheng, Setayeshgar, Asen, 2012).

The first results of the research program clearly demonstrate that, although it is important to realise safety implications of the construction sequences on large construction sites, macroscopic aspects related to the flowing and overcrowding seem even more relevant.

In any case, the progress of investigations on automated safety rule checking, extended to all types of accident and incidents, implies that projects must include spatial dynamics derived from critical space analysis (Melzner, Zhang, Teizer and Bargstädt 2013).

To this end, further studies will be focus on the implementation of serious game simulations to improve and integrate the automated safety rule checking.

6. References

1. Cheng, T. and Teizer, J., “Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications”, *Automation in Construction*, 34, pp. 3–15, (2013).
2. Gilbane, “BIM and Safety Planning: Using BIM to create safe and efficient sites for workers and clients”, Washington University, St. Louis, MO, (2013).
3. COBIM, Finnish Common BIM Requirements v 1.0, “Series 13: Use of Models in Construction”, (2012). On-line: <http://www.en.buildingsmart.kotisivukone.com/3>, Accessed: 26/01/2014.
4. Bolpagni, M., “The implementation of BIM within the public procurement. A model-based approach for the construction industry”, VTT Technology, (2013).
5. Kiviniemi, M., Sulankivi, K., Kähkönen, K., Mäkelä, T. and Merivirta, M. L., “BIM-based Safety Management and Communication for Building Construction”, VTT Research Notes 2597, (2011).
6. IOSH, “Safety and Design: On-Site Insight”, UK, (2013).
7. Zhang, S., Teizer, J., Lee, J.-K., Eastman, C. and Venugopal, M., “Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules”, *Automation in Construction*, 29, pp. 183-195, (2013).
8. Zhang, S. and Teizer, J., “Automated Safety-in-Design Rule-Checking for Capital Facility Projects”, *Proceedings of the 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Montreal, Canada, August 11-15, (2013).
9. Sulankivi, K., Teizer, J., Kiviniemi, M., Eastman, C.M., Zhang, S. and Kim, K., “Framework for Integrating Safety into Building Information Modeling”, *Proceedings of CIB W099*, Singapore, pp. 93-100, September 10-11, (2012).
10. Mallasi, Z., “Dynamic quantification and analysis of the construction workspace congestion utilising 4D visualization”, *Automation in Construction*, 15, pp. 640–655, (2006).
11. Hu, Z. and Zhang, J.-P., “Construction process simulation and safety analysis based on building information model and 4D technology”, *Tsinghua Science and Technology*, 13, pp. 266–272, (2008).
12. Zhang, S., Lee, J. K., Venugopal, M., Teizer, J. and Eastman, C. M., “Integrating BIM and safety: an automated rule-based checking system for safety planning and simulation”. *Proceedings of CIB W099*. Washington, DC: CIB, (2011).
13. Zhang, J.P. and Hu, Z. Z., “BIM- and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 1. Principles and methodologies”, *Automation in Construction*, 20, pp. 155–166, (2011).
14. Whyte, J. and Larsen, G., “Safe construction through design: perspectives from the site team”, *Construction Management and Economics*, (2013).
15. Perlman, A., Sacks, R. and Barak, R., “Hazard recognition and risk perception in construction”, *Safety Science*, (2014).
16. Sulankivi, K., Kähkönen, K., Mäkelä, T. and Kiviniemi, M., “4D-BIM for construction safety planning”, Barrett P et al. (eds), *Proceedings of CIB World Congress*, Manchester: CIB, (2010).
17. Zhou, W., Whyte, J. and Sacks, R., “Construction safety and digital design: A review”, *Automation in Construction*, 22, pp. 102–111, (2012).
18. Hammad, A., Cheng, Z., Setayeshgar, S. and Asen, Y., “Automatic generation of Dynamic Virtual Fences as part of BIM-based prevention program for construction safety”, *Simulation Conference (WSC)*, *Proceedings of the 2012 Winter*, pp. 1,10, 9-12, (2012).
19. Melzner, J., Zhang, S., Teizer, J. and Bargstädt, H.- J., “A case study on automated safety compliance checking to assist fall protection design and planning in building information models”, *Construction Management and Economics*, Volume 31, Issue 6, (2013).