



I-BIM

*. INFRASTRUCTURE – BUILDING INFORMATION MODELING:
STATO DELL'ARTE*

Il Building Information Modeling (BIM) è oggi largamente utilizzato per la gestione dei processi di realizzazione di opere edili. L'impiego del BIM in campo infrastrutturale, talvolta definito I-BIM (Infrastructure – Building Information Modeling), non è altrettanto diffuso. Di seguito è consegnato un quadro conoscitivo degli studi recenti e delle applicazioni I-BIM più significative prodotte in ambito internazionale. I contributi, selezionati per ciascuna delle nove categorie di infrastrutture prese in esame, sono stati classificati con riferimento a sei criteri. Sono inoltre identificati i temi meritevoli di futuri approfondimenti in base alla valutazione dei risultati rinvenuti in 172 casi di studio e 63 pubblicazioni scientifiche. I modelli I-BIM per strade, ferrovie e aeroporti non sono ancora sufficientemente maturi ed i risultati dell'indagine di seguito proposti possono essere utili per favorirne l'evoluzione e la conseguente utilizzazione.

*Gianluca Dell'Acqua
Professore di Strade, Ferrovie e Aeroporti
Università degli Studi di Napoli Federico II*

1. INTRODUZIONE

Il Building Information Modeling (BIM) è un sistema complesso di procedure e tecnologie per la gestione dei processi edilizi [1]. Il BIM, che consente di rappresentare in formato digitale le opere mediante modellazione object-based, non ha prodotto soltanto un cambiamento di natura tecnologica ma ha generato anche un mutamento di processo. Dal 1970 il BIM ha gradualmente trasformato il modo di progettare le opere nel settore AEC (Architecture, Engineering and Construction). L'integrazione degli elaborati grafici mediante schemi e commenti testuali trasforma i disegni in oggetti "intelligenti" che contengono informazioni dettagliate in grado di accelerare l'intero processo di realizzazione dei manufatti. Inizialmente il BIM è stato introdotto a supporto della progettazione e si è poi diffuso interessando progressivamente tutte le attività del settore delle costruzioni [2]. Le infrastrutture sono opere di grandi dimensioni, richiedono investimenti di ingenti capitali e relazioni complesse tra gli stakeholder, è necessario quindi gestire in maniera integrata tutte le analisi e le informazioni inerenti il processo costruttivo. Taluni operatori credono che il BIM possa essere utilizzato soltanto nel settore edile, altri ritengono invece che con il termine "building" ci si riferisca al processo costruttivo, e non ad una specifica tipologia di manufatto. Gli autori dello *SmartMarket Report* [2] pubblicato da MacGraw Hill Construction confermano che il successo del BIM nel settore edile accresce le probabilità del suo impiego anche in ambito infrastrutturale.

L'acronimo I-BIM (Infrastructure - Building Information Modeling) è utilizzato nel settore AEC per qualificare le applicazioni BIM infrastrutturali. Poiché I-BIM è acronimo di conio recente nel settore AEC si utilizzano anche CIM (Civil Integrated Management) [3], "Construction Information Modeling" [4], "Construction Information Management" [5] "Horizontal BIM" e "Heavy BIM" [2]. Nel prosieguo della trattazione si preferirà l'impiego del termine "Infrastructure Building Information Modeling" (I-BIM) per designare l'impiego di tecnologie BIM-based nei progetti infrastrutturali.

Il largo impiego del BIM in edilizia ha suscitato un interesse crescente anche per le applicazioni I-BIM. Alcuni ricercatori hanno analizzato diversi possibili impieghi del BIM in ambito infrastrutturale (*I-BIM uses*). Ad esempio Cho et al. [6] hanno proposto un sistema olistico di libreria BIM per gestire i dati geometrici, le proprietà e le informazioni relative all'efficientamento dei computi nello scavo delle gallerie con il metodo NATM (New Austrian Tunneling Method). Yakubi [7] ha trattato le specificità e i possibili metodi di applicazione del BIM in campo infrastrutturale. Anche le imprese del settore AEC adoperano in tutto il mondo la tecnologia BIM per gestire la progettazione delle infrastrutture. Ad esempio, Breijn [8] si è servito di soluzioni BIM Autodesk per trattare dati GIS rilevati nelle indagini effettuate per la ricostruzione di un ponte ferroviario, il modello ha consentito di simulare le attività sviluppate in fase di progettazione. Per il ponte fu eseguita anche la verifica delle interferenze e la simulazione 4D della programmazione dei lavori [8].

Il BIM ha gradualmente modificato il modo di progettare, costruire e gestire le infrastrutture. Tuttavia, ad oggi non è ancora disponibile in Italia uno stato dell'arte specificamente dedicato alla valutazione delle applicazioni I-BIM. Il contributo che si propone nel seguito intende fornire una visione d'insieme sulle tecnologie BIM per strade, ferrovie, aeroporti e altre grandi opere di ingegneria civile. Lo studio consiste in un esame analitico del livello di attuazione del BIM per le diverse tipologie di infrastrutture, una valutazione delle correnti pratiche e della maturità delle tecnologie I-BIM, nell'identificazione delle esigenze in termini di sviluppo e attuazione dei modelli I-BIM. Lo studio si articola in:

- classificazione delle infrastrutture in tredici tipologie e cinque domini;
- quadro di valutazione delle applicazioni esistenti e del grado di maturità raggiunto dalle tecnologie I-BIM con riferimento a ciascuna categoria di infrastruttura;
- analisi critica dei risultati conseguiti nella precedente fase di valutazione.
- esigenze della ricerca e possibili sviluppi ottenuti in base agli esiti della valutazione;
- conclusioni dello studio.

2. CLASSIFICAZIONE DELLE INFRASTRUTTURE

Non esiste una classificazione universale delle infrastrutture e le associazioni tecniche operanti in diversi paesi propongono per queste opere metodi di classificazione. Facendo riferimento alla classificazione adottata da McGraw-Hill [2], Bentley [9] e Halpin [10], le più importanti tipologie di infrastrutture possono essere classificate in 13 categorie (appartenenti a 5 diversi domini), come mostrato in tabella 1:

- Infrastrutture di trasporto: (1) ponti, (2) strade, (3) ferrovie, (4) gallerie, (5) aeroporti, (6) porti e approdi.
- Infrastrutture energetiche: (7) impianti per la produzione di energia eolica, idroelettrica, centrali nucleari, sottostazioni, reti elettriche, (8) impianti per l'estrazione del petrolio e del gas, (9) miniere di rame, ferro e carbone.
- (10) Infrastrutture di pubblica utilità: distribuzione di gas naturale, elettricità e acqua, fognature, sistemi di depurazione e oleodotti.
- (11) Impianti per lo svago ed il tempo libero, come ad esempio parchi, campi sportivi, ecc.
- Infrastrutture per la gestione delle acque, quali (12) impianti per le acque bianche e reflue (13) dighe, canali e argini.

Il dominio più consistente è quello delle infrastrutture di trasporto ordinate in cinque categorie (I) ponti, (II) strade, (III) ferrovie, (IV) gallerie, (V) aeroporti/porti/approdi. Le altre infrastrutture sono raggruppabili in ulteriori quattro domini: (VI) infrastrutture energetiche, (VII) infrastrutture di pubblica utilità, (VIII) impianti per lo svago, (IX) infrastrutture per la gestione delle acque.

3. QUADRO DI VALUTAZIONE PROPOSTO PER LE TECNOLOGIE I-BIM

A partire dall'esame della letteratura è stato sviluppato un quadro di valutazione delle applicazioni I-BIM per comprendere come le tecnologie I-BIM abbiano modificato l'approccio alla progettazione delle nove categorie di infrastrutture. Nella figura 1 è sintetizzato il quadro di valutazione proposto. Le applicazioni I-BIM possono essere valutati con riferimento ai seguenti criteri: (1) numerosità di casi applicativi e pubblicazioni scientifiche, misura dell'intensità di utilizzazione delle tecnologie I-BIM per ciascuna categoria di infrastruttura con riferimento alla trasformazione dell'intero processo costruttivo; (2) tipo di impiego dei modelli I-BIM; finalità per le quali i modelli I-BIM sono utilizzati (stima dei costi, gestione delle informazioni del ciclo di vita dell'opera, o altro); (3) grado di evoluzione dei modelli I-BIM per ciascun caso applicativo; (4) evoluzione di modelli e disponibilità di linee guida e standard normativi; (5) organizzazione dei dati I-BIM, misura di efficienza per la gestione delle informazioni e degli elaborati di progetto; (6) software e tecnologie, analisi di tools disponibili per lo sviluppo di modelli I-BIM.

3.1 Numerosità dei casi applicativi e delle pubblicazioni scientifiche

3.1.1 Numerosità dei casi applicativi

La maggior parte dei casi di studio censiti sono stati ricavati dagli annual reports di *Autodesk BIM Awards* [11-13] e *Bentley the Year in Infrastructure* [9, 14, 15], in quanto Autodesk e Bentley detengono le più grandi quote di mercato del software BIM [16]. Gli altri casi studio sono stati reperiti consultando la documentazione disponibile in rete utilizzando diverse combinazioni di parole chiave come "BIM", specifiche denominazioni di infrastrutture ("bridge" e "tunnel"), "project" e "case study". Nello studio sono stati censiti i soli casi applicativi I-BIM che soddisfano i tre seguenti requisiti fondamentali: (1) impiego della tecnologia BIM-related, come ad esempio Revit; (2) generazione di modelli 3D con tecnologia BIM; (3) disponibilità di documentazione illustrativa inerente il progetto e le modalità d'uso della tecnologia BIM. In definitiva lo studio consiste nella valutazione di 171 casi applicativi (Tabella 2).

3.1.2 Produzione scientifica

Le pubblicazioni sono state ricavate dalle banche dati Scopus e Google Scholar, utilizzando combinazioni delle parole chiave: (1) “BIM”, “CIM”, “VDC”, “data model”, “IFC”, “4D”, “5D”, “nD” e (2) specifiche denominazioni di infrastrutture (ad esempio “bridges” e “roads”). Complessivamente sono state censite 62 pubblicazioni scientifiche pubblicate prevalentemente su top journals o atti di conferenze nelle aree del Construction IT e dell’ingegneria informatica. In tabella 3 è consegnato un elenco sintetico delle collocazioni editoriali delle pubblicazioni processate nello studio.

3.2 I-BIM uses

Il termine “BIM uses” è stato proposto per la prima volta da Kreider et al. [17] nello studio sui benefici prodotti da 25 BIM uses negli USA. Per “BIM use” si intende “uno dei modi di utilizzare il BIM durante il ciclo di vita di un’opera per il raggiungimento di uno o più obiettivi”. In tal senso il medesimo significato può essere attribuito al termine “I-BIM uses”, che equivale al precedente con la sola sostituzione del termine I-BIM in luogo di BIM. Con riferimento alla totalità delle applicazioni esaminate si propone una sintesi (tabella 4) dei 15 “I-BIM uses” più diffusi. I quindici possibili “I-BIM uses” sono associati alle diverse fasi del ciclo di vita delle infrastrutture: (1) Concezione dell’opera, (2) Progettazione esecutiva e produzione degli elaborati, (3) Costruzione, (4) Esercizio e Manutenzione (O&M).

3.3 Levels of development

Il *LoD*, Level of Development negli USA o Level of Definition in UK, è il livello di progressione analitica dei modelli informativi. Il concetto, originariamente introdotto nelle attività di computer grafica, traduce la misura del livello di dettaglio della visualizzazione di oggetti 3D. La complessità della rappresentazione di questi decresce man mano che gli oggetti si allontanano da un punto di vista, pertanto gli oggetti più prossimi al punto di vista sono modellati mediante riproduzioni di maggior dettaglio [18]. Le rappresentazioni distinte per *LoD* sono generate spesso con lo scopo di ridurre la complessità di calcolo ed incrementare l’efficienza dei rendering per gli aspetti puramente grafici e geometrici. A differenza della definizione proposta in computer grafica, il concetto di *LoD* nel BIM non riflette solo il livello definizione delle informazioni geometriche ma anche di quelle di natura semantica.

Il concetto di *LoD* è stato introdotto nei programmi di attuazione del BIM di alcuni paesi per favorirne il recepimento negli specifici standard nazionali di progettazione [19-21]. Per esempio nel documento *Guide to Using the RIBA Plan of Work 2013* [20], pubblicato dal Royal Institute of British Architects (RIBA), sono definiti cinque *LoDs* per modelli BIM dal livello 100 al 500. Tuttavia i *LoDs* sono stati concepiti specificatamente per le costruzioni edili e non costituiscono riferimento per le infrastrutture. I progetti delle due categorie di opere differiscono in maniera sostanziale. Nel primo caso è necessario curare i dettagli degli ambienti interni del blocco edificio, nel secondo occorre invece rappresentare con maggiore cura le caratteristiche esterne dei manufatti. Ad esempio nel CityGML, riferimento internazionale per la generazione dei “3D city models”, sono proposti *LoDs* distinti per la modellazione di edifici, strade, ponti e gallerie [22]. In base allo standard CityGML gli elementi di un modello stradale, denominati *TransportationComplex*, possono essere rappresentati con riferimento a cinque diversi livelli di dettaglio. Nella figura 2 sono illustrate le rappresentazioni, per ciascun *LoD*, di una piattaforma autostradale. Nel *LoD0* gli oggetti sono modellati mediante entità lineari che definiscono una rete, *LoD1* attraverso una superficie geometrica che ne riflette la forma effettiva; dal *LoD2* al *LoD4* il modello contiene le *TrafficAreas*, destinate al transito di veicoli o pedoni, e le *AuxiliaryTrafficAreas*, ovvero segnaletica orizzontale, aiuole o margini stradali, ecc.

In generale, il dettaglio per ciascun *LoD* dipende dalle funzioni cui il modello è destinato e dall’idoneità dello stesso per specifiche classi di I-BIM uses. Ad esempio la simulazione per la verifica delle interferenze può essere eseguita quasi per ciascun *LoD* e per tutti i sistemi costruttivi. Il controllo delle interferenze tra sistemi strutturali e meccanici richiede modelli ad alta definizione, invece la verifica delle interferenze tra i componenti di un sistema strutturale può essere operata anche per *LoD* di dettaglio inferiore. In base ai casi di studio esaminati è possibile prospettare cinque possibili *LoDs* per i modelli infrastrutturali e i relativi requisiti minimi del I-BIM use per ciascun *LoD*. I cinque *LoDs* sono delineati in figura 3 e gli I-BIM uses, supportati da ciascun *LoD*, sono elencati in tabella 5.

In sintesi i *LoDs* da 100 a 300 riguardano in genere la progettazione architettonica, mentre le progettazioni strutturali e MEP sono *LoD400*. Il modello *LoD500* contiene informazioni “lifecycle” che possono essere utilizzate nella fase O&M. La ricchezza delle informazioni di natura semantica cresce dal *LoD200* al *LoD500*. Le quantità di componenti e materiali per i diversi *LoDs* possono essere ottenute dal *LoD200* al *LoD500*. La programmazione temporale 4D e la stima dei costi 5D possono essere condotte con livelli di accuratezza crescenti da modelli *LoD200* a modelli *LoD500*.

3.4 Evoluzione della produzione scientifica

Il BIM riguarda diversi settori dell'industria delle costruzioni pertanto il tema dell'interoperabilità dei modelli e dei dati generati con software specialistici propri di diverse discipline tecniche è di grande attualità in ambito professionale. Un modello indifferenziato di validità generale per la rappresentazione di informazioni di natura geometrica e semantica è necessario per favorire lo scambio e la condivisione dei dati. Per questo motivo il buildingSMART (ex International Alliance for Interoperability, IAI) ha sviluppato il sistema Industry Foundation Classes (IFC) che garantisce l'interoperabilità del BIM [24]. Il sistema IFC consente di standardizzare la modellazione delle opere edili ed è stato diffusamente utilizzato nell'industria delle costruzioni [25]. Lo standard IFC può essere adoperato anche per sviluppare modelli I-BIM riproducendo gli elementi infrastrutturali mediante componenti di opere edili. Per esempio le pile dei ponti possono essere rappresentate utilizzando *IfcColumn*, per le barriere stradali si può applicare invece *IfcWall*. Tuttavia un simile approccio è causa di numerose complicazioni, una di queste consiste nel fatto che le informazioni di natura semantica e le funzioni degli elementi delle costruzioni edili non corrispondono con quelle proprie delle infrastrutture. Dunque lo schema IFC attualmente in uso, denominato IFC4, non supporta la gestione delle informazioni di natura semantica specifiche per le infrastrutture. C'è la necessità di disporre di un “data schema” per ciascuna tipologia di infrastruttura al fine di rappresentare in modo standardizzato le informazioni component-based di dettaglio.

Di conseguenza, molti studiosi hanno proposto schemi specifici per le infrastrutture [26, 27]. Ad esempio buildingSMART ha impostato molti progetti, come OpenINFRA, dedicati alla creazione di modelli per la progettazione infrastrutturale basati sul sistema IFC. L'estensione di IFC Alignment è stata inserita in IFC4x1, IFC5 attualmente in una versione preliminare è finalizzato ad introdurre le estensioni IFC per strade, ponti, gallerie, etc. A partire dalla visione d'insieme sopra sintetizzata si propone una classificazione dei modelli in tre fasi evolutive per ciascuna tipologia di infrastruttura. I “data schema” e il miglioramento delle rappresentazioni costituiscono infatti ulteriori indicatori utili per la stima del grado di maturità delle applicazioni I-BIM.

- *Fase01 – Conceptual class hierarchy*. Il primo passo della modellazione object-based consiste nello sviluppo di un modello gerarchico per classi teoriche, il modello consente di standardizzare le definizioni degli elementi che compongono le infrastrutture e le relazioni gerarchiche tra questi. La versione attuale di *IFC-Road Data model* è un esempio di modello gerarchico per classi teoriche.
- *Fase02 – Geometric data model*. Gli elementi e le relazioni gerarchiche tra questi non possono configurare un modello. Il modello geometrico dei dati è pertanto necessario per la rappresentazione in coordinate bidimensionali, o tridimensionali, di vari componenti quali localizzazione, forma e dimensioni, privi di ogni proprietà come tipo di materiale, spessori e specifiche di produzione. Un modello dei dati geometrici può essere non parametrico, o parametrico e si fonda sull'impiego di un set di “parametri” per la descrizione degli oggetti.
- *Fase03 – Semantic data model*. Un *Semantic Data Model* contiene una serie di informazioni diverse rispetto a quelle di natura geometrica. Per esempio le entità *IfcMaterial* e *IfcHownerHistory* contengono informazioni di natura semantica nello schema IFC.

L'interoperabilità è la funzione principale per gli utenti del BIM e la condivisione dei dati rappresenta il motivo principale della domanda di interoperabilità (MacGraw Hill Construction [28]). In un altro Report prodotto dal National Institute of Standards and Technology (NIST) [29] sono stati stimati costi dovuti ad un'inadeguata interoperabilità nel settore delle costruzioni USA. Quindi per i ricercatori è molto importante scegliere “data formats” appropriati per sviluppare i modelli. Esiste un'ampia gamma di standards e formati di files disponibili per la condivisione dei dati BIM, tra questi DXF, DWF, DWT, DWG, IMX, CIS/2, LandXML, gbXML, IFC e KML. Nel settore delle costruzioni lo standard IFC è il più utilizzato per il trasferimento dei dati BIM sviluppate in ambienti software differenti. Originariamente lo standard IFC è stato sviluppato nel linguaggio EXPRESS (ISO 10303-11) e nel 2004 fu realizzata una

nuova versione di IFC nel formato XML, denominato ifcXML [30]. I “data schema models” possono essere definiti anche graficamente con EXPRESS-G e UML Diagram.

3.5 Generazione e organizzazione dei dati

Il trasferimento dei dati avviene tipicamente mediante uno scambio file-based per trasmissione diretta dei file o caricamento su web. Al procedere degli stati di avanzamento del progetto le strutture dei file di progetto, nonché la produzione e l’organizzazione degli stessi, divengono sempre più complesse. L’approccio BIM/CIM server-based rappresenta una ulteriore opzione per risolvere tali problemi attraverso un modello basato sulla cooperazione di gruppo. Un server BIM/CIM è un sistema per la gestione dei data-base dei progetti infrastrutturali [31] dotato di funzioni object-based per la gestione di query, aggiornamenti e per vari altri impieghi.

3.6 Software tools

Alcuni software BIM, come ad esempio Autodesk Revit, possono essere adattati per sviluppare anche modelli I-BIM. Nuovi software tools, come Autocad Civil 3D e InfraWorks, sono già dotati di estensioni create ad hoc per applicazioni I-BIM. Tra questi alcuni software, come Autodesk Revit e Civil 3D, consentono di gestire informazioni multiattributo degli elementi, mentre altri come UC-win/Road possono supportare solo la gestione di informazioni di natura geometrica. In tabella 6 sono elencati i maggiori fornitori di software ed i principali tools che possono essere utilizzati per sviluppare modelli I-BIM. Alcuni produttori forniscono piattaforme dotate di APIs (application program interface) e SDKs (software development toolkit) per la personalizzazione utente dei tools (tabella 6). Un’applicazione API consente ad altre piattaforme di interoperare con i componenti software di un prodotto specifico tramite programmazione. Un SDK contiene numerosi esempi di codici pre-scritti e la documentazione di supporto che consente agli utenti di minimizzare il numero di codici esclusivi generati programmando mediante API. Queste funzioni sono particolarmente utili quando gli utenti vogliono condividere le informazioni multi-piattaforma [32].

4. VALUTAZIONE DEI RISULTATI

In questo paragrafo è consegnata la valutazione sintetica dei risultati ad oggi conseguiti nella implementazione di modelli I-BIM con riferimento ai sei parametri di valutazione elencati di seguito:

- (1) numerosità dei casi applicativi e delle pubblicazioni scientifiche;
- (2) I-BIM uses;
- (3) levels of development, LoDs - casi applicativi;
- (4) evoluzione della rappresentazione e della schematizzazione dei dati - produzione scientifica;
- (5) generazione e organizzazione dei dati;
- (6) software tools.

4.1 Numerosità dei casi applicativi e delle pubblicazioni scientifiche

Con riferimento ai 172 casi applicativi processati si evince che l’Asia e le Americhe sono le aree geografiche in cui è stato rilevato il numero più elevato di applicazioni I-BIM rispettivamente 68 e 85. In Europa, Oceania e Africa si rileva invece una minore attitudine all’impiego del BIM in ambito infrastrutturale (tabella 7). L’interesse dell’industria AEC è stato rivolto prevalentemente alle applicazioni BIM per ponti e infrastrutture di trasporto soprattutto stradali. Le tecnologie I-BIM sono frequentemente impiegate anche per gestire i progetti delle infrastrutture energetiche e degli impianti idrici. Tuttavia un piccolo numero di applicazioni I-BIM è stato rilevato anche per le gallerie.

In tabella 7 è consegnato il quadro della produzione scientifica (63 papers) internazionale per ciascuna categoria di infrastruttura. Così come rilevato per le applicazioni industriali anche l’interesse del mondo accademico è stato rivolto prevalentemente alle applicazioni per ponti e gallerie.

4.2 I-BIM uses

Le applicazioni censite riguardano prevalentemente l'esplorazione dei possibili impieghi della tecnologia I-BIM, la ricerca scientifica è stata invece destinata ai modelli dedicati per specifiche tipologie di infrastrutture, come ad esempio IFC-Bridge. In tabella 8 sono sintetizzati gli *I-BIM uses* implementati nelle pratiche applicazioni, in tabella 9 sono consegnati gli *I-BIM uses* analizzati nelle pubblicazioni scientifiche. Nella produzione scientifica si riscontra un numero minore di *I-BIM uses* rispetto a quanto riscontrato nelle pratiche applicazioni (tabelle 8 e 9). I professionisti del settore AEC utilizzano la tecnologia I-BIM per risolvere i problemi riscontrabili nelle attività di progettazione e i ricercatori si dedicano allo sviluppo di modelli teorici che possono avere maggiore impatto sulle future applicazioni I-BIM.

Alcuni modelli riguardano l'impiego di tecnologie I-BIM per un unico scopo ed altri I-BIM uses diversi. Per esempio 11 dei 21 modelli BIM per ponti sono stati sviluppati per scopi di visualizzazione (vedi tabella 8). La funzione fondamentale dei modelli virtuali 3D consiste nel miglioramento della funzione di visualizzazione, e riguarda pertanto tutte le categorie di infrastrutture. Anche la funzione di analisi strutturale è sempre presente essendo tutte le infrastrutture grandi opere strutturalmente molto complesse. Sono invece pochi i casi studio che riguardano la progettazione di ponti [33] e strade [34-37] in cui è stata inserita anche una funzione per la simulazione dei flussi di traffico. La ridotta numerosità di *I-BIM uses* è dovuta al fatto che i professionisti non hanno ancora molta confidenza con le tecnologie I-BIM e pertanto non riescono ad utilizzarle al meglio. Inoltre i tools specifici di alcune discipline specialistiche non sono compatibili con i modelli I-BIM. Inoltre sono stati censiti solo un caso applicativo [36] e una pubblicazione [53] riguardanti l'impiego del BIM per la valutazione di impatto ambientale di opere stradali.

Le informazioni sono il cuore della tecnologia BIM ed è importante che ciascun modello I-BIM integrato e interoperabile contenga tutti i dati rilevati che possono essere utili nel corso dell'intero ciclo di vita dell'opera. Come mostrato nelle tabelle 8 e 9 spesso i modelli supportano le attività progettazione, verifica delle interferenze, quantity takeoff e constructability analysis. Al contrario si rinvengono poche applicazioni I-BIM per la gestione delle informazioni sul ciclo di vita, le simulazioni di fluidodinamica computazionale (CFD), le sunlight analysis, le simulazioni dei flussi di traffico e le analisi ambientali, le simulazione del funzionamento dei mezzi d'opera, e le ispezioni virtuali delle opere, specialmente per infrastrutture energetiche e recreational facilities. Con riferimento agli stadi del processo realizzativo delle opere gli *I-BIM uses* riguardano raramente le fasi 2 (progettazione e produzione degli elaborati) e 4 (O&M, esercizio e manutenzione). I vantaggi derivanti da simulazioni molto dettagliate, analisi particolareggiate, gestione delle informazioni durante il ciclo di vita e ispezioni virtuali delle opere possono essere apprezzati solo a lungo termine perché non apportano evidenti benefici immediati nelle fasi progettazione. Per esempio il committente potrà apprezzare i vantaggi derivanti dalla gestione delle informazioni nel ciclo di vita dell'opera solo ad opere ultimate nella fase di esercizio e manutenzione (O&M), in cui il gestore dell'infrastruttura può utilizzare il modello integrato che contiene tutte le informazioni relative alle fasi di progettazione e costruzione. Al contrario altri *I-BIM uses*, come ad esempio la verifica delle interferenze, sono molto diffusi tra i professionisti del settore, probabilmente ciò è dovuto all'elevato rapporto benefici-costi. Ad esempio la verifica delle interferenze, precedendo le attività di progettazione, consente di abbattere eventuali tempi e costi necessari per le rielaborazioni. Anche le imprese di costruzione raramente prendono in considerazione gli *I-BIM uses* che producono vantaggi nel lungo periodo. Inoltre, come specificato nello "SmartMarket Report"[2], taluni operatori del settore AEC non hanno confidenza con l'impiego di modelli BIM in ambito infrastrutturale; ciò si verifica specialmente nella fase di progettazione definitiva in cui si richiede una buona padronanza della tecnologia I-BIM che impone tempi lunghi per la formazione del personale. Altri ritengono che l'incidenza dei costi per l'acquisizione dei software e per la formazione sia eccessiva, specialmente per i modelli più dettagliati. Pertanto i costi elevati rappresentano un ulteriore problema. Talvolta i professionisti, operando in ambiti disciplinari differenti, generano i modelli utilizzando tools specialistici e ciò rappresenta la principale fonte dei problemi di interoperabilità. Durante la fase O&M è difficile pertanto utilizzare i modelli sviluppati nelle precedenti fasi di progettazione (tabelle 8 e 9) e ciò limita la diffusione degli I-BIM uses *Lim* (Lifecycle information management) e *vfi* (virtual facility inspection).

I risultati riguardanti gli I-BIM uses sono simili a quelli conseguiti in una ricerca promossa dal CIFE (Centre of Integrated Facility Engineering) della Stanford University. Gli studiosi del CIFE hanno proposto una VDC (virtual design & construction) Scorecard per la valutazione del grado di maturità delle innovazioni VDC introdotte in quattro aree denominate pianificazione, attuazione, tecnologie e prestazioni [70]. I cinque livelli d'impiego della VDC Scorecard [71] sono elencati di seguito:

1) Visualization. I modelli sono finalizzati alla rappresentazione (A) delle opere e alla revisione dei progetti (B).

- 2) Documentation. I modelli sono utilizzati per la progettazione esecutiva, come ad esempio per il quantity takeoff (L).
- 3) Model-based analysis. I modelli sono prodotti per analizzare aspetti specifici come ad esempio sunlight analysis (F), analisi dei flussi di traffico (G), stima dei costi (K), etc.
- 4) Integrated analysis. Il concorso tra settori disciplinari necessita di analisi trasversali, come ad esempio per la verifica delle interferenze (I).
- 5) Automation and optimization. Analisi automatizzate di routine o produzione.

4.4 Produzione scientifica

Lo standard dati IFC si fonda su modelli specificamente sviluppati per costruzioni edili e l'impiego di tali schemi per la modellazione dielementi infrastrutturali crea molte complicazioni. Per questo motivo le ricerche sono finalizzate allo sviluppo di modelli ad hoc per la progettazione di infrastrutture (tabella 11).

- *PONTI*

Come mostrato in tabella 11, sono stati censiti 10 paper che riguardano modelli I-BIM per ponti e viadotti. La maggior parte degli studi riguarda la standardizzazione degli elementi strutturali dei ponti e le relazioni gerarchiche tra di esse. Alcuni ricercatori hanno sviluppato anche dei modelli di dati geometrici e semantici per supportare la creazione di modelli più accurati. Per migliorare l'interoperabilità tra i modelli di dati, molti scelgono di utilizzare lo standard IFC come formato dei dati ed EXPRESS-G per rappresentare graficamente i modelli dati sviluppati. I data models per la progettazione dei ponti sono ad oggi i più maturi tra quelli infrastrutturali con l'estensione IFC-Bridge e BrIM model. Il consorzio IAI (Industry Alliance for Interoperability, French Chapter) ha sviluppato nel 2002 un modello dedicato per la progettazione dei ponti denominato IFC-BRIDGE basato sull'integrazione degli standard IFC e OA-EXPRESS. Pressoché nello stesso periodo un altro gruppo di ricerca giapponese coordinato da Yabuki [39, 45, 81, 82] ha sviluppato, per estensione di IFC, un modello I-BIM per la costruzione ponti in cemento armato precompresso denominato YLPC-BRIDGE. Successivamente questi due modelli sono confluiti in un unico prodotto frutto della collaborazione scientifica internazionale tra i due gruppi di ricerca. Nel 2005 è stato pubblicato lo standard *IFC-BRIDGE V2 Data Mode Edition R2* che risultava però carente dal punto di vista della rappresentazione geometrica e del livello di dettaglio del modello teorico. Ad esempio, IFC-BRIDGE V2 non contiene un *IfcPier* del tipo *IfcColumn* per le costruzioni edili e dunque l'evoluzione di IFC-BRIDGE V2 è solo al primo step della fase 01 (conceptual class hierarchy). La versione attuale di IFC-BRIDGE V2 non consente agli utenti di realizzare un modello sufficientemente raffinato ma può essere integrato con informazioni di natura geometrica [27].

Oltre al già menzionato IFC-BRIDGE in questo ambito sono stati proposti anche altri standard Come ad esempio quello sviluppato da Halfawy et al. [83] denominato Bridge Core Model (BCM) e basato sugli standard ISO STEP. Lee et al. [85] hanno proposto un IFC-based bridge application information model utilizzando una serie di proprietà IFC user-defined. Inoltre, Chen et al. [97] hanno sviluppato lo schema OpenBrIM per standardizzare le attività di progettazione, costruzione e gestione di ponti e viadotti. Lo standard OpenBrIm, sviluppato con il Parametric Markup Language (ParamML), supporta anche la modellazione geometrica delle opere ed è stato diffusamente utilizzato.

- *STRADE*

In tabella 11 sono catalogati sei contributi riguardanti applicazioni I-BIM specifiche per le costruzioni stradali, tutti i modelli sono stati sviluppati nel formato LandXML [52, 54]. Il formato LandXML è stato adottato per la prima volta nel 2000 da Autodesk, Bentley e alcuni Enti gestori (US Federal Highway Administration, US Army Corps of Engineers, e Florida Department of Transportation) ed è oggi diffusamente utilizzato.

Aritomi et al. [54] hanno ideato un "road information model" dotato di planimetrie, profili, sezioni trasversali basati sulla modellazione parametrica della geometria. Rebolj et al. [54] hanno sviluppato un modello originale, con il contributo dei Ministeri Sloveni di Scienza e Tecnologia e dei Trasporti. Gli autori hanno proposto di recente una versione aggiornata del modello, denominato PCM. In Korea Lee e Kim [87, 88] hanno sviluppato un prodotto I-BIM nel formato IFC utile per la modellazione geometria e per l'archiviazione delle informazioni di natura semantica (figura 4).

Oltre alle pubblicazioni scientifiche sono stati censiti anche numerosi progetti di ricerca dedicati allo sviluppo di modelli I-BIM per le infrastrutture stradali promossi da diverse organizzazioni. Nel 2001, ad esempio, i ricercatori del

Japan Highway Research Institute hanno pubblicato il Japan Highways Data Model (JHDM), tuttavia il limite del modello consisteva nel formato 2D [98]. Nel 2005 furono avviati il progetto *IFC-Road* [99], presentato nel 2005 nell'ambito del workshop IFC BRIDGE & ROADS, ed il programma europeo Virtual Construction for Roads (V-Con) [100] coordinato dalla Dutch Agency del Ministero delle Infrastrutture e dell'Ambiente dal 2012 al 2016. Uno degli scopi del progetto V-Con consisteva nello sviluppo di una piattaforma per lo scambio dei dati e per l'acquisizione/test dei relativi sistemi software di supporto. Infine in Italia è stato sviluppato un modello I-BIM per la progettazione del casello autostradale di Martellago (Venezia) ricadente nel passante di Mestre [106].

- **GALLERIE**

Come mostrato in tabella 11 sono state censite sette pubblicazioni riguardanti modelli I-BIM per le gallerie; in tutti i contributi si propongono modelli analitici per la gestione dei dati, nella metà di questi ultimi si propongono integrazioni con informazioni di natura geometrica. Tuttavia solo uno di questi è stato sviluppato per la gestione dei dati di natura semantica. I modelli sono stati sviluppati nel linguaggio XML in base allo schema IFC.

Yabuki [59, 90] ha sviluppato un modello per gallerie denominato IFC-ShieldTunnel ottenuto per estensione dello schema IFC. L'autore ha utilizzato i metodi "boundary surface" e "cave object" per modellare lo scavo concludendo che la maggiore flessibilità del primo ne agevola l'impiego. Il modello IFC-ShieldTunnel è stato aggiornato e integrato con nuovi schemi per pali, conci, impermeabilizzazioni, giunti, ecc. Nel 2010 il modello aggiornato è stato validato utilizzando il progetto in Revit Structure di una galleria realizzata nella città di Tokyo. In Germania, Hegemann et al. [91] hanno provato ad estendere lo standard IFC alla meccanizzazione degli scavi e alle costruzioni in sotterraneo. Un set di nuove categorie di elementi IFC-compatibili è stato aggiunto per modellare lo scavo di gallerie mediante tunnel boring machines (TBM), e categorie IFC per la modellazione TBM sono state poi validate mediante un caso di studio reale.

Borrmanna e Jubierre [93] hanno evidenziato le difficoltà riscontrate nell'impiego dei prodotti disponibili sul mercato ed hanno proposto un nuovo metodo per la generazione di modelli multi-scala definendo il contenuto informativo per ciascun LoD (figura 5). La modifica di un oggetto determina pertanto l'aggiornamento automatico di tutti gli oggetti che dipendono da esso nel modello a *LoD* superiore. Borrmanna et al. [92] hanno lavorato anche all'integrazione del modello multi-scala IFC-based e ad un modello CityGML. I modelli I-BIM delle gallerie, come accade per le altre infrastrutture lineari, sono strutturati vincolando le informazioni semantiche e geometriche alla linea d'asse [25]. A tal fine, Amann et al. [94] hanno proposto uno schema basato sullo standard IFC che supporta la condivisione dei dati tra modelli di della linea d'asse e modelli specifici per lo scavo delle gallerie.

4.5 Generazione e organizzazione dei dati

La maggior parte dei contributi censiti non contiene una descrizione dei metodi adottati per la generazione e l'organizzazione dei dati. Gli autori si sono dedicati alle applicazioni dei modelli I-BIM che loro stessi hanno creato, allo sviluppo di software e ai benefici generati dall'impiego della tecnologia I-BIM. Nei casi applicativi processati si rilevano alcune informazioni inerenti l'organizzazione dei dati I-BIM. Per esempio, i progettisti dell'autostrada M25 Greater (London, England) hanno aggregato i modelli I-BIM al sistema di gestione della documentazione di progetto per supportare le operazioni di cantiere [101]. Di contro, alcuni ricercatori hanno integrato i modelli I-BIM con sistemi di gestione delle informazioni web-based. Taniguchi et al. [102], basandosi su servizi per la condivisione di insiemi di dati, hanno utilizzato il modello 3D come piattaforma per acquisire le informazioni nelle fasi di progettazione e costruzione da utilizzare successivamente per la manutenzione ad opere ultimate.

4.6 Software tools

In base al rapporto stilato nel 2011 dalla Leviton Network Solution, società di consulenza operante nel settore AEC, il 73% degli utenti utilizza software Autodesk per creare modelli BIM ed il 24% degli utenti ha utilizzato invece soluzioni Bentley [16]. Dalla tabella 12 si evince che i software BIM di Autodesk e Bentley sono stati utilizzati in tutti i casi di studio censiti. Tuttavia i casi di studio che non soddisfano i requisiti definiti nella sezione 3.1 sono stati esclusi dal censimento. Come descritto in tabella 12 gli utenti Autodesk realizzano modelli I-BIM utilizzando Autodesk Revit e i tools della serie AutoCAD, producono viste più realistiche mediante il software 3ds Max Design, ed eseguono le verifiche delle interferenze e le analisi 5D utilizzando Autodesk Navisworks. In nessuno dei casi censiti sono stati utilizzati

Autodesk Structural Bridge Design e Autodesk AutoCAD Utility Design. Bentley produce molti tools specifici per le diverse categorie di opere civili. Alcuni utenti hanno utilizzato il software Bentley di progettazione stradale per modellare componenti della maggior parte di infrastrutture. Tuttavia alcuni software tools, sviluppati per ferrovie e infrastrutture idrauliche, sono talvolta utilizzati in ambito professionale. Il software BIM MicroStation è stato frequentemente impiegato dagli operatori del settore AEC nella progettazione di quasi tutte le tipologie di infrastrutture. Infine gli utenti Bentley preferiscono Bentley Navigator per effettuare diverse analisi/simulazioni utilizzando il ProjectWise come sistema gestionale (tabella 12).

5. SVILUPPI

Nella tabella 13 sono sintetizzati i risultati dello studio e di seguito si propongono i possibili sviluppi delle ricerche.

(I) Ponti e viadotti

Come mostrato in tabella 13, la modellazione BIM dei ponti è molto diffusa sia in termini di I-BIM uses che di software tools disponibili. Tuttavia in nessuno dei casi censiti sono stati impiegati modelli I-BIM per la gestione delle informazioni nel ciclo di vita e per l'ispezione virtuale dei ponti, temi che invece dovrebbero essere sviluppati con maggiore attenzione in quanto di interesse rilevante nelle pratiche applicazioni. Inoltre la modellazione è stata sviluppata prevalentemente al livello *LoD300* e *LoD400*. Tuttavia negli stadi avanzati della progettazione sono richiesti modelli sempre più dettagliati ed eventualmente anche di livello *LoD500*. Una differenza significativa tra i ponti e le altre categorie di infrastrutture consiste nella pubblicazione di IFC-BRIDGE V2 del 2005, che rappresenta in assoluto il primo standard IFC per la modellazione infrastrutturale. Tuttavia il contenuto informativo di natura geometrica e semantica di IFC-BRIDGE V2 è modesto. Sebbene molti ricercatori abbiano provato ad integrare IFC-BRIDGE con informazioni di natura geometrica e semantica lo standard è oggi ancora ad uno stadio preliminare. Anche lo schema OpenBrIM sembra essere uno strumento promettente per la modellazione BIM di ponti e viadotti.

(II) Strade

Per le strade si riscontra un numero elevato di applicazioni e di I-BIM uses e poche pubblicazioni scientifiche rispetto alla categoria precedente (tabella 13). I modelli I-BIM sono stati utilizzati per il lifecycle information management, la simulazione e le analisi ambientali, l'ispezione virtuale della opere. Come risultato sono stati prodotti modelli dal livello *LoD200* al *LoD500*. Benché per le strade non siano stati ancora pubblicati standard specifici molti ricercatori hanno proposto modelli analitici originali. Oltre alle pubblicazioni scientifiche sono stati censiti diversi programmi di ricerca (JHDM, IFC-Road, V-Con, etc.). I risultati dovrebbero confluire in uno standard unico di validità generale. Dato che il linguaggio LandXML è diffusamente utilizzato per la modellazione BIM delle costruzioni stradali è auspicabile l'integrazione di questo con lo standard IFC per incrementarne l'interoperabilità.

(III) Ferrovie

L'impiego della tecnologia I-BIM in campo ferroviario presenta una maggiore complessità rispetto alle altre categorie di infrastrutture per la eterogeneità dei componenti da modellare: sistemi architettonici e strutturali, MEP di linea (via, ponti e gallerie). Come mostrato in tabella 13 ad oggi non sono stati proposti specifici standard per opere ferroviarie. Tuttavia i componenti ferroviari non possono essere rappresentati utilizzando gli schemi ad oggi disponibili per le altre infrastrutture e da ciò scaturisce la necessità di svilupparne uno ad hoc per le costruzioni ferroviarie. Sono presenti molti I-BIM uses tra i casi applicativi censiti, i modelli sono stati sviluppati a tutti i livelli da *LoD100* a *LoD500*. Le ferrovie interferiscono spesso con le aree urbanizzate ed è pertanto auspicabile un impiego più consistente dei modelli I-BIM per la simulazione degli impatti ambientali. Sono disponibili molti software tools per la progettazione ferroviaria, come ad esempio Bentley Rail Design and Operations utilizzabili per descrivere molteplici aspetti del ciclo di vita dell'asset infrastrutturale attraverso sistemi esperti.

(IV) Gallerie

Le applicazioni I-BIM censite per le gallerie sono due e le pubblicazioni scientifiche undici (tabella 13). Dato che l'interesse dei ricercatori è stato rivolto prevalentemente alla definizione di "data schema" gli I-BIM uses per le gallerie non sono numerosi e riguardano solo le fasi di progettazione e O&M. Alcuni studiosi hanno proposto modelli analitici completati da informazioni di natura geometrica e semantica. Per le gallerie si avverte l'esigenza di schemi I-BIM integrati con i modelli del terreno, delle caratteristiche geologiche, e con i dati sul monitoraggio della sicurezza.

(V) Aeroporti, porti e interporti

Gli I-BIM uses per aeroporti (figura 6), porti ed interporti sono numericamente limitati, i modelli sono stati sviluppati a livello *LoD300* e *LoD400* (tabella 13). È auspicabile una maggiore diffusione della tecnologia I-BIM per la modellazione di questa categoria di infrastrutture.

(VI) Infrastrutture energetiche

La progettazione delle infrastrutture energetiche viene spesso sviluppata mediante l'impiego di diversi software (tabella 13). Le infrastrutture energetiche sono composte prevalentemente da impianti e pertanto i modelli I-BIM sono frequentemente finalizzati al quantity takeoff generabile in automatico a livelli *LoD* elevati. Tuttavia sono ancora pochi gli I-BIM uses per le infrastrutture energetiche e per questo è auspicabile un impiego più diffuso.

(VII) Infrastrutture di pubblica utilità

Il numero di casi applicativi e di pubblicazioni scientifiche che riguardano l'impiego di modelli BIM nell'ambito delle infrastrutture di pubblica utilità è oggi ancora limitato (tabella 13). Pertanto è auspicabile una maggiore impiego di schemi I-BIM per queste opere ed è possibile impiegare specifici tools quali Autodesk AutoCAD Utility Design, Autodesk Navisworks e Bentley Navigator.

(VIII) Impianti per lo svago e il tempo libero

Come mostrato in tabella 13, sono stati censiti solo sette casi applicativi riguardanti modelli I-BIM per gli impianti destinati al tempo libero e allo svago. Pertanto è auspicabile che in futuro si dedichi ad esse maggiore attenzione e inoltre siccome gli impianti per lo svago, come parchi, giardini e stadi sono realizzati solitamente nei pressi di aree residenziali si suggerisce l'impiego di soluzioni I-BIM anche per le analisi simulazioni ambientali.

(IX) Infrastrutture idrauliche

Recentemente molti progetti di infrastrutture idrauliche sono stati gestiti mediante tecnologie I-BIM, di contro è ancora modesto il contributo della ricerca scientifica in tale specifico ambito. La principale differenza tra queste applicazioni e quelle riguardanti le altre categorie di infrastrutture consiste nell'elevato numero di casi studio gestiti con modelli di livello *LoD500* per le analisi di dettaglio e per le simulazioni. I tools per la gestione di questa tipologia di progetti, come Bentley Water e Wastewater Network Analysis e Design Software suites, sono numerosi. Tuttavia i modelli I-BIM sono ancora scarsamente utilizzati nella progettazione delle opere idrauliche.

(X) considerazioni di carattere generale

Oltre agli aspetti specifici già analizzati in precedenza per ciascuna categoria di infrastrutture, si propongo di seguito tre temi di validità generale da approfondire con riferimento agli I-BIM uses. Il primo riguarda l'impiego del BIM per la simulazione delle emissioni di diossido di carbonio o del consumo di energia elettrica, da sviluppare con riferimento a tutte le categorie di infrastrutture e specialmente per quelle energetiche. In secondo luogo è auspicabile una maggiore diffusione dell'impiego del BIM nelle analisi ambientali per le opere prossime alle aree residenziali, in particolare per le

infrastrutture di trasporto, di pubblica utilità e per lo svago. Infine è auspicabile un maggior impiego del BIM nelle fasi di progettazione, costruzione e O&M, si suggerisce infine l'impiego di un unico modello integrato nell'intero ciclo di vita dell'opera.

Si rileva la mancanza di modelli I-BIM per aeroporti, porti e interporti probabilmente perché tali tipologie di infrastrutture sono numericamente meno rilevanti di ponti, strade e gallerie. Inoltre per gli sviluppi futuri delle ricerche sui modelli I-BIM si suggerisce un programma articolato in tre fasi: (1) sviluppo di specifici "Data schema", o specifiche estensioni di un unico "Data schema" condiviso per ciascuna categoria di infrastruttura lineare inclusi ponti, ferrovie, gallerie e strade; (2) sviluppo di un modello integrato per lo schema dati di diverse categorie di infrastrutture lineari. Come suggerito dal BIM Task Group [103] in UK è forte l'esigenza di pervenire ad una sistematizzazione dell'archiviazione dei dati strutturali sia per le costruzioni edili che per le infrastrutture civili. Per questa necessità è stato messo a punto lo standard *COBie for All: Buildings and Civil/Infrastructure* a supporto degli operatori del settore AEC nelle attività di registrazione dei dati sul ciclo di vita delle opere puntuali e a rete [103]; (3) integrazione degli standard dei dati infrastrutturali con quelli per le costruzioni edili del tipo IFC per favorire lo scambio di informazioni ed accrescere l'interoperabilità tra sistemi costruttivi in ambito urbano. Tuttavia è difficile conseguire l'interoperabilità collegando modelli dati diversi, anche per le sole costruzioni edili [104]. Perciò si suggerisce di perseguire solo la libera integrazione tra gli schemi dei dati infrastrutturali e quelli delle costruzioni edili. Inoltre la distribuzione dei dati nella progettazione I-BIM avviene oggi mediante sistemi file-based o web-based. Il trasferimento e le interazioni server-based devono essere utilizzati nella progettazione delle infrastrutture civili per facilitare lo scambio di dati olistici model-based e la collaborazione in team.

6. CONCLUSIONI

Da quando il BIM ha riscosso grande successo nel settore delle costruzioni edili si registra un significativo incremento di interesse per le applicazioni I-BIM (Infrastructure - Building Information Modeling) in ambito infrastrutturale. Nel suo oramai consolidato impianto, il BIM è un dispositivo - metodologico e tecnologico - finalizzato alla gestione dei processi e delle fasi operative di modellazione digitale delle opere. La Direttiva Europea 2014/24/EU raccomanda l'utilizzo del Building Information Modeling (BIM). Si veda in particolare la citazione esplicita nella versione inglese "building information electronic modelling tools" (Articolo 22, paragrafo 4), ovvero "strumenti di simulazione elettronica per le informazioni edilizie" (versione italiana) [107, 108]. Al fine di fornire un quadro di valutazione esaustivo delle applicazioni I-BIM nei paragrafi precedenti è stato proposto uno stato dell'arte che riguarda casi di studio e pubblicazioni scientifiche censite in ambito internazionale sul tema per diverse tipologie di infrastrutture. Le infrastrutture sono state ripartite in nove categorie: ponti/viadotti, strade, ferrovie, gallerie, aeroporti, porti, infrastrutture energetiche, infrastrutture di pubblica utilità, strutture per lo svago ed opere idrauliche. Nello studio sono state analizzate, con riferimento a sei criteri di valutazione, sia la produzione scientifica che le pratiche applicazioni sviluppate dagli operatori dell'industria delle costruzioni. I criteri di valutazione sono: (1) la numerosità dei casi applicativi e delle pubblicazioni scientifiche, (2) gli I-BIM uses, (3) il livello di dettaglio (LoD) dei modelli I-BIM utilizzati nelle pratiche applicazioni, (4) il grado di evoluzione delle rappresentazioni e degli schemi dei dati rinvenuti nelle pubblicazioni scientifiche, (5) la generazione e l'organizzazione dei dati, (6) i software tools e le tecnologie impiegate per sviluppare i modelli. A partire dalla valutazione dei risultati è stato possibile identificare i gap e i possibili sviluppi della ricerca.

Nello studio sono censiti 172 casi applicativi e 63 pubblicazioni scientifiche. Ad oggi la tecnologia I-BIM è molto utilizzata in Asia e nelle Americhe, e meno nelle altre aree geografiche. Tra le pratiche applicazioni si rileva un impiego massiccio dei modelli I-BIM per le infrastrutture energetiche e scarso per le gallerie. I ricercatori si sono dedicati prevalentemente ai modelli I-BIM per i ponti e di rado a quelli per la progettazione di impianti per lo svago. Gli operatori dell'industria delle costruzioni hanno proposto molti I-BIM uses diversi nelle pratiche applicazioni, di contro la produzione scientifica non riguarda solo i possibili I-BIM uses ma anche lo sviluppo di modelli specifici per le diverse tipologie di infrastrutture. Le possibili cause del fenomeno sono brevemente illustrate nel presente contributo. Sono poi consegnate nel testo tre ulteriori proposte di lavoro per promuovere l'impiego del BIM nelle attività di progettazione riguardanti le simulazioni sul consumo energetico, le analisi ambientali e una maggiore integrazione degli I-BIM uses nelle fasi di progettazione esecutiva e O&M. Nella maggior parte dei casi applicativi sono stati sviluppati modelli con livello di definizione *LoD300* e *LoD400* per soddisfare diverse esigenze. I risultati evidenziano le carenze, in termini di studio e

implementazione, per i sistemi server-based di generazione dati nella progettazione I-BIM. Ad eccezione dei casi di ponti, strade e gallerie, lo sviluppo di “data schema” per le infrastrutture civili risulta essere ancora carente. Infine, gli schemi dei dati sulle infrastrutture devono essere integrati con quelli delle costruzioni edili per favorire lo scambio dei dati ed incrementare l’interoperabilità. Infine studio non sono state proposte analisi delle politiche governative per la promozione delle tecnologie I-BIM che dovranno essere oggetto di ulteriori ricerche.

In conclusione, il BIM non è patrimonio esclusivo del settore edile ma può essere utilizzato con successo anche in ambito infrastrutturale. L’esigenza di applicare il BIM alle infrastrutture non è mai stato così importante e urgente come è oggi. Nello studio non sono stati rilevati soltanto i risultati ottenuti dall’applicazione di modelli I-BIM, ma sono stati identificati anche i gap della ricerca e gli orientamenti futuri per la promozione di questa tecnologia.

Tabella 1
 Classificazione delle infrastrutture [1, 2, 9, 10].

Classificazione delle infrastrutture		Domini
I	1. Ponti	Infrastrutture di trasporto
II	2. Strade	
III	3. Ferrovie	
IV	4. Gallerie	
V	5. Aeroporti	
	6. Porti e approdi	
VI	7. Produzione di energia	Infrastrutture energetiche
	8. Petrolio e gas	
	9. Miniere	
VII	10. Utility	Infrastrutture di pubblica utilità
VIII	11. Recreational facilities	Impianti per lo svago
IX	12. Impianti per le acque bianche e reflue	Infrastrutture idrauliche
	13. Dighe, canali e argini	

Fig. 1 Quadro di valutazione I-BIM [1]

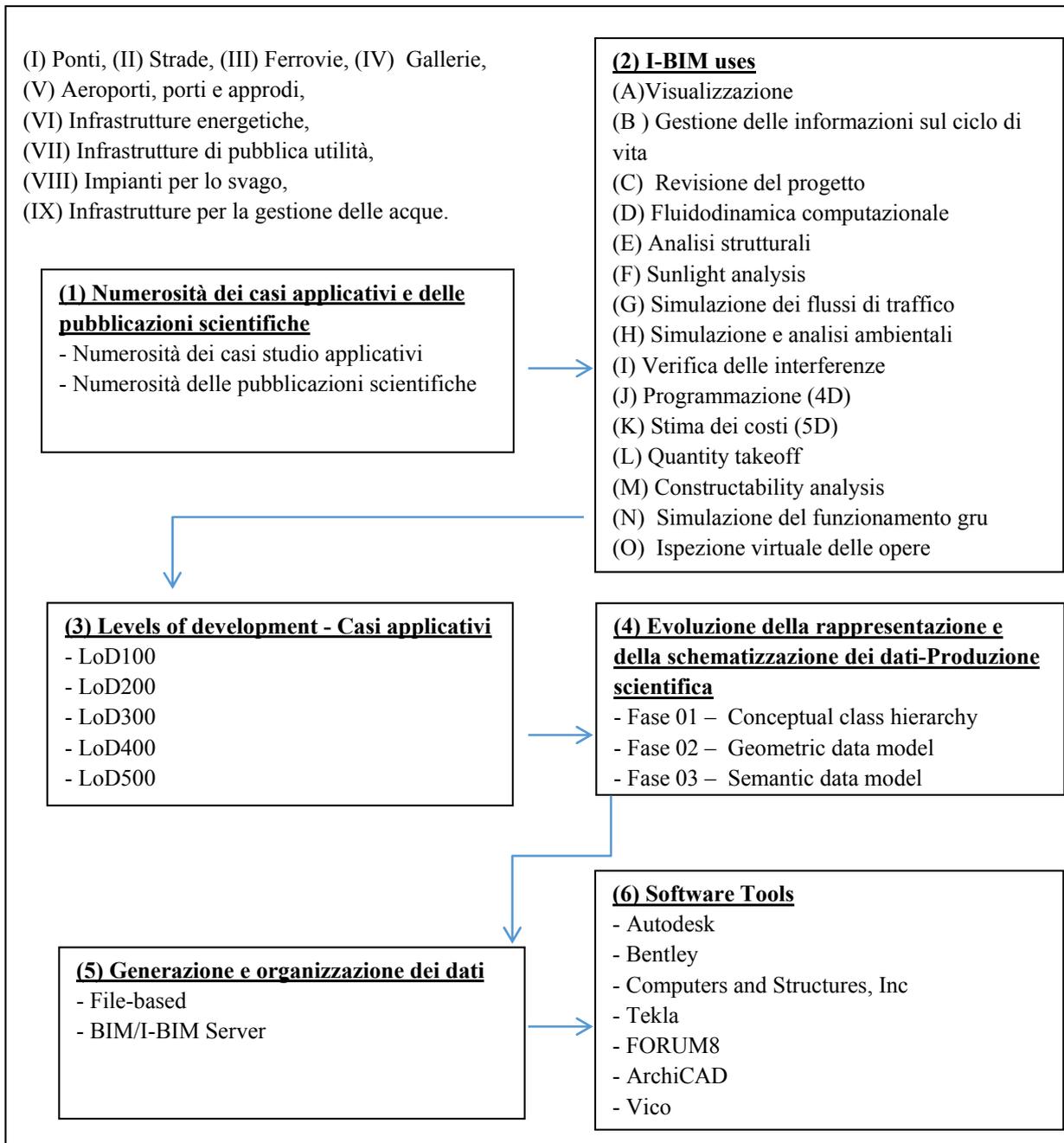


Tabella 2

Panoramica dei casi applicativi selezionati [1]

Fonti	Intervallo temporale	Numerosità
Autodesk BIM awards annual reports	2008/14	43
Bentley the year in infrastructure	2011/14	108
Altri	2009/14	20
Totale		171

Tabella 3

Quadro delle collocazioni editoriali delle pubblicazioni scientifiche selezionate [105]

Collocazione editoriale	Anno	Numerosità
Automation in Construction	2008/14	7
Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE	2010/14	2
Journal of Construction and Management, ASCE	2009/14	1
International Journal of Advanced Robotics Systems	2014	1
<i>Atti di conferenze</i>		
ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering (ASCE IWCCE)	2002/14	5
International Conference Cooperative Design, Visualization and Engineering (CDVE)	2004/12	4
International Conference-Applications of IT in AEC Industry (CIB W78)	2010/14	1
International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR)	2013/14	1
Construction Research Congress (CRC)	2012	3
European Conference on Product and Process Modeling (ECPM)	2008/14	4
International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICCBEL)	2013	7
International Symposium on Automation and Robotics In Construction and Mining (ISARC)	2008/13	4
International Conference on Innovation Technologies in Construction (ITC)	2012	1
Altri	2002/14	21
Totale		62

Tabella 4

Relazione tra I-BIM uses e fasi del ciclo di vita dell'opera [1]

		Ciclo di vita dell'opera			
		Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
No.	I-BIM uses	<i>Concezione dell'opera</i>	<i>Progettazione esecutiva e produzione degli elaborati</i>	<i>Costruzione</i>	<i>O&M</i>
A	Visualizzazione	√	√	√	√
B	Lifecycle information management	√	√	√	√
C	Controllo del progetto	√	√		
D	Fluidodinamica computazionale	√	√		
E	Analisi strutturali		√		
F	Sunlight analysis		√		
G	Simulazione dei flussi di traffico		√		
H	Simulazione e analisi ambientali		√	√	
I	Verifica delle interferenze		√	√	
J	Programmazione (4D)		√	√	
K	Stima dei costi (5D)		√	√	
L	Quantity takeoff		√	√	√
M	Constructability analysis			√	
N	Simulazione dell'operatività dei mezzi d'opera			√	
O	Ispezione virtuale delle opere				√

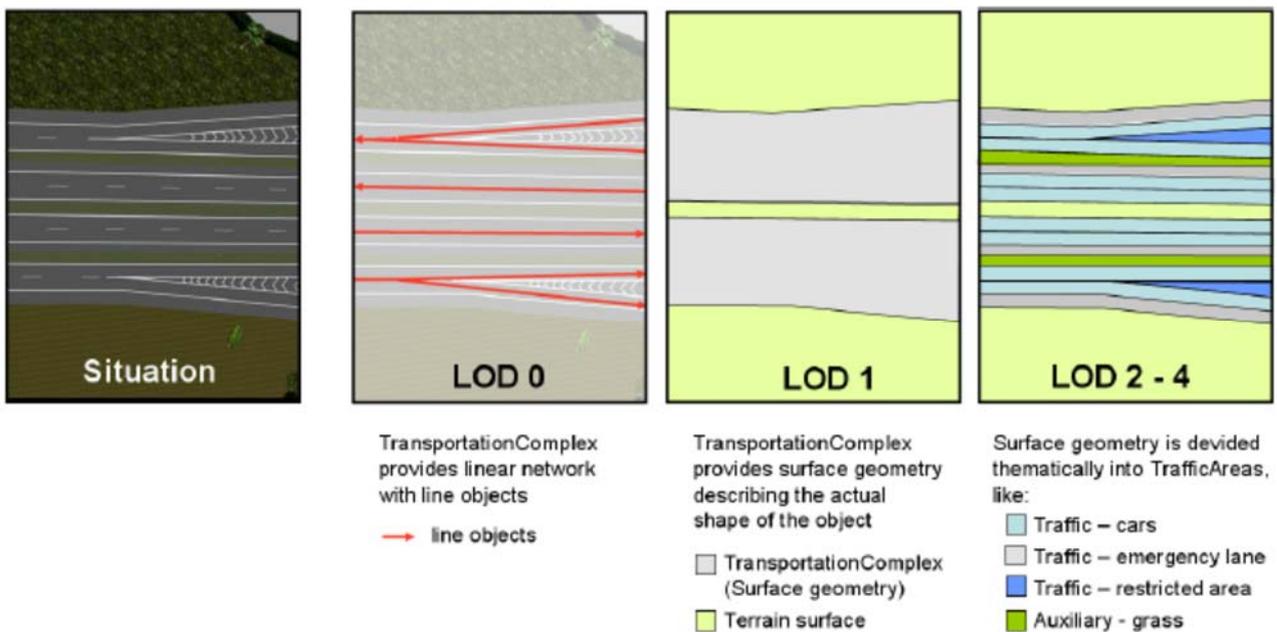


Fig. 2 TransportationComplex in LoD0, LOD1 e LOD2-4 (fonte: Rheinmetall Defence Electronics) [23].

Tabella 5Relazione tra I-BIM uses e *LoDs* [1, 105].

		Levels of development				
N	I-BIM uses	<i>LoD100</i>	<i>LoD200</i>	<i>LoD300</i>	<i>LoD400</i>	<i>LoD500</i>
A	Visualizzazione	√	√	√	√	√
B	Gestione delle informazioni sul ciclo di vita	√	√	√	√	√
C	Revisione del progetto	√	√	√	√	√
D	Fluidodinamica computazionale	√	√	√	√	√
E	Analisi strutturali			√	√	√
F	Sunlight analysis	√	√	√	√	√
G	Simulazione dei flussi di traffico	√	√	√	√	√
H	Simulazione e analisi ambientali		√	√	√	√
I	Verifica delle interferenze		√	√	√	√
J	Programmazione (4D)		√	√	√	√
K	Stima dei costi (5D)		√	√	√	√
L	Quantity takeoff		√	√	√	√
M	Constructability analysis		√	√	√	√
N	Simulazione di funzionamento gru	√	√	√	√	√
O	Ispezione virtuale della struttura					√

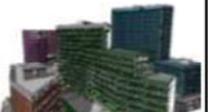
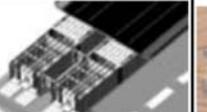
LOD level		LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
		Conceptual Geometry	Approximate Geometry	Precise Geometry	Fabrication	As-built
Use		Planning	Conceptual Design	Detail Design	Construction & Produce	M & M
Model	Building					
	bridge					

Fig.3 Level of Developments [85].

Tabella 6

Principali fornitori di software e tools per I-BIM [1]

Fornitori	Software tools	Infrastrutture di trasporto	Infrastrutture energetiche	Infrastrutture di pubblica utilità	Impianti per lo svago	Infrastrutture per la gestione delle acque	API e SDK disponibili
Autodesk	Revit	√	√	√	√	√	√
	AutoCAD	√	√	√	√	√	
	AutoCAD Map 3D	√	√	√	√	√	
	AutoCAD Civil 3D	√		√			√
	Autodesk InfraWorks (ex infrastructure modeler)	√		√			
	Structural Bridge Design	√					
	AutoCAD Utility Design			√			
	Autodesk 3ds Max Design	√	√	√	√	√	√
Navisworks	√	√	√	√	√	√	
Bentley	RM Bridge, LEAP Bridge, LARS Bridge	√					
	Power Rail Track, Power Rail Overhead Line, MXRAIL	√					
	Power InRoads, Power GEOPAK, MXROAD, and PowerCivil	√					
	PlantWise, OpenPlant, AutoPLANT, and PlantSpace		√				
	HAMMER, WaterCAD, WaterGEMS, SewerCAD, SewerGEMS					√	
	CivilStorm, StormCAD						
	MicroStation	√	√	√	√	√	√
	AECOSim Building Designer	√	√	√	√	√	
	Prosteel	√	√	√	√	√	
	BentleySubstation	√	√	√	√	√	
	Bentley Navigator	√	√	√	√	√	√
ProjectWise	√	√	√	√	√	√	
AutoPIPE and STAAD.Pro	√	√	√	√	√	√	
CSI	SAP2000		√		√	√	
	CSiBridge	√					√
Tekla	Tekla Structures	√	√	√	√	√	√
	Tekla Bimsight	√	√	√	√	√	
Graphisoft	ArchiCAD	√	√	√	√	√	√
Vico	Vico Office Suite	√	√	√	√	√	
FORUM8	UC-win/Road	√					√

Tabella 7

Numerosità di casi applicativi e pubblicazioni scientifiche [105].

Classificazione delle infrastrutture			Casi applicativi				Publicazioni scientifiche	
			Europa	Americhe	Asia	Oceania e Africa	Totale	Totale
I	Ponti		3	8	10		21	27
II	Strade		10	17	7	2	36	9
III	Ferrovie		5	4	8	1	18	4
IV	Gallerie			2			2	12
V	Aeroporti, porti	Aeroporti	1	1	3		5	1
		Porti	1				1	
		Subtotale	2	1	3		6	1
VI	Infrastrutture energetiche	Produzione di energia	2	7	20	3	32	3
		Petrolio e gas	1	1	4		6	2
		Miniere	1	2	1	2	6	
		Subtotale	4	10	25	5	44	5
VII	Infrastrutture di pubblica utilità	Utility		2	2	2	6	3
VIII	Impianti per lo svago	Recreational facilities		3	4		7	
IX	Infrastrutture per la gestione delle acque	Impianti per le acque bianche e reflue	3	14	9	2	28	1
		Dighe, canali e argini		4			4	
		Subtotale	3	18	9	2	32	1
Totale			27	65	68		172	63

Tabella 8a

Risultati delle analisi sugli I-BIM uses - casi applicativi [1].

	Classificazione delle infrastrutture		n.	A	B	C	D	E	F	G
				Visualizzazione	Gestione delle informazioni sul ciclo di vita	Revisione del progetto	Fluido dinamica computazionale (CFD)	Analisi strutturali	Sunlight analysis	Simulazione del flusso di traffico
I	Ponti		21	11		8		10		1
II	Strade		35	27	2	17				4
III	Ferrovie		18	8	1	7		4	1	
IV	Gallerie		2	1		1		2		
V	Aeroporti, porti	Aeroporti	5	3		3	1			
		Porti	1	1						
		Subtotale	6	4		3	1			
VI	Infrastrutture energetiche	Produzione di energia	32	21		21		2		
		Petrolio e gas	6	2		4		4		
		Miniere	6	2		4				
		Subtotale	44	25		29		6		
VII	Infrastrutture di pubblica utilità	Utility	6	1		1		1		
VIII	Impianti per lo svago	Recreational facilities	7	6		4	1		1	
IX	Infrastrutture per la gestione delle acque	Impianti per le acque bianche e reflue	28	11	6	13		4		
		Dighe, canali e argini	4	1	1	3				1
		Subtotale	32	16	7	16		4		1
	Totale		171	93	10	82	1	27	1	6

Tabella 8b

Risultati delle analisi sugli I-BIM uses - casi applicativi [1].

	Classificazione delle infrastrutture		H	I	J	K	L	M	N	O
			Simulazione e analisi ambientali	Verifica delle interferenze	Programmazione (4D)	Stima dei costi (5D)	Quantity takeoff	Constructability analysis	Simulazione di funzionamento gru	Ispezione virtuale delle opere
I	Ponti			7	4		1	7	1	
II	Strade		1	8	8	4	4	14		1
III	Ferrovie			8	4		2	11		2
IV	Gallerie			1						
V	Aeroporti, porti	Aeroporti		1	4	1	4	1		1
		Porti								
		Subtotale		1	4	1	4	1		1
VI	Infrastrutture energetiche	Produzione di energia		4	2		18	10		3
		Petrolio e gas			1			1		
		Miniere		1	1		2	2		
		Subtotale		5	4		20	13		3
VII	Infrastrutture di pubblica utilità	Utility		1			6	3		
VIII	Impianti per lo svago	Recreational facilities		2	2		6	3	1	
IX	Infrastrutture per la gestione delle acque	Impianti per le acque bianche e reflue		3	8		16	7	1	3
		Dighe, canali e argini			1		4	3		1
		Subtotale		3	9		20	10	1	4
	Totale		1	34	33		57	59	2	11

Tabella 9a

Risultati delle analisi sugli I-BIM uses - pubblicazioni scientifiche [105].

	Classificazione delle infrastrutture		Pubblicazioni totali	A	B	C	D	E	F	G
				Visualizzazione	Gestione delle informazioni sul ciclo di vita	Revisione del progetto	CDF	Analisi strutturali	Sunlight analysis	Simulazione del flusso di traffico
I	Ponti		27	[38]	[39,40]	[39-41]		[41]		
II	Strade		7	[52, 106]	[53]					
III	Ferrovie		4	[55]		[55]		[55,56]		
IV	Gallerie		12							
V	Aeroporti, porti	Aeroporti	1							
		Porti	1							
VI	Infrastrutture energetiche	Produzione di energia	3	[61,62]		[61,63]				
		Petrolio e gas	2	[64,65]	[64]					
		Miniere								
VII	Infrastrutture di pubblica utilità	Utility	3	[66,6]		[68]				
VIII	Impianti per lo svago	Recreational facilities								
IX	Infrastrutture per la gestione delle acque	Impianti per le acque bianche e reflue	1			[69]				
		Dighe, canali e argini	1							

Tabella 9b

Risultati delle analisi sugli I-BIM uses - pubblicazioni scientifiche [105].

	Classificazione delle infrastrutture		H	I	J	K	L	M
			Simulazione e analisi ambientali	Verifica delle interferenze	Programmazione (4D)	Stima dei costi (5D)	Quantity takeoff	Constructability analysis
I	Ponti			[39,41-46]	[38,41,43,47,48]	[47]		[43,46,49]
II	Strade		[53]					[54]
III	Ferrovie					[55]		[55,57]
IV	Gallerie				[59]	[59]		
V	Aeroporti, porti	Aeroporti						
		Porti		[61]	[62,63]	[61]		[63]
VI	Infrastrutture energetiche	Produzione di energia			[64,65]			[64,65]
		Petrolio e gas						
		Miniere						
VII	Infrastrutture di pubblica utilità	Utility		[68]				
VIII	Impianti per lo svago	Recreational facilities						
IX	Infrastrutture per la gestione delle acque	Impianti per le acque bianche e reflue						[69]
		Dighe, canali e argini						

Tabella 10

Risultati delle analisi sui LoDs [1].

	Levels of development							
	Classificazione delle infrastrutture	Esempi totali	<i>LoD100</i>	<i>LoD200</i>	<i>LoD300</i>	<i>LoD400</i>	<i>LoD500</i>	
I	Ponti	21			12	9		
II	Strade	35		12	13	9	1	
III	Ferrovie	18	1	1	6	8	2	
IV	Gallerie	2			2			
V	Aeroporti, porti	Aeroporti	5			3	2	
		Porti	1				1	
		Subtotale	6			3	3	
VI	Infrastrutture energetiche	Produzione di energia	32	1		13	18	
		Petrolio e gas	6				6	
		Miniere	6		1	1	4	
		Subtotale	44	1	1	14	28	
VII	Infrastrutture di pubblica utilità	Utility	6				6	
VIII	Impianti per lo svago	Recreational facilities	7		1	1	13	
IX	Infrastrutture per la gestione delle acque	Impianti per le acque bianche e reflue	28		1	11	1	3
		Dighe, canali e argini	4			2	14	1
		Subtotale	32		1	13	14	4
	Totale		171	2	16	64	82	7

Tabella 11

Risultati delle analisi sull'evoluzione dei modelli [105].

	Classificazione delle infrastrutture		Evoluzione dei modelli			
			Numero di papers	Conceptual class hierarchy	Geometric data model	Semantic data model
I	Ponti		10	[25,39,45,81,85]	[27,86]	[83,85]
II	Strade		6	[25,52,54,87,89,106]	[54]	
III	Ferrovie					
IV	Gallerie		7	[25,59,90-95]	[59,92,93]	[59]
V	Aeroporti, porti	Aeroporti				
		Porti	1	[96]	[96]	
VI	Infrastrutture energetiche	Produzione di energia				
		Petrolio e gas				
		Miniere				
VII	Infrastrutture di pubblica utilità	Utility				
VIII	Impianti per lo svago	Recreational facilities				
IX	Infrastrutture per la gestione delle acque	Impianti per le acque bianche e reflue				
		Dighe, canali e argini				
	Totale					

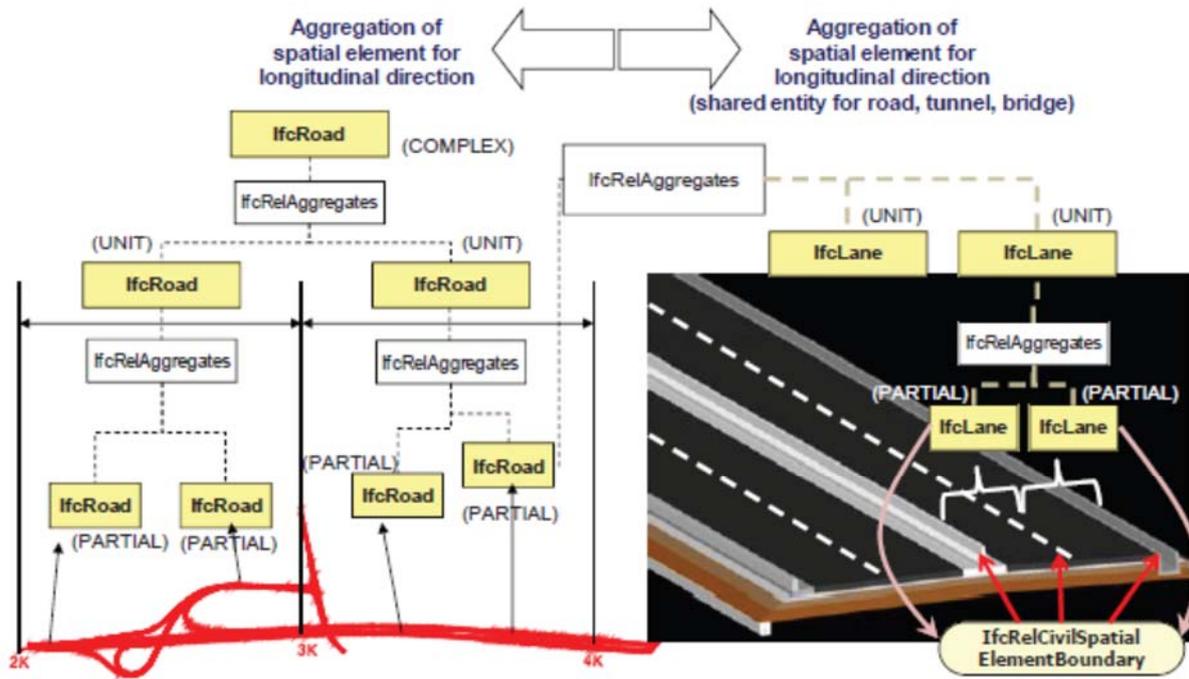


Fig. 4 Esempio di aggregazione degli elementi stradali [87]

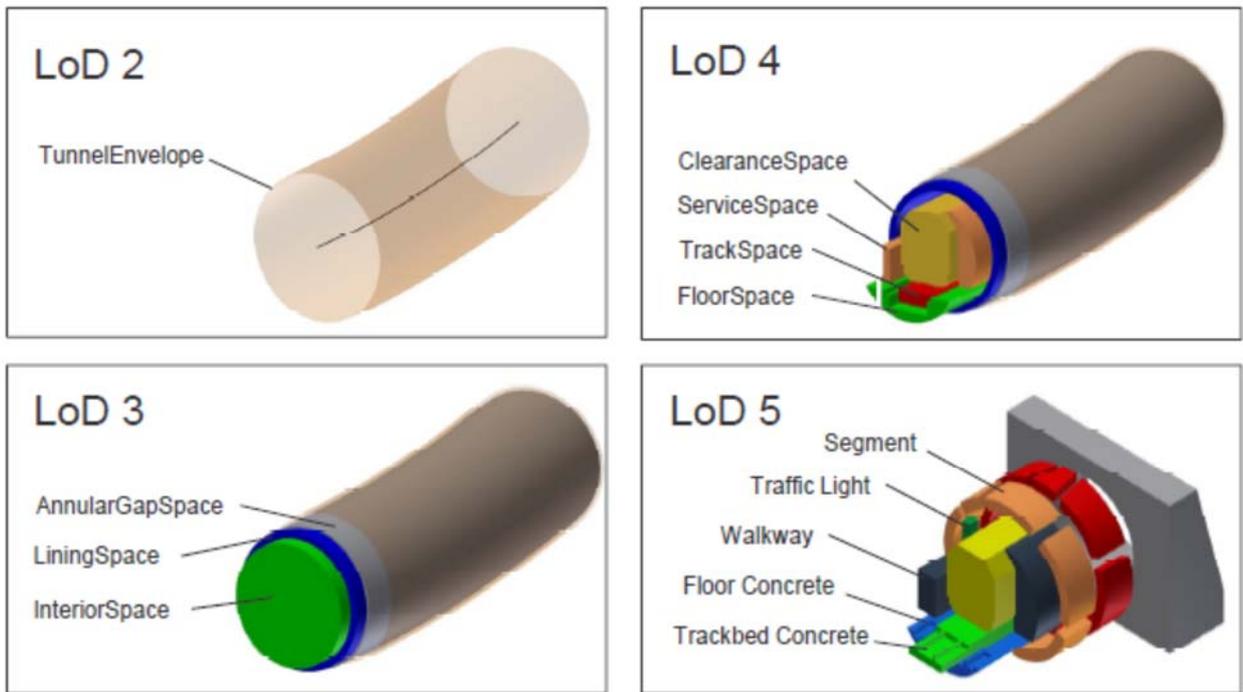


Fig. 5 Esempio di rappresentazione 3D di un modello multi-scala per gallerie [93]

Tabella 12

Risultati delle analisi sugli strumenti di software per I-BIM [1].

Fornitori	Software tools	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Autodesk	Revit	2	3	3		3	1		4	4
	AutoCAD		2	2		1	1		2	6
	AutoCAD Map 3D		3	1					1	2
	AutoCAD Civil 3D	3		2			1	1	2	8
	Autodesk InfraWorks		10							
	Structural Bridge Design		3				1			2
	AutoCAD Utility Design									
	Autodesk 3ds Max Design	2	6	2	1		1			10
	Navisworks	3	6	2		2			2	6
Subtotale	10	33	12	1	6	5	1	11	38	
Bentley	RM Bridge, LEAP Bridge, LARS Bridge	7	2							
	Power Rail Track, Power Rail Overhead Line, MXRAIL	1	1	3		5				
	Power InRoads, Power GEOPAK, MXROAD, and PowerCivil	5	16	8	1	3	4	2		8
	PlantWise, OpenPlant, AutoPLANT, and PlantSpace						23	1		6
	HAMMER, WaterCAD, WaterGEMS, SewerCAD, SewerGEMS, CivilStorm, StormCAD									3
	CivilStorm, StormCAD		1							3
	MicroStation	5	13	8	1	4	22	3		12
	AECOSim Building Designer			4		5	10			7
	Prosteel					1	7			2
	Bentley Substation						4			
	Bentley Navigator		1	3			13			8
	ProjectWise	1	4	5	1	4	8	2		10
	AutoPIPE and STAAD.Pro	6		6			9	2		5
Subtotale	25	38	37	3	20	10	10		61	
CSI	SAP2000									
	CSIBridge									
Tekla	Tekla Structures									
	Tekla Bimsight									
Graphisoft	ArchiCAD									
Vico	Vico Office Suite									
FORUM8	UC-win /Road									

Tabella 13

Sintesi dei risultati [105]

Risultati di valutazione		Numero di casi applicativi e pubblicazioni scientifiche		I-BIM uses					
Classificazione delle infrastrutture		Casi applicativi	Casi applicativi	Casi applicativi	Pubblicazioni scientifiche	LoD-casi applicativi	Evoluzione della rappresentazione	Generazione e organizzazione dei dati	Software tools
I	Ponti e viadotti	21	24		A1,B2,C3				Revit, AutoCAD Civil 3D, Bentley Bridge Design Software and Road Design Software, Microstation, 3ds Max Design, Navisworks, STAAD.Pro, etc
				A11, C8,E10	E1,I6,J5	300 (12)			
				G1,I7,J4,L1	K1,M3	400(9)	01(7),02(2),03(2)		
II	Strade	35	6		A27,B2,C17	200 (12)			AutoCADMap3D,Civil3D,BentleyRoadDesign software, MicroStation, Autodesk InfraWorks, Navisworks,BentleyNavigator,etc.
				G4,H1,I8,J8	A1,B1	300 (13)	01(6), 02(1)		
				K4,L4,M14	H1,M1	400 (8)			
III	Ferrovie	18	4		O1	500 (2)			Microstation, Bentley Road Design software, Bentley Rail Design and Operations software, Bentley Architecture, projectWise,etc.
				A8,B1C7,E4,	A1,C1,E2	200 (1)			
				F1,I8,J4,L2	K1,M2	300 (6)			
IV	Gallerie	2	11		M11,O2	400 (9)			File-based
				A1,C1,E2,I1	J1,K1,O1	300 (2)	01(7), 02(3), 03(1)		
						500(1)			
V	Porti, aeroporti	6	1		A4,C3,D1,I1	100 (1)			No server-based Revit, Bentley Architecture, Microstation, Bentley Road Design software, ProjectWise, etc.
				J4,K1,L4		300 (3)			
				M1,O1		400 (3)	01(1), 02(1)		
VI	Infrastrutture energetiche	44	3		A25,C29,E6	100 (1)			Bentley Plant Design and Engineering software, AECOSim Building Designer, Prosteel,AutoPIPE, STAAD.Pro,etc.
				I5,J4,L20		200 (1)			
				M13,O3		300 (14)			
VII	Infrastrutture di pubblica utilità	6	3			400 (28)			AutoCAD Civil 3D, Microstation,Bentley Road Design software, ProjectWise, etc.
				A1,C1,E1,I1		400(6)			
				L6,M3					
VIII	Impianti per lo svago	7			A6,C4,D1,F1	200(1)			Revit, Navisworks, etc.
				I2,J2,L6,M3		300 (1)			
				N1		400 (5)			
IX	Infrastrutture per la gestione delle acque	32	1		A12,B7,C16	200 (1)			AutoCAD Map 3D, AutoCAD Civil 3D, AutoCAD, Microstation, Water and Wastewater Network Analysis and Design software, Bentley Navigator, ProjectWise, AutoPIPE and STAAD.Pro.
				E14,G1,I3,J9		300 (12)			
				K1,L20,M10		400 (13)			
				N1,O4		500 (6)			



Fig. 6 Aeroporto internazionale di Hong Kong, BIM a cura di Mott MacDonald – Arup Joint Venture - Midfield Development Design Consultancy Services [14].

Fonti bibliografiche

- [1] Jack C.P. Cheng, Qiqi Lu, Yichuan. Deng Analytical review and evaluation of civil information modeling, *Automation in Construction* 67 (2016) 31–47.
- [2] McGraw-Hill, in: E. Fitch (Ed.), *The Business Value of BIM for Infrastructure: Addressing America's Infrastructure Challenges with Collaboration and Technology SmartMarket Re-port*, McGraw-Hill Construction, 2012.
- [3] R. Juliano, B. Cawley, B. Deery, G. Smith, *Civil Integrated Management (CIM)* FHWA, AASHTO, ARTBA, and AGC, U.S. 2012.
- [4] N. Yabuki, *BIM and construction information modeling (CIM) in Japan*, *Proceedings of the International Conference on Computational Design in Engineering*, Jeju, Korea 2012, p. 325.
- [5] Japan Construction Information Technology Center, *CIM construction information modeling/management*, Japan.
- [6] D. Cho, N.S.Cho, H.Cho, K.O.I. Kang, *Parametric modelling based approach for efficient quantity takeoff of NATM-tunnels*, *Gerontechnology* 11(2)(2012)70–75.
- [7] N. Yabuki, *Issues and implementation methods for BIM in the civil infrastructure domain*, *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Urbanization (ICSU)*, Hong Kong, China, 2010.
- [8] B.V. Breijn, *A perfect fit*, Autodesk customer success story, Autodesk, 2011.
- [9] Bentley Systems Incorporated, *The year in infrastructure 2013*, Bentley Institute Press, 2014.
- [10] D. W. Haplin, *Construction management*, third ed. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [11] Autodesk Far East Ltd., *Hong Kong Revit Building Information Modeling (BIM) Experience Award 2008: the power of BIM — vision to reality*, Autodesk, 2008.
- [12] Autodesk Inc., *Autodesk Hong Kong BIM Awards 2009: winning by design*, Autodesk, 2009.
- [13] Autodesk Inc., *Autodesk 2012 Excellence in Infrastructure Awards*, Autodesk, 2012.
- [14] Bentley Systems Incorporated, *The year in infrastructure 2011*, Bentley Institute Press, 2012.
- [15] Bentley Systems Incorporated, *The year in infrastructure 2012*, Bentley Institute Press, 2013.
- [16] B. Hansen, *Building information modeling—building an understanding of the tools revolutionizing our industry*, *Proceedings of the BICSI Winter Conference*, Orlando, USA, 2011.
- [17] R. Kreider, J. Messner, C. Dubler, *Determining the frequency and impact of applying BIM for different purposes on projects*, *Proceedings of the 6th International Conference on Innovation in Architecture, Engineering & Construction (AEC)*, Pennsylvania, USA 2010, pp. 9–11.
- [18] D. Luebke, M. Reddy, J. D. Cohen, A. Varshney, B. Watson, R. Huebner, *Level of detail for 3D graphics*, Morgan Kaufmann, 2003.
- [19] DDC, *BIM guidelines*, New York City Department of Design+Construction, NY, 2012 11101.
- [20] RIBA, *Guide to using the RIBA plan of work 2013*, RIBA Publishing, Britain, 2013.
- [21] BIM Forum, *Level of development specification version 2013*, the Association General Contractors, Arlington, VA, 2013 22201.
- [22] G. Gröger, L. Plümer, *CityGML —interoperable semantic 3D city models*, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 71 (0) (2012) 12–33.
- [23] G. Gröger, T.H. Kolbe, C. Nagel, K.-H. Häfele, *OGC city geography markup language (CityGML) en-coding standard*, open geospatial consortium (OGC), 2012.
- [24] L. Khemlani, *The IFC building model: a look under the hood*, AECbytes, 2004.
- [25] J. Amann, J. Jubierre, A. Borrmann, M. Flurl, *Alignment meta-model for the comparison of alignment product models*, *Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM)*, Vienna, Austria, 2014.
- [26] N. Yabuki, T. Shitani, *Development of a 3 dimensional product model for prestressed concrete hollow slab bridges based on industry foundation classes (IFC)*, *J. Japan Society of Civ. Eng.* 11 (2002) 35–44.

- [27] Y. Ji, J. Beetz, P. Bonsma, N. Bisbet, C. Katz, A. Borrmann, Integration of parametric geometry into IFC-Bridge, Proceedings of the 23th Forum Bauinformatik, Cork, Ireland, 2011.
- [28] McGraw Hill, Interoperability in the construction industry SmartMarket report, McGraw Hill Construction, 2007.
- [29] M. P. Gallaher, A. C. O'Connor, J. John, L. Dettbarn, L. T. Gilday, Analysis of inadequate interoperability in the U. S. capital facilities industry, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, 2004 (20899-1070).
- [30] N. Nisbet, T. Liebich, ifcXML implementation guide, International Alliance for Interoperability, 2005.
- [31] P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston, BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors, Wiley, 2011.
- [32] B. Koo, H. Joo, H. J. An, S.-H. Lee, Application of information delivery manuals for effective exchange of BIM information in modular bridge construction, Proceedings of the First International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICCBEI 2013), Tokyo, Japan, 2013.
- [33] C.W. Schmeits, Case study assessment of 3D and 4D modeling techniques for early constructability review of transportation projects, Graduate School, The University of Texas at Austin, 2011.
- [34] Golder Associates, M1 Managed Motorways, Excellence in Infrastructure Awards, Autodesk, Inc., 2012 16 (2012).
- [35] P. Brinckerhoff, New Haven Harbor Crossing Corridor Improvement Program, Excellence in Infrastructure Awards, 2012, Autodesk, Inc. 2012, p. 30.
- [36] Parsons Brinckerhoff, Doyle Drive/Presidio Parkway, Excellence in Infrastructure Awards, Autodesk, Inc., 2012 31 (2012).
- [37] Washington State Department of Transportation, SR 92-92TH Ave NE Roundabout, The year in infrastructure 2012, Bentley Institute Press, 2013 147.
- [38] C. Kim, H. Kim, T. Park, M. K. Kim, Applicability of 4D CAD in civil engineering construction: case study of a cable-stayed bridge project, *J. Comput. Civ. Eng.* 25 (1) (2010) 98–107.
- [39] N. Yabuki, T. Shitani, An IFC-based product model for RC or PC slab bridges, *CIB Rep.* 284 (2003) 463–470.
- [40] N. Yabuki, J. Kotani, T. Shitani, A cooperative design environment using multi-agents and virtual reality, cooperative design, visualization, and engineering, Springer, 2004 96–103.
- [41] W. Liu, H. Guo, H. Li, Y. Li, Using BIM to improve the design and construction of bridge projects: a case study of a long-span steel-box arch bridge project, *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 11 (125) (2014) 1–11, <http://dx.doi.org/10.5772/58442>.
- [42] N. Yabuki, T. Shitani, A concrete bridge design system using multi-agents, *Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology*, Springer 2005, pp. 695–704.
- [43] C. Kim, H. Kim, T. K. Park, M. K. Kim, C. Kim, Virtual3D modeling for optimized bridge construction process, in: E.K. Zavadskas, A. Kaklauskas, M. J. Skibniewski (Eds.), Proceedings of the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vilnius, Lithuania, 2008.
- [44] N. Yabuki, Z. Li, Cooperative reinforcing bar arrangement and checking by using augmented reality, cooperative design, visualization, and engineering, Springer, 2007 50–57.
- [45] N. Yabuki, Z. Li, Development of new IFC-BRIDGE data model and a concrete bridge design system using multi-agents, vol. 4224 LNCS, Burgos, 2006 1259–1266.
- [46] M. Akula, R.R. Lipman, M. Franaszek, K. S. Saidi, G.S. Cheok, V. R. Kamat, Real-time drill monitoring and control using building information models augmented with 3D imaging data, *Autom. Constr.* 36 (2013) 1–15.
- [47] M. Marzouk, M. Hisham, S. Ismail, M. Youssef, O. Seif, On the use of building information modeling in infrastructure bridges, Proceedings of the 27th International Conference—Applications of IT in the AEC Industry (CIB W78), Cairo, Egypt 2010, pp. 1–10.
- [48] A. Z. Sampaio, O. P. Martins, The application of virtual reality technology in the construction of bridge: the cantilever and incremental launching methods, *Autom. Constr.* 37 (2014) 58–67.
- [49] H. J. An, J.-H. Han, S.-H. Nam, S.-H. Lee, Development of a web-based assembly design and construction simulation system for modular bridges, Proceedings of the first International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICCBEI2013), Tokyo, Japan 2013, pp. 437–440.

- [50] T. Park, M. K. Kim, C. Kim, H. Kim, Interactive 3D CAD for effective derrick crane operation in a cable-stayed bridge construction, *J. Constr. Eng. Manag.* 135 (11) (2009) 1261–1270.
- [51] B.M. McGuire, Using building information modeling to track and assess the structural condition of bridges, Colorado State University, 2014.
- [52] D. Rebolj, A. Tibaut, N. Čuš-Babič, A. Magdič, P. Podbreznik, Development and application of a road product model, *Autom. Constr.* 17(6)(2008)719–728.
- [53] P. Zanen, T. Hartmann, S. AlJibouri, H. Heijmans, Using 4D CAD to visualize the impacts of highway construction on the public, *Autom. Constr.* 32(2013)136–144.
- [54] K. Aritomi, R. Shibasaki, N. Yabuki, The construction management cooperated with clients using a parametric information design method, cooperative design, visualization, and engineering, Springer, 2005 157–165.
- [55] Moon Jae-Woo, C.-S. Shim, K.-M. Lee, Y.-H. Kim, W. Son, Development of railway infrastructure information models based on object-based 3D models, *Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research (WCRR2008)*, Seoul, Korea, 2008.
- [56] Y. Fujisawa, N. Yabuki, Cooperative information sharing between a 3D model and structural analysis software for railway viaducts, vol. 7467 LNCS, Osaka, 2012 203–206.
- [57] L. Ding, Y. Zhou, H. Luo, X. Wu, Using nD technology to develop an integrated construction management system for city rail transit construction, *Autom. Constr.* 21 (2012) 64–73.
- [58] M. Marzouk, A.A. Aty, Maintaining subways infrastructure using BIM, *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*, Construction Institute of ASCE, West Lafayette, Indiana 2012, pp. 2320–2328.
- [59] N. Yabuki, T. Aruga, H. Furuya, Development and application of a product model for shield tunnels, *Proceedings of the 30th International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC '2013)*, Montréal, Canada, 2013.
- [60] C.-I. Yen, J.-H. Chen, P.-F. Huang, The study of BIM-based MRT structural inspection system, *J. Mech. Eng. Autom.* 2 (2) (2012) 96–101.
- [61] J.I. Messner, S. C. Yerrapathruni, A. J. Baratta, D.R. Riley, Cost and schedule reduction of nuclear power plant construction using 4D CAD and immersive display technologies, in: A.D. Songer, J.C. Miles (Eds.), *Proceeding of Computing in Civil Engineering 2002 @ASCE*, 2002.
- [62] L. Yan, S. Zhang, W. Sa, B. Sun, C. Wang, Application of CAD/CAE integrating technology for the three-dimensional design of hydropower industry, *Proceedings of the 2011 10th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science*, Sanya, Hainan Island, China 2011, pp. 315–320.
- [63] V. Whisker, A. Baratta, S. Yerrapathruni, J. Messner, T. Shaw, M. Warren, E. Rotthoff, J. Winters, J. Clelland, F. Johnson, Using immersive virtual environments to develop and visualize construction schedules for advanced nuclear power plants, *Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP)*, Cordoba, Spain 2003, pp. 4–7.
- [64] L. Hou, X. Wang, J. Wang, M. Truijens, An integration framework of advanced technologies for productivity improvement for LNG mega-projects, *J. Inf. Technol. Constr.* 19(2014) 360–382.
- [65] X. Wang, M. Truijens, L. Hou, Y. Wang, Y. Zhou, Integrating augmented reality with building information modeling: on site construction process controlling for liquefied natural gas industry, *Autom. Constr.* 40(2014) 96–105.
- [66] R. Liu, R. Issa, 3D visualization of sub-surface pipelines in connection with the building utilities: Integrating GIS and BIM for facility management, *Computing in Civil Engineering (2012)*, ASCE Publications 2012, pp. 341–348.
- [67] A. L. Balogun, A.-N. Matori, D.U. Lawal, Developing a framework for the 3D visualization of underground petroleum pipelines, *Int. J. Chem. Environ. Eng.* 2 (2) (2011).
- [68] N. Han, Z.F. Yue, Y.F. Lu, Collision detection of building facility pipes and ducts based on BIM technology, *Adv. Mater. Res.* 346 (2012) 312–317.
- [69] J. P. Martins, A. Monteiro, LicA: a BIM based automated code-checking application for water distribution systems, *Autom. Constr.* 29 (2013) 12–23.
- [70] Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), VDC Scorecard —home, <https://vdcscorecard.stanford.edu/content/vdc-scorecard> Stanford University, 2015.
- [71] Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), Technology area – insights. <https://vdcscorecard.stanford.edu/content/technology-area-insights> Stanford University, 2015.

- [72] China Railway Eryuan Engineering Group, Chengdu-Guiyang Railway Passenger Line, Excellence in Infrastructure Awards, Autodesk, Inc., 2012 42 (2012).
- [73] S.C. Engenharia, Bela Vista Wind Farm, Excellence in Infrastructure Awards, Autodesk, Inc., 2012 25(2012).
- [74] K.O. Hara, M. Clarke, URS Stockholm bypass, ICE building information modeling 2012, Institution of Civil Engineers, London, 2012 21–26.
- [75] London Underground (LU), Victoria station upgrade, ICE building information modeling 2012, Institution of Civil Engineers, London, 2012 27–31.
- [76] MTR Corporation, Express rail link West Kowloon Terminus building, ICE building information modeling 2012, Institution of Civil Engineers, London, 2012 18–20.
- [77] McGraw Hill, Use of BIM on dams, canals and levees, in: E. Fitch (Ed.), The Business Value of BIM for Infrastructure, Addressing America's Infrastructure Challenges with Collaboration and Technology SmartMarket Report, McGraw Hill Construction 2012, pp. 29–30.
- [78] McGraw Hill, Use of BIM on water and wastewater facilities, in: E. Fitch (Ed.), The Business Value of BIM for Infrastructure, Addressing America's Infrastructure Challenges with Collaboration and Technology SmartMarket Report, McGraw Hill Construction 2012, p. 37.
- [79] T. M. G. Public Works Department, Sewage treatment plant 3D equipment deployment and management, The Year in Infrastructure 2011, Bentley Institute Press 2012, p.214.
- [80] Gippsland Water, Gippsland Water Factory, The year in infrastructure 2011, Bentley Institute Press, 2012 189.
- [81] E. L. Nobuyoshi Yabuki, Jean Gual, Tomoaki Shitani, Li Zhantao, International collaboration for developing the bridge product model “IFC-Bridge”, Proceedings of Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, Canada 2006, pp. 1927–1936.
- [82] Q. Zhou, N. Yabuki, T. Fukuda, A 4D model for maintenance management of bridges, Proceedings of 2012 Australasian Conference on Innovative Technologies in Construction: "From BIM to Beyond", Wuhan, China 2012, pp. 104–113.
- [83] M. Halfawy, F. Hadipriono, J. Duane, R. Larew, Development of model based systems for integrated design of highway bridges, Proceedings of International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Citeseer, Rome, Italy 2005, pp.1–15.
- [84] B.-G. Kim, S.-H. Lee, Enhancement of spatial and physical elements for IFC-based bridge data model, Proceedings of the 29th ISARC, Eindhoven, The Netherlands 2012, pp. 375–376.
- [85] S.H. Lee, S.I. Park, J. Park, IFC-based bridge application information model using user-defined property sets, Proceedings of the first International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICCBEI 2013), Tokyo, Japan 2013, pp. 441–445.
- [86] Y. Ji, A. Borrmann, M. Obergrießer, Towards the exchange of parametric bridge models using a neutral data format, Proceedings of the ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering, Miami, Florida, USA 2011, pp. 528–535.
- [87] S. H. Lee, B. G. Kim, IFC extension for road structures and digital modeling, Proc. Eng.14 (2011) 1037–1042.
- [88] G.H. Cho, J.K. Song, K. B. Ju, Analysis of road elements for the extension geometry part of IFC model schema, Proceedings of the first International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICCBEI2013), Tokyo, Japan 2013, pp.457–460.
- [89] K. Makanae, Optimization of highway geometric design process for computer-based design, Computing in Civil and Building Engineering, ASCE 2014, pp.1376–1383.
- [90] N. Yabuki, Representation of caves in a shield tunnel product model, Proceedings of the 7th European Conference on Product and Process Modelling, Sophia Antipolis, France 2008, pp.545–550.
- [91] F. Hegemann, K. Lehner, M. König, IFC-based product modeling for tunnel boring machines, eWork and eBusiness in architecture, Engineering and Construction: ECPPM2012 2012, p.289.
- [92] A. Borrmann, T. Kolbe, A. Donaubauer, H. Steurb, J. Jubierrea, Transferring multi-scale approaches from 3D city modeling to IFC-based tunnel modeling, ISPRS Ann. Photogramm. Int. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci. 1 (1) (2013) 75–85.
- [93] A. Borrmann, J. Jubierre, A multi-scale tunnel product model providing coherent geometry and semantics, Comput. Civ. Eng. (2013)291–298, <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413029.037>.

- [94] J. Amann, A. Borrmann, F. Hegemann, J. Jubierre, M. Flurl, C. Koch, M. König, A refined product model for shield tunnels based on a generalized approach for alignment representation, Proceedings of the First International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICBEI2013), Tokyo, Japan2013,pp.449–456.
- [95] H. Min, H. Zhewen, Ontology-driven tunnel construction information retrieval and extraction, Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), Changsha, China 2014, pp. 4741–4746.
- [96] J. Beetz, W. C. van den Braak, R. Botter, S. Zlatanova, R. de Laat, Interoperable data models for infrastructure artefacts — a novel IFC extension method using RDF vocabularies exemplified with quay wall structures for harbors, Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling (ECPM), Vienna, Austria, 2014.
- [97] S.S. Chen, H. Hu, N. Ali, R. Srikonda, Model view definition elements for highway bridge interoperable data protocols, Federal Highway Administration, USA, 2014.
- [98] H. Furuta, Japan highways data model project, <http://www.jacic.or.jp/acit/jhdm.pdf>Kansai University, Japan, 2006 (Last accessed 14 Dec 2015).
- [99] E. Lebègue, IFC BRIDGE & ROADS workshop report: IFC: the beginning of the road, http://salle-immersive.cstb.fr/en/file/rub19_doc34_6.pdf 2005 France. (Last accessed 21 May 2015).
- [100] B. Koehorst, A. Nilsson, O. Wassenaar, Virtual construction for roads-factsheet, https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Factsheet%20V-Con_tcm21-37103.pdf European Commission, Netherlands, 2012 (Last accessed 14 Dec 2015).
- [101] Atkins & Skanska Balfour Beatty Joint Venture, M25 DBFO, Junction 29-30, Section 4C, Excellence in Infrastructure Awards, 2012 Autodesk, Inc., 2012 43.
- [102] H. Taniguchi, N. Aoyama, K. Shigetaka, K. Tsubomura, H. Mori, Integrated information management system using 3D model for maintenance of bridge construction, Proceedings of the First International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICBEI 2013), Tokyo, Japan 2013, pp. 457–460.
- [103] BIM Task Group, COBie for all: buildings and civil/infrastructure facilities v1.3, BIM Task Group, 2013.
- [104] P. Pauwels, Supporting decision-making in the building life-cycle using linked building data, Buildings 4 (3) (2014) 549–579.
- [105] Modelli BIM infrastrutturali: stato dell'arte. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Napoli Federico II. A.A. 2015/16. Candidata: Fiorella Marone. Relatore: Prof. Ing. Gianluca Dell'Acqua.
- [106] R. Redaelli. Il BIM si fa strada. LeStrade 1-2/2016.
- [107] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Standard funzionali per le Smart-Road. Position Paper. Giugno, 2016.
- [108] Nuovo Codice Appalti. GU il 9 aprile 2016 (decreto legislativo 50/2016).