

# Building Information Modeling: new frontiers for structural Engineering

## Building Information Modeling: nuove frontiere per l'ingegneria strutturale

A. Salzano<sup>1</sup>, D. Asprone<sup>1</sup>, E. Cosenza<sup>1</sup>, G. Manfredi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura – Università di Napoli Federico II*

**ABSTRACT:** Nowadays Building Information Modeling (BIM) is representing a revolution in the design and management of civil construction works. It is a methodological approach, based on the integration within a 3D model of all information databases linked to the construction disciplines (architecture, structure, MEP, etc.), by means of parametric object modelling. Such an approach is based on the interoperability among all software applications supporting the entire lifecycle management of a civil construction work: concept, design, construction and facility management during the operational phase. The BIM capability of managing a great amount of information and complex procedures through an integrated system of collaborative methods and processes opens new frontiers of development to the entire construction sector and therefore to structural engineering. / Il Building Information Modeling (BIM) sta rappresentando oggi una rivoluzione nella progettazione e nella gestione di opere civili, in molti contesti nazionali ed internazionali. Si tratta di un approccio metodologico, basato sull'integrazione in un modello 3D, unico e condiviso, di tutti i database informativi legati ai sistemi che compongono l'opera (architettonico, strutturale, impiantistico, ecc.), attraverso una modellazione parametrica ad oggetti. Tale approccio è basato sul concetto di interoperabilità tra tutti gli applicativi software a supporto della gestione di tutto il ciclo di vita di un'opera civile: ideazione, progettazione, esecuzione e gestione della manutenzione nella fase di esercizio. La capacità del BIM di gestire una grande mole di informazioni e procedure complesse mediante un sistema integrato di metodi e processi collaborativi apre nuove frontiere di sviluppo a tutto il settore delle Costruzioni e quindi per la ingegneria strutturale.

**KEYWORDS:** Building Information Modeling; virtual reality, structural engineering; Building Information Modeling; ingegneria strutturale; realtà virtuale

## 1 INTRODUZIONE

### 1.1 Scenario di riferimento

L'industria delle costruzioni rappresenta uno dei principali motori dell'economia mondiale. Tale aspetto è determinato dall'enorme e complesso sistema che gravita intorno alla realizzazione di un manufatto o di un'opera civile in termini di produzione di materiali, di attori coinvolti nella fase di progettazione e realizzazione delle opere fino ad arrivare alla fase di uso di queste ultime (Tam C., Tam VW, Tsui 2004).

Il settore delle costruzioni è, quindi, in continuo fermento sia dal punto di vista dello sviluppo di nuovi prodotti che di nuovi processi entrambi volti all'incremento della sostenibilità e alla massimizzazione della sicurezza strutturale delle opere civili.

Questo contesto di riferimento ha determinato una sempre maggiore complessità delle realizzazioni dell'industria delle costruzioni, una crescente domanda prestazionale delle opere nonché una crescen-

te richiesta di sicurezza strutturale nel campo dello stato limite di danno.

In aggiunta a tali aspetti, è necessario considerare anche l'andamento delle configurazioni geometriche delle costruzioni moderne che diventano sempre più complesse, sia per quanto riguarda la verifica degli elementi portanti che per quanto riguarda la realizzazione in cantiere delle stesse.

Tutto ciò ha generato, nell'intero processo edilizio, un'enorme mole di informazioni, dati e regole difficili da gestire senza considerare opportune approssimazioni.

E' in tale ambito, che forti anche dell'avanzamento tecnologico hardware e software, si sono sviluppati nuovi strumenti a supporto della progettazione e gestione delle opere civili.

Il Building Information Modeling (BIM) nasce, infatti, come inevitabile risposta alla sempre crescente complessità delle opere da realizzare sia in termini di domanda prestazionale che di normative, sempre più stringenti, da rispettare.

Esso si colloca come metodologia di gestione del processo edilizio caratterizzato da un sistema complesso di attività che si sviluppano durante tutto il ciclo di vita di un'opera civile.

La capacità del BIM di suddividere in attività semplici il processo edilizio e la digitalizzazione dello stesso permette agli attori della filiera delle costruzioni di gestire e monitorare tutte le fasi del ciclo di vita di un'opera dalla pianificazione, alla progettazione, alla sua realizzazione, alla gestione durante la fase di esercizio fino alla dismissione della stessa.

I vantaggi legati ad un approccio di questo tipo sono numerosi, nelle diverse fasi della progettazione fino alla gestione dell'opera nel suo ciclo di vita. La transizione verso le metodologie BIM è incentivata da una progressiva introduzione di questi approcci nella gestione delle opere pubbliche da parte delle amministrazioni in diversi Paesi del mondo e dalle recenti modifiche al Codice degli Appalti in Italia muovono in questa direzione.

Le forti potenzialità del BIM permettono di raggiungere soluzioni progettuali non possibili in passato innalzando il livello di qualità e di sicurezza delle opere da realizzare.

Oltre ai concreti vantaggi che il BIM introduce nell'immediato nel comparto delle costruzioni, tale lavoro mira ad evidenziare alcuni sviluppi futuri che esso permetterà di realizzare. Grazie all'integrazione di tutte le discipline ingegneristiche ed all'accurato controllo dei dati di progetto sarà possibile superare le soglie delle attuali della progettazione.

L'obiettivo principale del presente lavoro è quello di individuare le principali opportunità che si riescono a cogliere dall'approccio BIM nella progettazione strutturale.

## 1.2 *Building Information Modeling*

In letteratura non esiste una definizione univoca ed esaustiva della metodologia BIM. La difficoltà di definire il BIM nasce anche dai tanti campi che esso riesce a gestire nell'ambito del settore delle costruzioni.

Due delle definizioni meritevoli di nota sono quelle fornite da C. Eastman nel 1999 che descrive il BIM come: "Una rappresentazione digitale del processo costruttivo che facilita lo scambio e l'interoperabilità delle informazioni in formato digitale" e quella dell'AIA (American Institute of Architects) che invece definisce il BIM come "Una tecnologia di modellazione collegata ad un database di informazioni di progetto"

Entrambe le definizioni, tuttavia, non riescono ad esprimere a pieno tutti gli aspetti di tale metodologia.

La definizione che forse, meglio di altre, spiega cosa rappresenta il BIM è quella del National BIM Standards Project Committee of the BuildingSMART Alliance, il quale afferma che: "Il Building Information Modeling è una rappresentazione digitale di caratteristiche fisiche e funzionali di

un edificio, e in quanto tale funge da sorgente di conoscenza condivisa per le informazioni riguardo la creazione di un edificio e una base affidabile per le decisioni durante il suo ciclo di vita, partendo dall'idea che l'ha originata in poi. Il BIM è una rappresentazione digitale comune basata sull'interoperabilità".

Per dare una definizione chiara di tale metodologia è necessario chiarire che l'acronimo BIM è utilizzato sia per descrivere un'attività, Building Information Modeling, sia per descrivere un oggetto, Building Information Model.

Come attività il BIM è la metodologia per la gestione dell'insieme dei processi e delle informazioni utilizzate da tutti i partecipanti al processo edilizio al fine di realizzare un'opera civile e di gestire e monitorare la stessa durante il suo intero ciclo di vita.

Come oggetto, invece, il BIM è inteso come le componenti, che compongono il modello virtuale dell'opera, complete di tutte le caratteristiche fisiche, meccaniche e funzionali come ad esempio massa, conducibilità termica e calore specifico fino ad arrivare a marche, modelli di produzione e relative indicazioni di costo.

Il modello BIM, quindi, restituisce il modello 3D "reale" dell'opera, cioè un modello in cui ogni oggetto non è solo una mera rappresentazione grafica, come nel caso della progettazione CAD, bensì una effettiva modellazione tridimensionale solida che contiene tutti gli attributi ed informazioni che definiscono l'oggetto stesso.

Il BIM riesce ad integrare, in un modello unico e condiviso, l'insieme dei processi e delle informazioni utilizzate per la progettazione, realizzazione e gestione, utilizzando modelli creati da tutti i partecipanti al processo edilizio, in tempi diversi e anche per scopi non uguali tra loro al fine di garantire qualità ed efficienza durante l'intero ciclo di vita del manufatto (Salzano A. et al. 2015).

Quest'ultimo aspetto è assicurato dall'interoperabilità tra il modello BIM ed i vari ambienti software sia di calcolo ingegneristico che di Facility Management (FM) (ISO 16739:2013). Il concetto di interoperabilità è alla base del BIM e permette la completa condivisione delle informazioni dei diversi campi specialistici consentendo di poter esportare, dal modello unico BIM, i diversi modelli delle varie discipline nei propri ambienti di calcolo per effettuare analisi ed eventuali modifiche progettuali. Il modello creato in BIM è un "file sorgente" per i diversi professionisti coinvolti nella progettazione e, più in generale, per tutti gli operatori del settore AEC (Architecture, Engineering, Construction) e FM che, con estrema semplicità, possono attingere dal suddetto file sorgente, unico e condiviso, tutte le caratteristiche necessarie al loro campo specialistico.

L'interoperabilità si definisce come la capacità di condividere e scambiare rapidamente ed accurata-

mente i dati e le informazioni di prodotti e di processi tra i sistemi utilizzati dal team di progettazione migliorando l'efficacia e l'efficienza del processo edilizio.

L'interoperabilità permette lo scambio dei dati senza la perdita evidente di informazioni e nella maniera più semplice possibile. Tutti gli attori del processo edilizio come ingegneri, architetti, imprese di costruzioni e tutte le figure che svolgono un ruolo attivo nella definizione del modello hanno la possibilità di lavorare separatamente realizzando i propri file locali di progetto.

Ogni modifica o integrazione effettuata al progetto, dai singoli operatori, viene contestualmente trasferita al modello unico centrale in modo tale da minimizzare la perdita di informazioni, durante la fase di progettazione, e di valutare eventuali criticità tra la congruenza dei dati e tra i diversi livelli progettuali (A.Salzano 2015).

Date tali peculiarità e potenzialità, non è possibile definire il BIM come una nuova tecnologia né tantomeno come un contenitore di software bensì come una nuova metodologia di lavoro a supporto di tutto il processo edilizio e per tutti i partecipanti al settore delle costruzioni civili.

Il BIM, infatti, è un approccio progettuale e di gestione di un'opera civile basato sull'implementazione parametrica, la quale cresce in funzione della fase del processo edilizio da raggiungere.

In sintesi, laddove il BIM fosse interpretato come un semplice software, si rischierebbe di incorrere nell'errore di utilizzarlo come modellatore 3D per poi sviluppare gli elaborati progettuali con l'approccio tradizionale 2D, incrementando notevolmente tutti i costi ed i tempi di progettazione di un'opera. Quando il BIM è, invece, compreso ed integrato, sotto tutti i punti di vista, come protocollo di progettazione e come strumento di gestione dei flussi di lavoro (Workflow), riesce a fornire supporto a tutto il processo edilizio.

## 2 LE NUOVE FRONTIERE PER L'INGEGNERIA STRUTTURALE

### 2.1 *Introduzione alle nuove frontiere*

In ambito strutturale le novità che è possibile attendersi nel prossimo futuro dalla transizione verso la progettazione in BIM sono numerose, e questo lavoro intende analizzare le principali opportunità che è possibile cogliere dall'approccio BIM nella progettazione strutturale. Innanzitutto, i principali vantaggi sono legati alla possibilità di operare una progettazione strutturale integrata dell'opera, potendo gestire le interazioni con i componenti non strutturali e potendo condurre agevolmente verifiche relative alle performance dei vari componenti, tanto allo stato limite di servizio quanto allo stato limite di operativi-

tà, nonché analisi di perdite economiche attese, indotte da hazard naturali. La modellazione avanzata 3D consente inoltre di poter gestire configurazioni geometriche complesse di componenti strutturali, in acciaio e in cemento armato, quali gabbie di armature o connessioni particolarmente complicate, potendo agevolare le fasi di installazione in cantiere e le fasi di manutenzione. Tali visualizzazioni, in ambiente di realtà virtuale, possono velocizzare la verifica di fattibilità di configurazioni particolarmente complicate e quindi le operazioni di montaggio dei sistemi strutturali. La progettazione parametrica dietro l'approccio BIM può inoltre supportare l'ottimizzazione di forme strutturali complesse, di particolare valenza estetica, avvicinando quindi, specie per opere di particolare valore, il momento della progettazione strutturale e di quella architettonica.

### 2.2 *La Dimensione Meccanica nel BIM*

Nell'ambito del BIM, in funzione della fase del processo edilizio nel quale è utilizzato, si definiscono le dimensioni della metodologia. Si parte dalla dimensione 3D che definisce e gestisce la progettazione integrando tutte le discipline dell'opera in un unico modello condiviso per poi passare alle dimensioni 4D e 5D che permettono la gestione dei tempi e dei costi fino ad arrivare alla dimensione 6D che riguarda la gestione dell'opera durante la fase di esercizio della stessa. Utilizzando lo stesso criterio per la terminologia tecnica nell'ambito del BIM si propone in questo lavoro una nuova dimensione che permette di gestire alcune criticità della progettazione strutturale. Nell'ambito della progettazione strutturale, infatti, la tendenza del mondo scientifico sta andando sempre di più verso criteri antisismici rivolti non solo alle componenti strutturali del sistema edificio ma anche verso le componenti non strutturali che lo compongono.

Tale aspetto risulta di semplice comprensione in quanto non è detto che il pericolo, in caso di sisma, sia rappresentato necessariamente dal collasso della struttura piuttosto che dalla crisi fragile o duttile di un elemento strutturale. Spesso il pericolo, all'atto dell'evento sismico, è rappresentato proprio dagli elementi e dai componenti non strutturali che possono rivelarsi dannosi per l'incolumità delle persone oppure diventare un ostacolo per le vie di fuga.

Seppur l'obbligo di rispettare le verifiche allo stato limite di operatività sono imposte solo per gli edifici di interesse strategico, quali strutture ed infrastrutture la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per finalità di protezione civile, non è detto che approcciando con procedure rapide, integrate e standardizzate non sia prevedibile l'utilizzo di criteri antisismici per le componenti non strutturali anche per edifici non di interesse strategico in modo tale da aumentare il livello di sicurezza

del costruito. In questo scenario si inserisce il BIM, in cui le modellazioni ingegneristiche di struttura, architettura e impianti interagiscono direttamente, per due aspetti principali, il primo come strumento di supporto per la progettazione allo stato limite di danno (SLD) e operatività (SLO) e quindi per le operazioni di collaudo per gli edifici strategici; il secondo come strumento di modellazione parametrica degli oggetti non strutturali inserendo dati sismici del singolo componente.

Per quanto riguarda il primo caso, mediante l'utilizzo del BIM, è possibile effettuare verifiche delle tolleranze dei componenti per gli spostamenti indotti dagli eventi sismici. Basti pensare, ad esempio, agli impianti per gli edifici strategici, come ospedali, la cui progettazione sismica è caratterizzata da dettagli volti ad evitare il tranciamento degli stessi causato dagli spostamenti derivati da eventi sismici. La modellazione 3D degli impianti già pone in essere un valido supporto alla progettazione di tali dettagli ma l'approccio BIM, nell'ambito delle applicazioni future, dà la possibilità di automatizzare il processo di verifica e controllo di tali dettagli antisismici grazie alla possibilità di poter inserire formule e regole che vincolino le geometrie o le distanze tra le varie componenti.

L'altra frontiera che il BIM può garantire riguarda la progettazione antisismica delle componenti non strutturali degli spazi interni quali ad esempio, arredi, macchinari, condizionatori, armadi e similari. A tal proposito la modellazione parametrica ad oggetti, come detto in precedenza, permette l'inserimento di qualsivoglia tipologia di informazioni nell'oggetto BIM. Tale peculiarità fa nascere l'intuizione di poter integrare negli oggetti BIM informazioni di tipo sismico di componente come ad esempio, la massa sismica e l'accelerazione di progetto del singolo componente. Con tale approccio, sarà più agevole progettare i dispositivi di sicurezza antisismici (ganci, tiranti etc.) per ogni singolo componente interno in modo tale da aumentare il livello di sicurezza degli ambienti interni dando una forte attenzione alla verifica ed il rispetto dello SLD e SLO.

In figura 1 è rappresentato, in maniera schematica, l'approccio per la dimensione meccanica proposta in questo lavoro.

Con il medesimo approccio è possibile integrare altre tipologie di informazioni in ogni singolo oggetto BIM come i parametri che definiscono la curva di fragilità degli stessi. A tal proposito, si definisce curva di fragilità, riportata in figura2, di un componente come la relazione che restituisce la probabilità di superamento di un definito stato di danno in funzione di un parametro indicativo della risposta sismica della struttura (EPD). Tale parametro deve essere rappresentativo del comportamento dell'edificio sotto sisma. In letteratura il parametro maggiormente utilizzato è l'accelerazione sismica massima al piano, oppure, nel caso della risposta delle componenti non strutturali il parametro che meglio rappresenta la risposta sismica è rappresentato dallo spostamento relativo di piano (Inter-storey Drift, IDR); in altri casi, specie per il ribaltamento di componenti non strutturali, il parametro meccanico di riferimento può essere la massima velocità che subisce l'oggetto nella posizione in cui si trova.

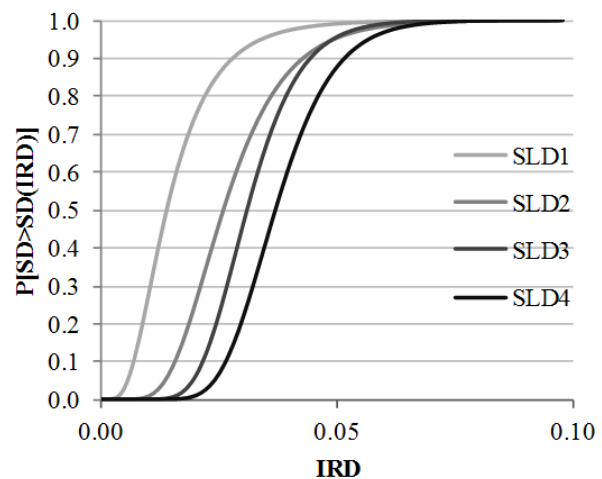


Figure 2. Example of fragility curve / Esempio di curva di fragilità.

In tal modo, per ogni componente di un'opera edile, sia esso strutturale o non strutturale, è possibile definire una funzione di vulnerabilità associato allo stato di danno considerato per mezzo delle curve di fragilità. Dunque incorporano le curve di fragilità nel BIM, nella richiamata "Dimensione meccanica", la modellazione ingegneristica complessiva e l'interoperabilità consentiranno direttamente analisi di fragilità, come si vedrà nel par. 2.3.

Le forti potenzialità del BIM unite alle applicazioni descritte in precedenza permettono di aprire nuove frontiere anche nell'isolamento sismico delle strutture. Una struttura isolata sismicamente alla base determina, sotto sisma, un comportamento approssimabile al moto di un corpo rigido che subisce spostamenti decisamente diversi rispetto alla base non isolata. Tale comportamento determina la neces-

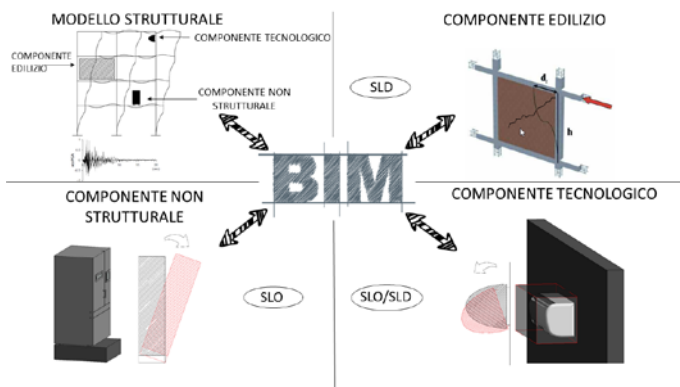


Figure 1. New frontiers for seismic design of non-structural components / Nuove frontiere per la progettazione antisismica delle componenti non strutturali.

sità di utilizzare dispositivi volti a contenere gli effetti dei diversi spostamenti tra la struttura isolata e la base non isolata come tranciamenti degli impianti o martellamenti tra le strutture. In figura 3 vengono riportati alcuni esempi di giunti tecnici per sistemi impiantistici.



Figure 3. Example of technical joint for MEP systems / Esempio di giunto tecnico per impianti.

Avendo a disposizione un modello BIM completo ed integrato sarà possibile effettuare in maniera agevole ed immediata le verifiche degli spostamenti di progetto per le giunzioni tecnologiche impiantistiche e edilizie.

### 2.3 Analisi delle perdite economiche attese indotte da hazard naturali

Un'opera edile nell'arco della sua vita utile può essere interessata da eventi che ne riducono le prestazioni strutturali e comportano la nascita di costi da affrontare per il ripristino della funzionalità delle componenti che la costituiscono. Le spese che occorre sostenere possono essere relative ad attività di manutenzione ordinaria oppure riguardare avvenimenti non previsti soggetti ad una aleatorietà più o meno elevata. Mentre è possibile valutare con buona precisione gli esborsi associati alle prime non altrettanto immediato risulta il computo estimativo dei danni causati da eventi straordinari.

La valutazione della perdita economica attesa non è un obiettivo semplice da raggiungere sia per l'aleatorietà dell'evento sismico che per l'eterogeneità degli elementi presenti in un edificio. La caratterizzazione delle componenti costitutive l'opera è, pertanto, un aspetto di fondamentale importanza e già in tale ambito si riconosce l'opportunità dell'utilizzo del BIM.

In linea generale un'opera edile si compone di:

- Una componente strutturale;
- Una componente architettonica;
- Una componente impiantistica.

Il peso economico delle tre parti è strettamente legato alla categoria d'uso dell'opera. Se si confronta, ad esempio, nell'ambito delle strutture pubbliche, un edificio che non ha funzione strategica con un

ospedale si nota che nell'ultimo le voci di costo relative alle componenti caratterizzanti l'opera, con riferimento particolare agli impianti e alle attrezzature speciali, rappresentano una percentuale del costo complessivo dell'infrastruttura di gran lunga maggiore.

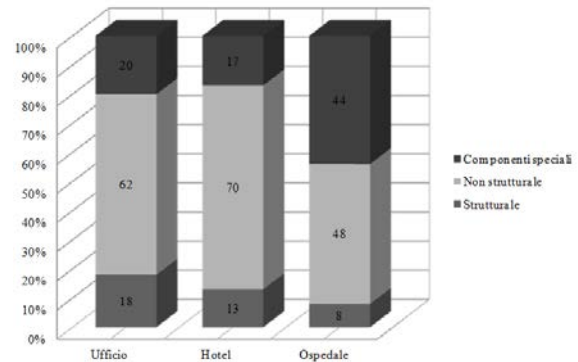


Figure 4. Economic values of different systems in buildings / Confronto riparto valore economico infrastrutture pubbliche (Fonte: FEMA E-74).

Nella figura 4, infatti, si riporta l'incidenza percentuale delle componenti strutturali, non strutturali e speciali sul costo complessivo dell'opera.

Il confronto viene eseguito tra tre differenti categorie di edifici pubblici. Si osservi come nel caso degli ospedali la voce di costo "componenti speciali" rappresenti quasi la metà del costo globale dell'infrastruttura.

Eseguita un'analisi del rischio sismico e investigata la risposta della struttura è necessario definire, ai fini della valutazione della perdita economica complessiva dell'edificio, in che misura si danneggiano i diversi componenti che la costituiscono a seguito di un evento di una certa entità. Per riuscire in tale obiettivo occorre introdurre dei parametri rappresentativi dello stato di danneggiamento degli elementi studiati. La prima difficoltà è relativa al fatto che questi parametri non sono univocamente definiti né è detto che siano significativi allo stesso modo per gli elementi strutturali, architettonici e per gli impianti.

La trattazione corretta del problema, pertanto, prevede di:

- Valutare l'input sismico;
- Caratterizzare la risposta sismica della struttura;
- Definire il parametro o i parametri rappresentativi dello stato di danno dell'edificio;
- Ricavare delle funzioni che correlino il parametro in gioco alla probabilità di superamento dello stato di danno corrispondente (curve di fragilità);
- Quantizzare il danno;
- Valutare la perdita economica in funzione degli eventi sismici attesi.

Stimata la perdita economica attesa della struttura è possibile, infine, definire delle strategie di miglio-

ramento finalizzate all'incremento della capacità sismica dell'opera.

Quindi la nuova frontiera in tale ambito è proprio quello di implementare, con l'ausilio del Building Information Modeling, una metodologia che restituisca la perdita economica attesa dell'opera (con riferimento alla componente impiantistica, architettonica e strutturale).

La valutazione della perdita economica dell'edificio è strettamente connessa alla definizione delle curve di fragilità della struttura. Per lo studio del livello di danneggiamento della struttura si conduce, infatti, un'analisi statica non lineare da cui è possibile risalire, ad ogni step della sollecitazione sismica, allo spostamento relativo di piano (IDR). Confrontando tali drift di piano con lo spostamento responsabile del danneggiamento del componente (fornito dalla fragility) si determina la probabilità di superamento dello stato limite considerato. A questo punto si conosce la probabilità di "failure" del generico elemento per lo stato di danno in esame e in corrispondenza di uno specifico step dell'analisi.

Il raggiungimento di uno stato di danno porta alla nascita di costi di riparazione ( $C_r$ ) che si incrementano man mano che si considerano livelli di danneggiamento più severi. La somma di tali costi, per il generico elemento oggetto di studio, restituisce la perdita economica attesa del componente.

Come è possibile notare tale procedura è fortemente legata alla gestione di una grossa mole di parametri ed operazioni, aspetto che determina la possibilità di utilizzare la metodologia BIM per risalire alle perdite economiche attese di un'opera civile in funzione di hazard naturali.

I software che lavorano mediante un approccio BIM sono in grado, mediante una modellazione parametrica, di associare all'oggetto un'informazione o una formula di qualsiasi natura.

Note che siano le curve di fragilità per i componenti in esame e definita la prestazione della struttura (ad esempio ricavando la curva di Pushover mediante un'analisi statica non lineare) è possibile, infatti, per ogni componente, ottenere la probabilità di superamento di uno stato limite di danno considerato. Assegnati quindi i costi che occorre sostenere se lo stato di danno viene attinto e computato il costo nominale del componente è possibile ricavare la perdita economica associata a ciascuno step della Pushover. Da qui è immediata la valutazione della perdita attesa in quanto la probabilità di accadimento del sisma è assegnata come dato di input non essendo funzione della risposta strutturale né delle curve di fragilità.

Il procedimento, pertanto, può essere:

1. Implementato completamente in ambiente BIM;
2. Sviluppato facendo collaborare il software BIM con programmi di calcolo;

Il primo caso è rappresentato da un approccio BIM nel quale nello stesso ambiente software è possibile, in maniera interoperabile, effettuare analisi strutturali. L'ottimo, pertanto, è rappresentato dal condurre l'analisi della struttura in BIM e utilizzare gli output nell'implementazione della procedura della perdita economica attesa.

La procedura prevede che per ogni famiglia o categoria di oggetti, caricare lo spostamento relativo di piano, corrispondente ad ogni step della Pushover, e lo spostamento associato a fissati percentili in cui si discretizza la curva di fragilità. In questo modo è immediato valutare, confrontando i due termini, la probabilità di superamento dello stato limite considerato.

La seconda strada, invece, porta alla valutazione della perdita economica attesa attraverso un'integrazione dei dati BIM con i risultati sviluppati con l'ausilio di programmi di calcolo. Questa procedura prevede di implementare nel modello BIM le curve di fragilità assegnandone i parametri costitutivi (media e deviazione standard). Non si procede, di contro, ad importare le informazioni relative la risposta sismica della struttura. La schedulazione eseguita in questo caso serve ad un utente futuro che potrà importare, nel progetto BIM, famiglie di oggetti di cui è nota la funzione di vulnerabilità.

Qualunque sia il procedimento utilizzato è indubbio che i benefici apportati implementando la procedura in BIM sono rilevanti.

Si pensi ad esempio alla difficoltà nell'eseguire un computo delle quantità e quindi un computo estimativo della struttura reale o dell'edificio danneggiato da un sisma di intensità data. Le approssimazioni che ne derivano utilizzando un approccio tradizionale sono notevoli. In ambiente BIM, invece, assegnati i costi nominali ai componenti è possibile, attraverso una schedulazione, conoscere il valore economico della struttura.

Relativamente alla metodologia sviluppata, per esempio, è necessario valutare, per ogni stato di danneggiamento definito e ad ogni step della curva di Pushover, il costo di ripristino della struttura. Se si assegna ad ogni famiglia di oggetti un parametro condiviso, che restituisce il costo di ripristino del componente inerente lo stato di danno in esame, si può facilmente conoscere il costo complessivo da sostenere per riportare l'edificio nelle condizioni pre-sisma.

## 2.4 Modellazione avanzata 3D e realtà virtuale

Come già discusso nei paragrafi precedenti la modellazione parametrica 3D che caratterizza la metodologia BIM permette di aprire nuovi fronti per la progettazione moderna. L'architettura moderna, infatti, si sta spingendo sempre di più verso forme complesse o non convenzionali. Tale complessità delle forme



determina un aumento delle criticità in tutto il processo edilizio dell'opera da realizzare.

Partendo dalla fase di progettazione, tali forme sono di difficile rappresentazione e spesso i modelli utilizzati per la fase di analisi sono caratterizzati da diverse semplificazioni che determinano una minor accuratezza del modello globale e di conseguenza dell'output delle analisi.

Basti pensare alle approssimazioni condotte per le analisi strutturali di opere con forme complesse la cui schematizzazione FEM punta ad avvicinarsi alla reale rappresentazione dell'organismo strutturale ma non ad avere una perfetta modellazione.

Seppur in diversi contesti il BIM rappresenta la standardizzazione dei processi e quindi anche della modellazione delle forme e degli oggetti che compongono un'opera civile in questo ambito può rappresentare l'elemento di svolta per la risoluzione della criticità precedentemente descritta.

La capacità parametrica della modellazione tridimensionale del BIM, sia per quanto riguarda il modello 3D dell'intera opera, che per quanto riguarda i singoli oggetti che compongono la stessa garantisce la possibilità di poter condurre qualsiasi tipo di modellazione e raggiungere un elevato dettaglio nelle forme 3D.

Essendo tale modellazione parametrica è possibile, quindi, assegnare a qualsiasi forma proprietà di vario genere tra cui proprietà meccaniche, fisiche, termiche etc..

In questo caso il BIM permette, in fase di progettazione, di poter condurre analisi più accurate riducendo il grado di approssimazione e di semplificazione. Con tale approccio non solo è possibile spingere la progettazione verso forme sempre più complesse impensabili con approcci tradizionali ma è possibile supportare anche tutte le fasi di realizzazione delle stesse.

La progettazione moderna, infatti, oltre che dalle forme complesse è caratterizzata anche da realizzazioni sempre più difficili da rendere cantierabili.

Anche in quest'ambito il BIM rappresenta in primo luogo una realtà consolidata, in quanto, esso rende più agevole e dettagliata la produzione degli elaborati di cantiere come tavole 2D, quantificazione dei materiali e disegni di dettaglio ma soprattutto apre a nuove frontiere nell'ambito della realtà virtuale.

A tal proposito, il modello BIM è la rappresentazione digitale e virtuale dell'opera da realizzare ed è composto dall'aggregazione di un insieme di oggetti 3D parametrici.

Tale composizione del modello BIM permette l'utilizzo di strumenti che si adoperano per la realtà virtuale. E' possibile, infatti, assegnare ai diversi oggetti 3D BIM una sequenza temporale corrispondente a quella di montaggio in modo tale da simulare, in maniera dinamica, le fasi di realizzazione del sistema oggetto di osservazione.

Tale aspetto permette di visualizzare, prima della fase di cantiere, sia la sequenza che la congruenza di montaggio di ogni sistema edilizio. Tale procedura potrà essere di supporto ai progettisti per valutare la compatibilità tra tutte le componenti di progetto in modo tale da evitare scelte progettuali irrealizzabili in cantiere.

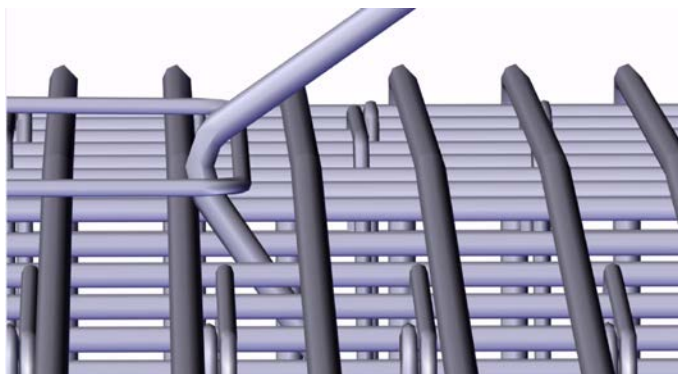


Figure 5. Example of virtual reality for steel reinforcement mounting sequences / Esempio di realtà virtuale per le sequenze di montaggio delle barre di armatura di rinforzo.

Basti pensare alle disposizioni di armatura da rinforzo complesse sia a causa delle forme degli elementi che per le normative sempre più stringenti. Nella figura 5, infatti, si riporta un'immagine catturata dalla visualizzazione dinamica delle sequenze di montaggio delle armature disposte in una piastra di fondazione in c.a..

In tale casistica, infatti, può accadere che il progetto, condotto in maniera tradizionale, prevede una disposizione dei ferri di armatura sulle tavole esecutive 2D di difficile o impossibile realizzazione in cantiere.

La visualizzazione in realtà virtuale delle sequenze di montaggio permette quindi di poter effettuare la "clash detection" tra gli oggetti dello stesso di sistema oggetto di studio, cioè, valutare lo spazio utile necessario affinché avvenga il corretto montaggio del sistema.

Tale aspetto permette di effettuare valutazioni preventive della fattibilità di montaggio dei sistemi complessi non solo per quanto riguarda la compatibilità delle singole componenti che formano il sistema globale ma anche per quanto riguarda la possibilità di poter effettuare le manovre di montaggio da parte delle maestranze. Quest'ultimo caso può essere integrato mediante l'utilizzo di tecnologie già di uso comune per le discipline che appartengono alla realtà virtuale. E' possibile prevedere di integrare il modello BIM con la realtà virtuale e utilizzare strumenti come l'oculus rift e mano virtuale per effettuare le simulazioni di montaggio, effettuare in virtuale le manovre di montaggio e valutare gli scenari collisione tra le varie componenti del sistema e quindi utilizzare la realtà aumentata nel settore delle costruzioni. La realtà aumentata, infatti, è una disciplina che già è molto diffusa nel campo dell'ingegneria

meccanica ed industriale dove il livello di dettaglio e precisione da perseguire è elevato. L'industria delle costruzioni sta andando verso gli stessi criteri di precisione sia per l'aumento del grado di prefabbricazione che del livello di complessità delle opere da realizzare. L'avvento del BIM unito alle tecnologie della realtà aumentata permettono di avere una visione progettuale più ampia, un maggiore potere decisionale ed una riduzione del gap tra previsione ed effettiva realizzazione.

L'approccio così sviluppato porterà ad avere in un prossimo futuro degli elaborati esecutivi dinamici che permetteranno di visualizzare le varie fasi di montaggio direttamente in cantiere per mezzo di tablet o dispositivi elettronici.

### 3 CONCLUSIONI

#### 3.1 Conclusioni

Building Information Modeling is one of the most important and impactful revolutions in the construction sector, so that, in many countries, it is fostered by government strategies to reduce the costs and improve the efficiency of the whole sector. BIM is opening new frontiers of development for each single discipline in the building process. This work, in fact, tries to give a framework for new possible development frontiers and research for the structural engineering sector thanks to the use of the BIM methodology.

We suggest the use of this methodology to deal with different issues that, with traditional approaches, would be hard or even impossible to resolve.

Pressing the structural design to wider frontiers where designers have the ability to control and to supervise a greater number of data and parameters is one of the challenges for the BIM methodology.

BIM can support design optimization, by means of multi-criteria analysis, to handle information at different levels in a integrated approach.

Furthermore, the visualization of the work to be carried out, through complex three-dimensional modeling and tools, such as augmented reality, gives also the opportunity to develop elaborated dynamic sequences for the assembly of complex systems.

Il Building Information Modeling rappresenta una delle più importanti ed impattanti rivoluzioni nel settore delle costruzioni al punto tale di diventare, per molti paesi, strategia governativa di riduzione della spesa pubblica e di efficientamento di tutto il settore. Come tutte le rivoluzioni storiche anche il BIM apre a nuove frontiere di sviluppo per ogni singolo ramo e disciplina del processo edilizio. Il presente lavoro, infatti, cerca di dare un inquadramento delle possibili nuove frontiere di sviluppo e ricerca per il settore dell'ingegneria strutturale grazie all'utilizzo della metodologia BIM.

Si propone l'utilizzo di tale metodologia come soluzione di alcune criticità che con approcci tradizionali risulterebbero di difficile o addirittura di impossibile risoluzione. Di spingere la progettazione strutturale verso frontiere più ampie dove i progettisti hanno la possibilità di controllare e monitorare un maggior numero di dati e parametri. Sviluppare realmente un'ottimizzazione della progettazione utilizzando i principi dell'analisi multicriterio con uno strumento che in maniera integrata riesce a gestire informazioni a diversi livelli. Visualizzare preventivamente l'opera da realizzare grazie a modellazioni tridimensionali complesse e strumenti come la realtà aumentata che danno, inoltre, l'opportunità di poter sviluppare elaborati di cantiere dinamici con la visualizzazione delle sequenze di montaggio di sistemi complessi.

### REFERENCES

- Akcamete A., Akinci B., Garrett J.. 2011. Potential Utilisation of Building Information Models for Planning Maintenance Activities, Nottingham University Press, Nottingham, UK.
- Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. 2012. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, 2<sup>nd</sup> Edition. ISBN: 978-0-470-54137-1
- Eadie R., Browne M., Odeyinka H., McKeown C., McNiff S.. 2013. BIM Implementation throughout the Uk construction project lifecycle: An Analysis. Automation in Construction. Guide, Instructions and Commentary to the 2013 AIA Digital Practice Documents 2013:1-62
- ISO 16739:2013: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries.
- Lewis A., Thittaker J. 2013. The role of BIM and overcoming the complexities of big data.
- Nbims. National Building Information Modeling Standard. Building 2007:183.
- Ning G., London K.. 2010. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. Automation in Construction.
- Salzano A. 2015. Sistema di Progettazione Building Information Modeling come metodologia e strumento di progettazione e gestione di un'opera durante l'intero ciclo di vita. Napoli: Legislazione Tecnica. ISBN 978-88-6219-224-8
- Salzano A., 2015. Metodologie BIM per la progettazione integrata di interventi di riqualificazione e rinforzo strutturale orientati alla sostenibilità ambientale. Tesi di Dottorato XXVII ciclo Ingegneria dei materiali e delle strutture – anno 2015. Università Federico II di Napoli.
- Tam C., Tam VW., Tsui W. Green construction assessment for environmental management in the construction industry of Hong Kong. Int J Proj Manag 2004;22:563-71. doi:10.1016/j.ijproman.2004.03.001