

Carlo Caldera^a, Valentino Manni^b, Luca Saverio Valzano^c,

^a Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italia

^b Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

^c Studio LVA, Torino, Italia

carlo.caldera@polito.it

valentino.manni@polito.it

luca.valzano@gmail.com

Abstract. Il progetto esecutivo deve garantire la sicura interpretazione delle prescrizioni tecniche per la corretta realizzazione dell'opera edilizia. In relazione all'incipiente automazione del cantiere, conseguente allo sviluppo dell'Industria 4.0 fondata su sistemi ciberfisici, muta la grammatica del progetto di dettaglio. Il dibattito descritto si incentra sull'integrazione informativa tra produzioni *on-site* e *off-site* e tra operatori umani, macchine e sensoristica. Lo studio esplora e aggiorna lo stato dell'arte della ricerca sull'automazione dei processi costruttivi. Su tali basi definisce un modello di gestione informativa di processi integrati che abbraccia l'intero processo edilizio (Integrated Design Process, Construction Management e Facility Management) predisposto per la condivisione in cloud.

Parole chiave: Industria 4.0; Produzione *off-site*; Produzione *on-site*; Internet of Things; Modello informativo integrato dei processi.

Approccio sistemico e progettazione integrale

La ricerca nel campo delle costruzioni si confronta con le problematiche complesse della gestione dei processi correlati di progettazione, di costruzione e di gestione dell'ambiente costruito. Essa, dunque, deve essere innanzitutto improntata ad una metodologia operativa basata su di una visione sistemica nella quale si intrecciano la dimensione tecnico-progettuale e imprenditoriale con quella di trasformazione culturale e educativa, in cui l'individuo deve essere considerato come componente di una collettività (organismo) che vive e agisce su uno specifico territorio. Operare secondo una visione sistemica significa saper cogliere le connessioni e le intersezioni tra le parti ed il tutto. L'attitudine ad operare con la complessità è tipica di un metodo di lavoro interdisciplinare e sovradisciplinare che attinge pienamente dalla tradizione della cultura tecnica italiana ed europea.

Gli aspetti metodologici innovativi di questo tipo di ricerca consistono nel perfezionamento di un metodo di progettazione, ba-

sato sulla visione sistemica e sulla interdisciplinarietà e attuato attraverso la gestione della sua complessità, tramite verifica reiterata delle differenti fasi del processo e con l'integrazione dei risultati, verificabili anche attraverso la partecipazione al progetto di tutti gli attori coinvolti.

In ogni sistema complesso sono individuabili caratteristiche strutturali che descrivono gli elementi del sistema, la loro mutua interrelazione e interazione. Sue caratteristiche fondamentali sono di essere un sistema "aperto" in grado di scambiare informazioni, energia, materia con l'ambiente esterno e di possedere una gerarchia di livelli in certa misura indipendenti l'uno dall'altro, interagenti in modo non lineare. Inoltre occorre considerare la "dinamica" del sistema stesso, cioè l'insieme delle leggi che descrivono la sua evoluzione nel tempo. Tali caratteristiche si possono schematizzare nei seguenti tre concetti:

- organizzazione, ovvero gerarchia con ruoli funzionali differenti ma correlati;
- adattabilità, in quanto capacità di collegarsi interagendo con altri sistemi;
- controllabilità delle alternative possibili.

Un sistema "complesso", diversamente da un sistema "complicato" (alla Blachère) e quindi rigido, è molto duttile e dotato di grande "resilienza", in grado quindi di sopportare perturbazioni e shock, adattandosi ed evolvendosi cercando nuovi equilibri. Anche il sistema edilizio è un sistema complesso: la gestione della sua complessità e delle relazioni con l'eco-sistema è un tema di grande attualità. John Bennet (2000) affronta il tema della qualità del processo edilizio e della sua valutazione attraverso casi

The executive project as integrated model in relation to Industry 4.0

Abstract. Executive projects must guarantee that technical specifications are properly interpreted, so that construction work can be adequately implemented. In view of the upcoming automation of building sites arising from the cyber-physical system-based Industry 4.0 framework, the detailed design "grammar rules" are bound to change, too. The reported discussions focus on information integration between on-site and off-site production, as well as among humans, machines and sensors. This study surveys and updates the state of the art in the research of the building process automation. Based on that, it defines an information management model for integrated processes which encompasses the entire construction process (Integrated Design Process, Construction Management and Facility Management) and it is ready to be shared on the cloud.

Keywords: Industry 4.0; Off-site production; On-site production; Internet of Things; Processes Integrated Information Model.

System Approach and Integral Design

The research work in the field of construction deals with project management issues related to the intertwined processes of design, construction and management of the built environment. Such work must, therefore, first and foremost be characterized by an operating methodology based on a system-level framework. In such an approach, the technical, design and entrepreneurial perspectives are integrated with the cultural and educational ones, whereby the individual must be considered part of a community living and operating in a specific territory.

Working on the basis of a system-level vision means knowing how to identify the connections and the intersections between the individual parts and the whole. The ability to deal with complexity is typical of multi- and supra-disciplinary working methods fully exploiting the traditions of Italian and European technical culture.

The innovative methodological aspect of this kind of research work lies in the improvement of a design method on the basis of a system-level vision and on a multi-disciplinary approach. The improved method is, then, implemented by managing its complexity, by repeatedly verifying the various process stages and by integrating their results. These can also be verified by involving all its stakeholders in the project.

In any complex system, one can identify structural features describing the system elements and their mutual in-

di studio esaminati secondo criteri che spostano l'attenzione più sulle relazioni e sulle retroazioni tra le parti della costruzione o tra gli elementi della sua organizzazione, che sulle parti o sugli elementi stessi.

Il modo di progettare che ne deriva dovrà essere pertanto estremamente attento al comportamento in servizio dell'oggetto edilizio per cogliere, sin dalle prime battute, ogni problema legato alle possibilità costruttive e alla vita futura sia dell'individuo-edificio sia di ogni sua singola parte. In altre parole, potrà emergere un modo di progettare attento alla realizzabilità in ogni fase dell'iter e al controllo della qualità nel tempo e quindi alla manutenibilità.

Tutto ciò non è compatibile con la cosiddetta "ingegnerizzazione del progetto", prevista come attività successiva al momento ideativo e compositivo e separata da altri momenti progettuali. L'iter progettuale deve invece essere una attività continua di analisi, di sintesi, di confronto e di rielaborazione, con attenzione alle scelte di tipo compositivo, distributivo, tecnologico e tecnico-costruttivo-organizzativo ed economico e al modo in cui queste possono tra loro interagire. L'atteggiamento che ne deriva è una permanente disponibilità a rielaborare il progetto che, proprio grazie a continue rivisitazioni e miglioramenti successivi e iterativi, giunge, per successive approssimazioni, alle fasi di effettiva approvabilità e ai livelli di qualità programmati (Bardelli, 1994). Il processo di progettazione così inteso è definito come Progettazione Integrale (*Integrated Design Process, IDP*) ed è schematizzabile con l'immagine di una spirale (Fig. 1) che rappresenta successivi passaggi sui diversi aspetti dell'iter; ogni passaggio si integra di nuove informazioni rispetto al passaggio precedente, in una costante apertura critica. Dopo aver indagato tutti gli aspetti

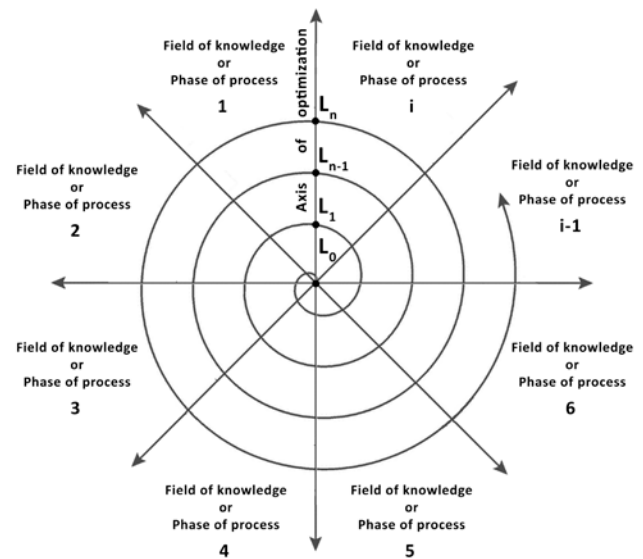
terconnections and interactions. Such a system is basically "open", i.e. able to exchange information, energy and matter with the external environment. It also has a hierarchy whose levels are somewhat independent of each other, though they interact in a non-linear way. One also needs to take into account the system's "dynamics", namely the set of rules describing its evolution over time. Such features can be summarized in the three concepts below:

- organization, i.e. a hierarchy with different but related roles;
- adaptability, defined as the ability to connect and interact with other systems;
- controllability of the possible alternatives.

A "complex" system is different from a "complicated" one (according to Blachère). The latter is rigid, while the former is highly adaptable and "resil-

ient". It can, therefore, withstand disturbances and shocks, as well as adapt and evolve towards a new balance. A building system is a complex system, too. The management of its complexity and connections with the ecosystem is currently a topical issue. Professor John Bennet (2000) dealt with the issues related to both quality and assessment of the building process. Several case studies are reviewed according to criteria which shift the focus on the relationships and feedback among the building parts or the organizational elements and away from the parts and elements themselves.

The ensuing design method shall, therefore, pay particular attention to the building behaviour while in use, in order to identify from the outset any issues related to the construction options and to the future life of the entire building and of each of its parts.



ad un n-esimo grado di approssimazione, il giro successivo della spirale è influenzato dagli input che sono giunti dai livelli di approfondimento precedenti, fino a pervenire al massimo grado di ottimizzazione, ovvero massimo livello di qualità finale richiesto per la specifica fase di progettazione. In sintesi il processo integrale di progettazione si affina con incessanti *feed-back* che indagano sulle conseguenze di ogni tipo di perturbazione. Quando si perviene al più avanzato stato utile della progettazione per uno specifico livello, è possibile reiterare il processo passando alla fase progettuale successiva, dalla fase preliminare del *Concept Design* alla valutazione della fattibilità tecnica ed economica, alla fase del progetto definitivo, alla fase del progetto esecutivo fino al progetto costruttivo. L'iter delle scelte e delle valutazioni può proseguire con la stessa schematizzazione a spirale anche nelle fasi successive del processo: quella della costruzione *on-site* e *off-site* fino all'*as-built* e quelle della manutenzione e della gestione (*Facility Management, FM*). Anche questi ultimi sono processi iterativi e interattivi che per successive approssimazioni possono

In other words, a way of designing may arise in which attention is paid to feasibility at each process step, to quality over time and, therefore, maintainability.

All of this is incompatible with the so-called "engineering of the project" subsequent to the conception and composition stages, and separated from other design phases. The design process must, on the contrary, involve constant analysis, synthesis, discussion and revision activities. It must pay attention to the composition, distribution, technological, technical-construction-organizational and financial choices, as well as to the way they can interact with each other. This gives rise to an attitude of constant willingness to revise the project. Precisely because of the constant revisions and subsequent iterative improvements, the project reaches by subsequent approximations

the stages where it can actually be approved, as well as its planned quality levels (Bardelli, 1994).

Once understood in this way, the design process defined an Integrated Design Process (IDP). It can be summarized as a spiral (Fig. 1) depicting the subsequent iterations of the various process aspects. Each iteration is enriched with new information relative to the previous one, with a constant critical openness. After analysing all aspects at the n-th approximation degree, the subsequent loop of the spiral is influenced by the input coming from the previous levels of detailed analysis. The process finally reaches the highest optimization, i.e. the highest level of the final quality required for the specific design stage. In summary, the Integrated Design Process is refined by the constant feedback produced by the continuous analyses of the conse-

modificare in forma controllata talune scelte. In una fase *i*-esima della manutenzione, per esempio anche dopo anni di vita, devono essere noti e aggiornati lo “stato di salute” e la geometria dell’edificio fino all’intervento in fase *i-1*, ottimizzando il processo fino al grado *n*-esimo. Infine si individua anche una quarta fase del processo: la decostruzione dell’edificio, anch’essa un processo allo stesso modo autoregolato dal sistema stesso.

Il progetto esecutivo quindi è una fase di dettaglio del processo integrale di progettazione; per analogia è anch’esso infatti un processo iterativo oltre che interattivo, che si affina sempre di più fino al grado avanzato del progetto costruttivo, eventualmente riveduto e affinato da test comportamentali su *mockup off-site*. Il processo può essere gestito in *cloud*, con scambio e condivisione delle informazioni tecniche tra gli operatori coinvolti, consentendo di apportare in tempo reale le modifiche al modello informativo e al progetto.

Un esempio è l’ottimizzazione della coordinazione dimensionale di elementi modulari tendente anche alla riduzione degli sfridi di cantiere. Il modello informativo è così continuamente aggiornato affinché la pluralità degli operatori che intervengono nel processo possa riferirsi ad esso. Ciò giustifica la proposta di adozione di una piattaforma informativa condivisa di cui il BIM (*Building Information Modeling*) può esserne parte.

Lottimizzazione del livello informativo nell’Industria 4.0

Una delle attuali criticità della progettazione è riuscire a rendere l’informazione una risorsa utile alle fasi successive del

progetto. Nel modo convenzionale di progettare le informazioni vengono create in una fase di progetto con il solo scopo di

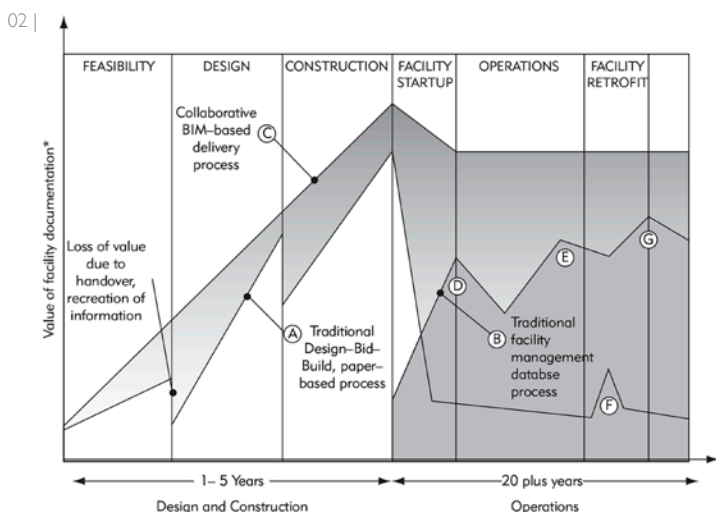
raggiungere gli obiettivi della fase stessa. All’inizio di ogni fase successiva il patrimonio delle informazioni precedenti perde il suo valore e deve essere in parte rielaborato esponendo il progetto al rischio di errori di inserimento e ridondanza dei dati. Il diagramma (Fig. 2) evidenzia il percorso di “conoscenza” nel processo convenzionale e nel processo collaborativo e rappresenta la capacità di apprendimento del processo collaborativo, ovvero l’abilità di utilizzare le informazioni prodotte durante le fasi precedenti (Eastman et al., 2011).

Per quanto concerne il FM ed i processi di monitoraggio delle prestazioni nel tempo, l’attuale possibilità di fare ricorso a sempre più avanzati sistemi di sensori consente a tutti gli operatori di essere informati in *real-time* sullo “stato di salute” di un edificio durante il corso della sua vita. Ottenendo informazioni con approccio preventivo, gli interventi saranno più economici ed efficaci rispetto ad approcci correttivi “a guasto avvenuto” a seguito del palesarsi di un degrado o al verificarsi di un evento accidentale. Inoltre può essere meglio attuata una procedura di manutenzione migliorativa di adeguamento tecnico o normativo per obsolescenza programmata o per decadimento fisiologico delle prestazioni. La sensoristica è entrata con una certa gradualità nel mondo delle costruzioni, in particolare nelle fasi di gestione, in ragione della difficoltà di inserire i dispositivi nell’organismo edilizio, di renderli accessibili e ispezionabili, di connetterli tra loro e di elaborare le informazioni raccolte. Oggi sta crescendo esponenzialmente la velocità di evoluzione dei sensori, alcuni di essi miniaturizzati in modo tale da poter essere numerosi ed inseribili nell’organismo; ad esempio, in un getto di conglomerato al fine di fornirne valori tensionali. Anche la raccolta delle informazioni ed il dialogo tra i sensori avviene *wireless* e l’elabo-

quences of all sorts of perturbations. Once the most advanced useful design stage is reached for a specific level, the process can be iterated by moving on to the next stage. This holds true from the preliminary Concept Design to the technical and financial feasibility phase, as well as to the stage of the final, executive and implementation projects. The process of identifying and assessing the available options can go on according to the same spiral pattern also in the on-site and off-site building processes, until the as-built phase is reached. It can also be adopted for the management and maintenance processes (Facility Management, FM). These are also iterative and interacting processes. By subsequent approximations, they can change some choices in a controlled way. In the *i*-th maintenance phase, even years after the building was completed, one must know the

building geometry and “health status” up to any work carried out in phase *i-1*, thereby optimizing the process up to the *n*-th degree. A fourth stage of the process is finally identified, namely the dismantling of the building. This, too, is a process regulated by the system itself.

The executive project is, therefore, a detailed design stage of the overall design process. It is an iterative, as well as an interactive process which gradually becomes more refined up to the advanced stage of the construction project, as reviewed and refined by possible behaviour tests on off-site mock-ups. The process can be managed on cloud, with technical information exchanges and sharing among the involved parties, thereby allowing the real-time implementation of changes to the information model and to the project.



razione delle stesse è attraverso processi basati su *Big Data*. L'uso della sensoristica è pertanto un tema molto attuale e sostiene un innovativo campo di sviluppo nel mondo della costruzione degli edifici e della loro esecuzione (*Internet of Things*, IoT). I sistemi di sensori presentano una grande analogia con i sistemi neurali autopoietici (*Neural Network*, NN) basati anch'essi sull'interconnessione delle informazioni.

Il *cloud*, la sensoristica IoT e i *Big Data Analytics* sono alcune delle tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 la cui chiave di volta sono i sistemi ciberfisici (*cyber-physical system*, CPS) ovvero sistemi fisici strettamente connessi con sistemi informatici, in grado di interagire e collaborare in modo continuo con altri sistemi CPS e con l'ambiente in cui operano. Tali sistemi sono composti da elementi dotati di capacità computazionale, di comunicazione e di controllo.

Nelle fasi progettuali di dettaglio occorre tenere in considerazione che per sfruttare a pieno le tecnologie offerte dal paradigma dell'Industria 4.0, è opportuno concentrarsi non solo sulla progettazione del prodotto, ma anche sulla progettazione della tecnologia da integrare in esso, che abilita la collezione e la raccolta di dati dal campo.

Progetto e gestione della complessità

La fabbricazione digitale, sfruttando anch'essa l'IoT nei processi produttivi, offre la possibilità di realizzare componenti di edifici digitalmente descritti in scala reale utilizzando tecnologie automatizzate come il *Computer Numerical Control* (CNC), il *Computer Aided Manufacturing* (CAM), ecc. Ciò altera i termini di produzione nell'edilizia sia per quanto concerne il progetto (produzione di dati) sia per

A good example is the optimization of dimensional co-ordination among modular elements, which is also aimed at reducing construction site waste. The information model is, therefore, constantly updated, so that the various parties involved in the process can make reference to it. This justifies the proposed adoption of a shared information platform which includes the Building Information Modeling (BIM).

Optimizing the information level in Industry 4.0

One of the critical design issues is currently the ability to turn information into a useful asset for the subsequent stages of a project. In the conventional design process, information is created at a given project in order to achieve the goals of that stage alone. At the outset of each subsequent stage the ac-

rued information assets lose their value and need to be partially reworked, thereby exposing the project to input error and data redundancy risks. The diagram below (Fig. 2) highlights the "knowledge flow" in the conventional process and in the co-operative one. It describes the learning capacity of the latter, that is the ability to use the information generated over the previous project stages (Eastman *et al.*, 2011). As concerns FM and performance monitoring processes over time, the possibility to use more and more advanced sensor systems currently allows all parties to stay abreast in real-time with a building's "health status" over its entire lifetime. The availability of information within a preventive approach reduces the cost and improves the effectiveness of any work as compared with a "post-facto" corrective approach, whereby action is taken after

quanto concerne la fabbricazione (trasformazione del materiale). Attraverso la fabbricazione digitale è possibile associare direttamente realtà virtuale e fisica. Informazioni, dati e procedure possono essere collegati all'architettura costruita e viceversa. Mai prima d'ora i dati tecnici di progettazione sono stati collegati direttamente alla produzione fisica nei processi costruttivi.

Un attuale dibattito si sta sviluppando in merito all'efficacia della trasmissione dei dati di progetto in relazione all'incipiente automazione dei processi edilizi e alla IoT, in linea con lo sviluppo dell'Industria 4.0. Si consideri, infatti, che i processi di progettazione sono in costante evoluzione; si pensi alle innovazioni susseguitesesi nel tempo: digitalizzazione del progetto, digitalizzazione dei processi, digitalizzazione della conoscenza e digitalizzazione della comunicazione (Cattaneo *et al.*, 2017).

In questo scenario, la trasmissione e la gestione dei dati diventano fondamentali. Questi ultimi devono essere accessibili, nel modo più semplice ed immediato, ad operatori, macchinari e componenti IoT. Si manifesta quindi la necessità di redigere il progetto secondo una nuova "grammatica" al fine di gestire la complessità del processo edilizio. Tale complessità è deducibile, ad esempio, nella schematizzazione (Fig. 3) del tipico flusso di informazioni e prodotti per la produzione di componenti ETO (*Engineered To Order*), caso particolare del processo edilizio (Eastman *et al.*, 2011).

Una soluzione volta alla gestione della complessità intrinseca di un processo costruttivo innovativo quale il *Contour Crafting* (CC), declinazione dell'*Addictive Manufacturing*, tecnologia abilitante dell'Industria 4.0, è stata proposta da Behrokh Khoshnevis (2004) dell'University of South California. Il suo modello (Fig. 4) scompone il processo in *subroutines*, caratterizzate da

deterioration or accidental events have taken place. A proactive approach also allows a better implementation of enhancement maintenance procedures for technical or legal upgrades following planned obsolescence or natural performance decline. Sensors have only spread gradually in the building industry, particularly in the management stages. This is due to the difficulty of placing the devices in buildings, of making them accessible and inspectable, of interconnecting them and of processing the gathered information. Sensors are currently evolving at an exponential rate. Some of them are miniaturized, and can, therefore, be introduced in large numbers in buildings, e.g. in concrete mix castings, to provide tensile stress information. The sensors send their information and connect to each other wirelessly; the gathered information process-

ing is based on a Big Data approach. The use of sensors is, therefore, a hot topic nowadays; it supports an innovative development area in the building design and construction industry (Internet of Things, IoT). Sensor systems display considerable similarities to auto-poietic neural systems (Neural Network, NN), which are also based on information interconnections. Cloud, IoT sensors and Big Data Analytics are some of the enabling technologies of Industry 4.0, whose cornerstone are the so-called cyber-physical systems (CPS). These are tightly interconnected physical and information systems which can constantly interact and co-operate with other CPSs and with their environment. Such systems consist of elements with computational, communication and control capabilities. In order to fully exploit the technolo-

mutua interconnessione e ricorsività, a partire dal progetto di dettaglio fino alla realizzazione del manufatto. Il merito dello studio consiste nell'aver descritto un'architettura informativa tra operatori *on-site* basata sull'*Information Technology* (IT). Tuttavia il sistema potrebbe essere adattato anche a processi *off-site*. Nel modello è possibile ravvisare il limite della non inclusione di ulteriori processi quali il FM, o la decostruzione, essendo l'ipotesi confinata alla sola fase costruttiva. Pertanto il sistema di processi è suscettibile di ulteriori implementazioni.

Trasmissione dell'informazione e processo costruttivo nell'Industria 4.0

Quanto finora descritto sostiene la tesi che il cantiere sia il luogo in cui non si decidono solo le modalità esecutive ma si affina anche quelle progettuali costruttive.

Il cantiere, quale luogo produttivo, si estende all'intera catena di fornitura, sviluppandosi spazialmente e logisticamente al di fuori del sito di costruzione e ha natura sistemica. La digitalizzazione dell'Industria 4.0 promette di connetterne i vari luoghi. Il cantiere interconnesso non può che interpretarsi quale sistema di sistemi.

Tutto ciò che accade nel cantiere, è fortemente condizionato da quello che accade al di fuori di esso. L'ipotesi è quella di allargare la concezione del modello integrato all'intera catena di fornitura, «mettendo a sistema *Expediting, Delivering e Construction*: ciò significa dispiegare, entro una medesima piattaforma, BIM, GIS, *Fleet Management*» (Ciribini, 2016), instaurando una relazione sistemica tra il componente dotato di sensori e il cantiere di destinazione. Ciò si attua facendo ricorso alle tecnologie dell'Industria 4.0 le quali, se estese al campo di applicazione del processo

gies provided by the Industry 4.0 paradigm, the detailed design phases need not only to focus on product design, but also on developing the technology to be embedded into it to allow gathering and readying field data.

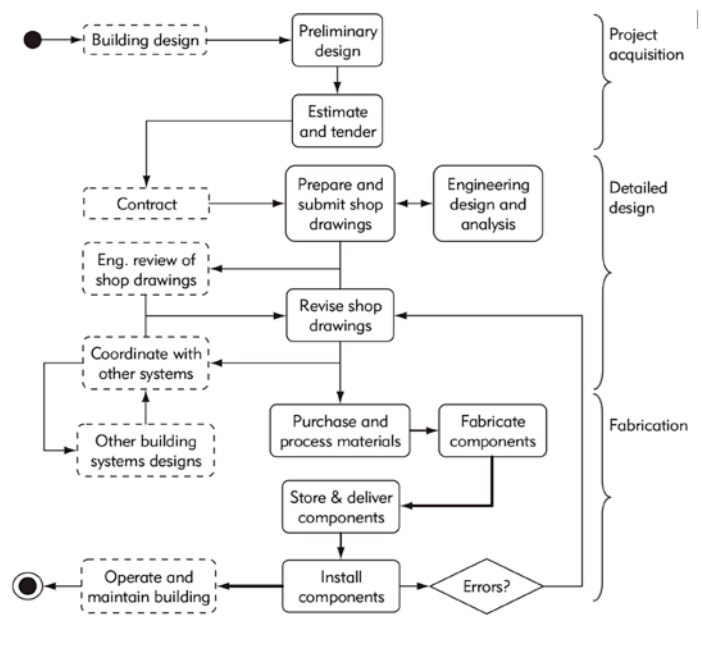
Design and complexity management

Within the production processes, IoT is exploited by digital production, too. This allows producing building elements which are digitally described on an actual scale by means of automated technologies such as Computer Numerical Control (CNC), Computer Aided Manufacturing (CAM), etc. In the construction industry, this is a game-changer both at the design stage (data production) and at the manufacturing stage (processing of materials). Digital manufacturing allows virtual reality and physical reality to be directly tied to each other. Information,

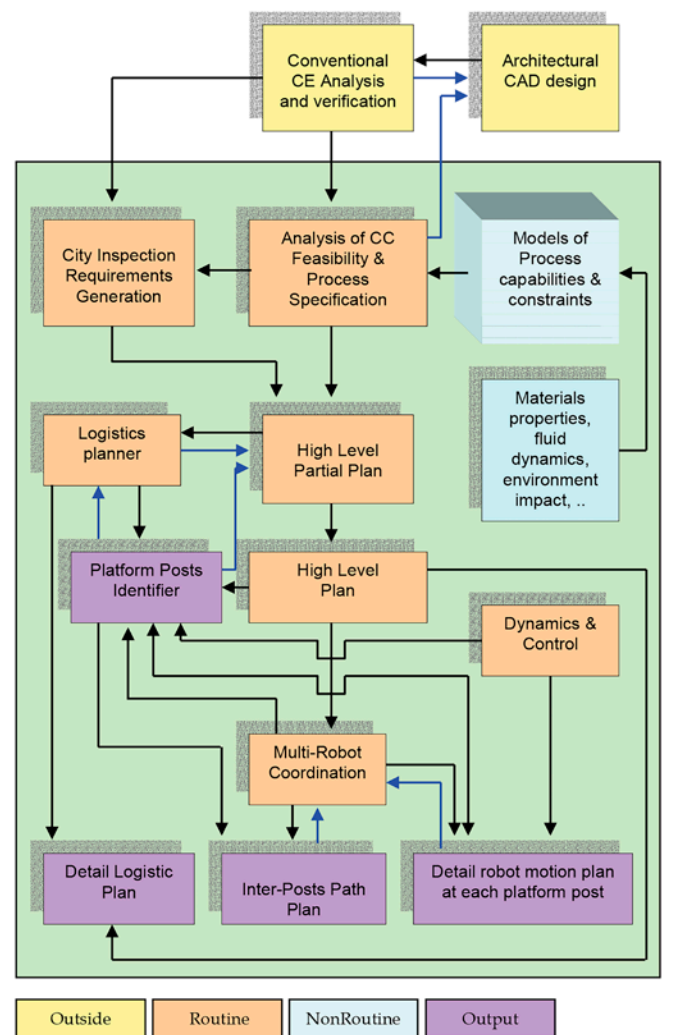
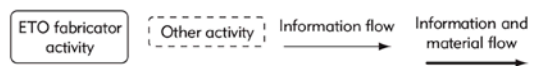
data and procedures can be associated with as-built architectures, and vice versa. Never before could designers be directly tied up to physical manufacturing in construction processes.

Discussions are currently focusing on the effectiveness of design data transmission in view of the upcoming IoT and automation of construction processes, in line with the development of Industry 4.0. Indeed, design processes are constantly evolving, as shown by the innovations repeatedly introduced over time, such as project, knowledge and communication digitizations (Cattaneo et al., 2017).

In this framework, data transmission and management become crucial. Data need to be accessible as quickly and easily as possible to personnel, machines and IoT components. Projects need, therefore, to be drawn up according to a new set of "grammar



LEGEND



del *Construction Management*, danno luogo al cantiere cognitivo in cui la produzione di pezzi unici in fabbrica può avvenire in sincronia con le condizioni effettivamente rilevate sul cantiere. Alcune lavorazioni potrebbero essere automatizzate. Una strategia operativa di trasmissione dei dati di progetto potrebbe consistere nel conferire valore aggiunto al rapporto tra operatori e macchinari grazie al *Machine Learning*.

Gli studi condotti da Giulio Brugnarò e Sean Hanna (2018) della Bartlett School of Architecture UCL dimostrano che, combinando la fabbricazione robotica con diverse strategie di *sensing* e tecniche di apprendimento automatico, le macchine denotano notevoli capacità di mimesi delle lavorazioni manuali eseguite dall'uomo. Nell'applicazione del *Machine Learning*, all'operatore umano è ancora demandata l'interpretazione dei requisiti di progetto e l'esecuzione delle lavorazioni. Le macchine apprendono e replicano per imitazione. Pertanto il medium comunicativo è ancora *human-oriented* (Fig. 5).

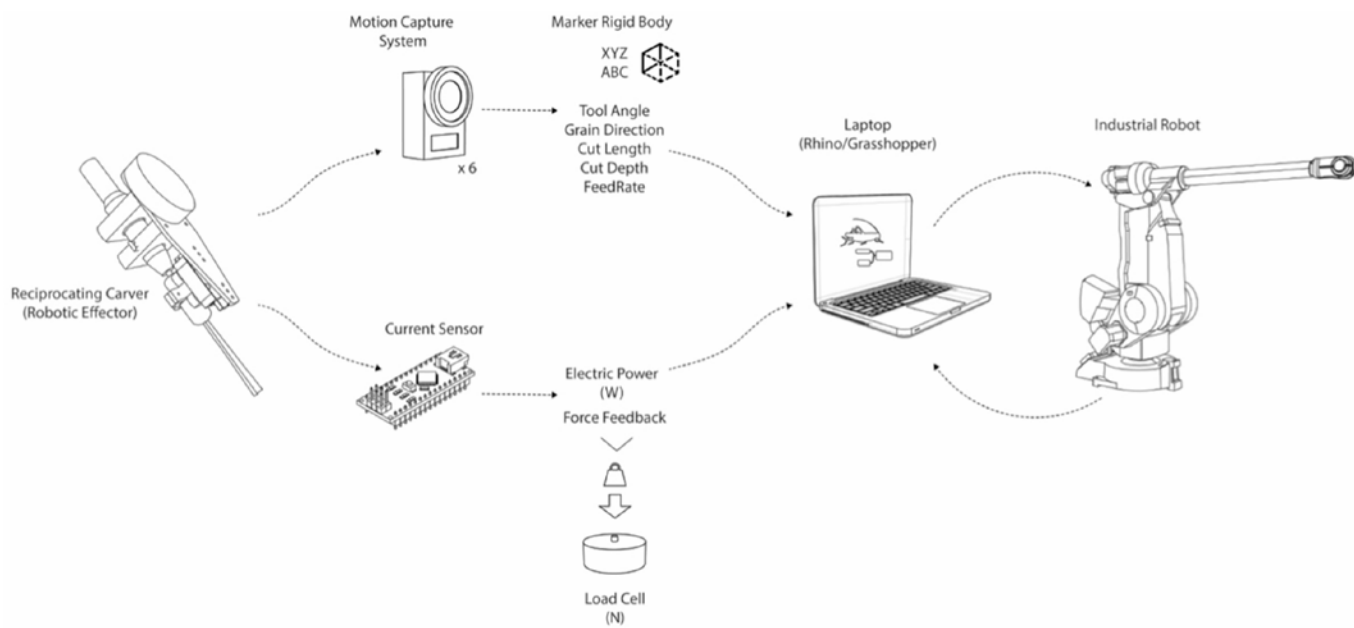
Nelle metodologie *process-oriented*, le nuove tecnologie, pur consentendo di poter realizzare oggetti superando la manualità umana, costringono il progettista a cambiare paradigma comunicativo. Da ciò deriva la necessità di adattare il medium comunicativo all'intelligenza artificiale a cui vengono impartite istruzioni operative. A tal riguardo si rimanda agli studi condotti dai ricercatori dell'ETH di Zurigo, incentrati sull'automazione dei processi additivi, da cui è tratta l'illustrazione (Fig. 6) che riporta l'esempio di un diagramma di flusso che descrive la trasmissione e l'elaborazione delle prescrizioni tecniche di dettaglio, dal progetto alla fabbricazione (Gramazio et al., 2018).

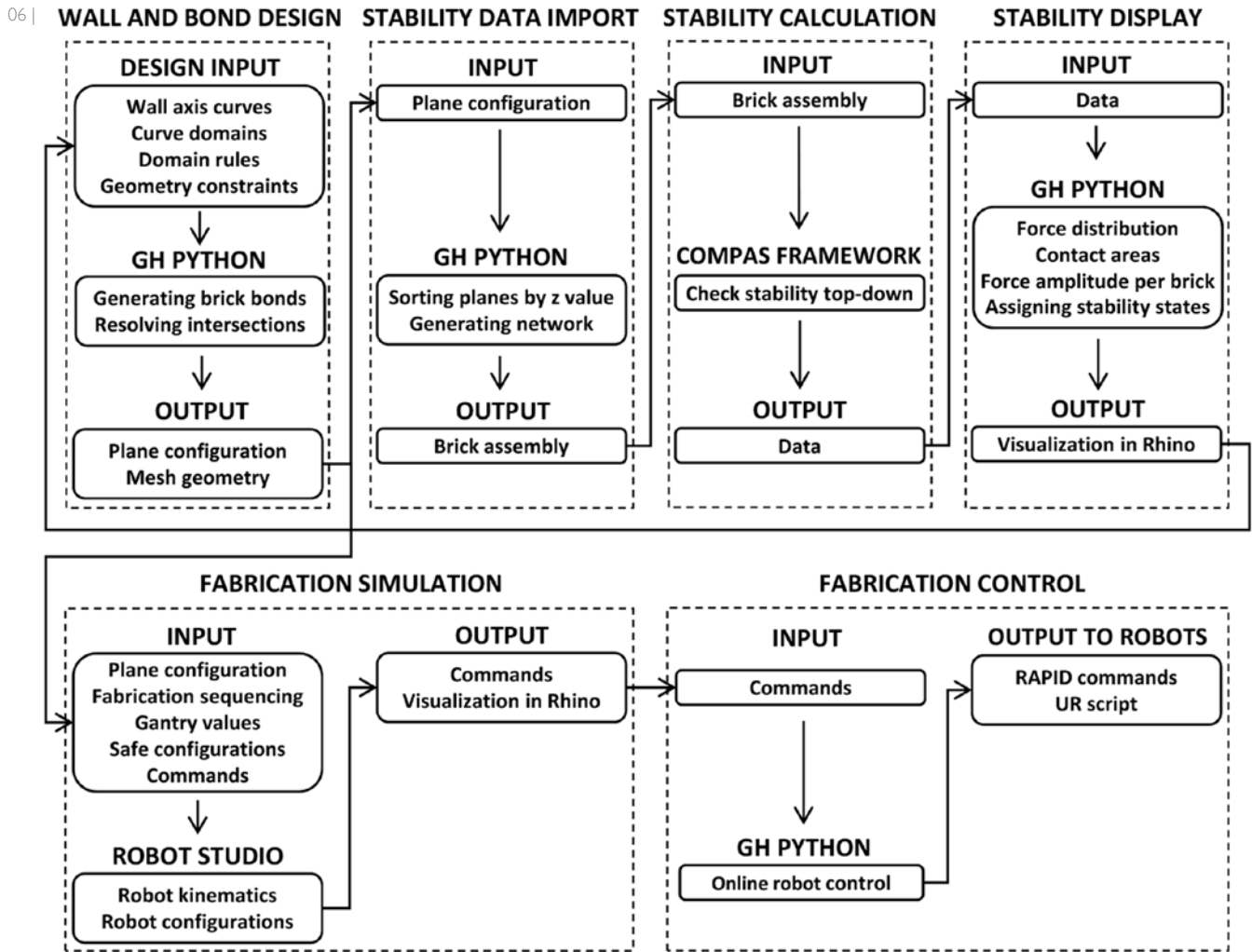
Il modello informativo integrato dei processi

Nel settore manifatturiero si sta affermando l'impiego di sistemi PLM (*Product Lifecycle Management*) in grado di gestire le informazioni riguardanti la progettazione e la produzione e, grazie alla connettività dell'Industria 4.0, anche il ciclo di vita del prodotto.

Anche nel settore delle costruzioni, in analogia, si possono adottare sistemi informativi integrati compatibili con sistemi ciberfisici e IoT, al fine di gestire la complessità del processo edilizio. I vantaggi conseguenti sono facilmente riscontrabili, ad esempio, nel controllo della coordinazione dimensionale di componenti. Si consideri la posa di moduli di rivestimento di facciata che gravano su una struttura deformabile. Occorre produrre moduli di dimensione progressivamente maggiore per compensare le deformazioni riscontrate. In questo caso la produzione dei componenti si perfeziona mano a mano che la costruzione procede. Ne consegue un approccio adattivo della produzione che supera la necessità di definire univocamente il progetto esecutivo o costruttivo e che consente il raggiungimento di economia di tempi e costi, maggiore flessibilità, riduzione degli interventi non pianificati, affinamento della programmazione e risparmio di risorse economiche, a beneficio della qualità attesa. Tale approccio consente di evitare criticità che potrebbero riverberarsi nel tempo anche nel FM. Ciò rafforza il proposito di superare la corrente concezione di progetto slegato dalla produzione e dal montaggio.

Si va oltre il concetto più avanzato di modello informativo che oggi si sta diffondendo. Ad esempio il BIM tende a prevedere, in





rules” allowing the building process complexity to be managed. Such complexity can, for instance, be appreciated from the typical information and product flow diagram of Engineered To Order (ETO) element production (Fig. 3), which is a special instance of the building process (Eastman et al., 2011). Dr. Behrokh Khoshnevis (2004), from the University of Southern California, proposed a solution aimed at managing the inherent complexity of an innovative building process such as Contour Crafting (CC). This is a specific case of Additive Manufacturing, an enabling technology for Industry 4.0. Dr. Khoshnevis’s model (Fig. 4) breaks down the process into subroutines which are mutually interconnected and recursive from detailed design to construction completion. The main strength of the study lies in

the description of an information architecture based on Information Technology (IT) among on-site operators. The described system could, however, be adapted to off-site processes, too. The model suffers from a limitation, as it does not include further processes such as FM or dismantling, since it is limited by assumption to the construction phase alone. The process system can, therefore, be developed further.

Information transmission and building process in Industry 4.0

What described so far supports the idea that building sites are places where decisions are made not only about implementation methods, but also concerning design and construction practices. As places of production, they span the entire supply chain, extending in space and logistics beyond the construction area, and have a systemic nature. The

digitization inherent in Industry 4.0 holds the promise to connect all of the different involved places. The interconnected building site can’t but be seen as a system of systems. All that takes place within the building site is heavily affected by what happens outside it. It is, therefore, suggested to expand the integrated model framework to the entire supply chain, so that «Expediting, Delivering and Construction are taken to the system level, thereby deploying BIM, GIS and Fleet Management within the same platform» (Ciribini, 2016). This approach also introduces systemic relationships among the sensor-equipped elements and the building sites where they are to be used. To this end, Industry 4.0 technologies are adopted. Once they are introduced in the application area of the Construction Management process, such technologies give rise to cog-

nitive worksites, where the production of unique elements at factory-level can be synchronized with the actual conditions existing at the building sites. Some manufacturing activities could be automated. A suitable operating strategy for project data transmission could consist of adding value to man-machine relationships through Machine Learning. The studies performed by Giulio Brugnaro and Sean Hanna (2018), from the UCL Bartlett School of Architecture, show that with suitable combinations of robotic manufacturing, sensing strategies and machine learning techniques machines display considerable capacities to mimic manual activities carried out by human operators. In Machine Learning, operators are still in charge of interpreting project requirements and of carrying out manufacturing activities.

fase di progetto, il massimo dettaglio descrittivo che è possibile controllare, tuttavia non è ancora pienamente codificato il suo grado di integrazione e di interazione con i processi di cantiere. Pertanto è stato possibile sviluppare un modello integrato per il governo dei processi (IDP, CM, FM, etc.) al fine di gestire e conservare le informazioni, ottimizzare le operazioni e monitorare le prestazioni nel tempo. A tal fine il contributo presenta il Modello Informativo Integrato dei Processi (*Processes Integrated Information Model*, PIIM) che interconnette l'*Integrated Design Process* (IDP), il *Construction Management* (CM), il *Facility Management* (FM) con la gestione documentale (*Document Management*), abbracciando l'intero processo edilizio.

Il Modello descrive un *kernel* caratterizzato da capacità computazionale, memoria e *data sharing* che comprende un archivio digitale delle informazioni, connesso con i sistemi ciberfisici e sottoposto alla supervisione e al controllo dell'operatore umano (Fig. 7).

Nell'IDP si tiene traccia dello sviluppo ricorsivo e dell'affinamento del progetto (*Level Of Detail*, LOD) dalle fasi del *Preliminary Design* a quelle del *Detailed Design*, *Construction Design* e *Operative Design*, sfruttando l'architettura informativa BIM.

Nel CM il *kernel* interconnette e gestisce, mediante la sensoristica e le tecnologie IoT, tutti i processi di costruzione, tra cui i processi automatizzati *off-site* e *on-site*, la logistica di cantiere, la sicurezza, il monitoraggio ed il controllo ambientale. La gestione del CM è implementabile con ulteriori processi.

Machines learn and repeat these by imitation. Therefore, the communication medium is still human-oriented (Fig. 5).

In process-oriented methodologies, the new technologies force designers to change their communication paradigm, although they allow objects to be manufactured beyond human manual skills. The communication medium needs, therefore, to be adapted to the artificial intelligence elements receiving the operating instructions. In this regard, reference is made to the studies performed by ETH Zurich researchers, which focus on additive process automation. The following chart (Fig. 6) is taken from such studies. It is an example of a flow chart describing the transmission and processing of detailed technical specifications, from design to fabrication (Gramazio *et al.*, 2018).

The Processes Integrated Information Model

Product Lifecycle Management (PLM) systems are gaining ground in the manufacturing industry. They can manage all design and manufacturing information. Thanks to Industry 4.0 connectivity, they are increasingly able to manage product lifecycle information, too.

By analogy, the building industry is also open to the adoption of integrated information systems compatible with IoT and cyber-physical systems, in order to handle the building process complexity.

Clear benefits can, for instance, be anticipated in the field of component dimensional control and co-ordination, such as in the layout of façade cladding modules resting on a deformable structure. Modules of increasing dimension need to be manufactured,

Nel FM il *kernel* monitora e gestisce, mediante la sensoristica, il comportamento prestazionale dell'edificio, la logistica, la sicurezza in fase di esercizio e conserva e aggiorna il progetto *as-built*. Quest'ultima esigenza è giustificata dal modificarsi dell'edificio nel corso della propria vita utile e dalla necessità di tenerne traccia. Il modello informativo che ne deriva può originare un "libretto dell'edificio", contenente informazioni significative in relazione all'esercizio dell'opera assieme alla programmazione e agli esiti delle operazioni manutentive, al fine di garantire la qualità prestazionale nel tempo.

Attraverso il *kernel* è inoltre possibile effettuare la gestione documentale, estraendo tutti i documenti inerenti il fabbricato in formato digitale e analogico.

Prospettive e possibili approfondimenti della ricerca potrebbero riguardare l'implementazione del modello mediante l'integrazione di ulteriori processi. Un'altra possibilità consiste nello sviluppo di *cluster* di sistemi integrati, al fine di monitorare il patrimonio edilizio per incrementarne il livello di conoscenza e consentire l'elaborazione di *Big Data* per attuare misure di efficientamento prestazionale a diversa scala. Un ulteriore approfondimento merita il tema della *cyber security* applicata alla gestione del processo edilizio. I limiti ravvisati nel modello consistono nell'imprevedibilità di taluni accadimenti di natura tecnologica, ambientale, organizzativa, etc. in grado di perturbare il sistema e i processi subordinati.

to make up for the measured deformations. In this case, component manufacturing gets refined as the construction work progresses.

An adaptive approach to production, therefore, ensues, which by-passes the need to unambiguously define the entire executive and construction design at the outset. This in turn enables time and cost savings, greater flexibility, unplanned work reductions, planning refinements and financial resource savings, to the advantage of the expected quality. This approach does away with criticalities which may propagate in time up to the FM. This strengthens the goal of going beyond the current framework, whereby design activities are uncoupled from manufacturing and assembly ones.

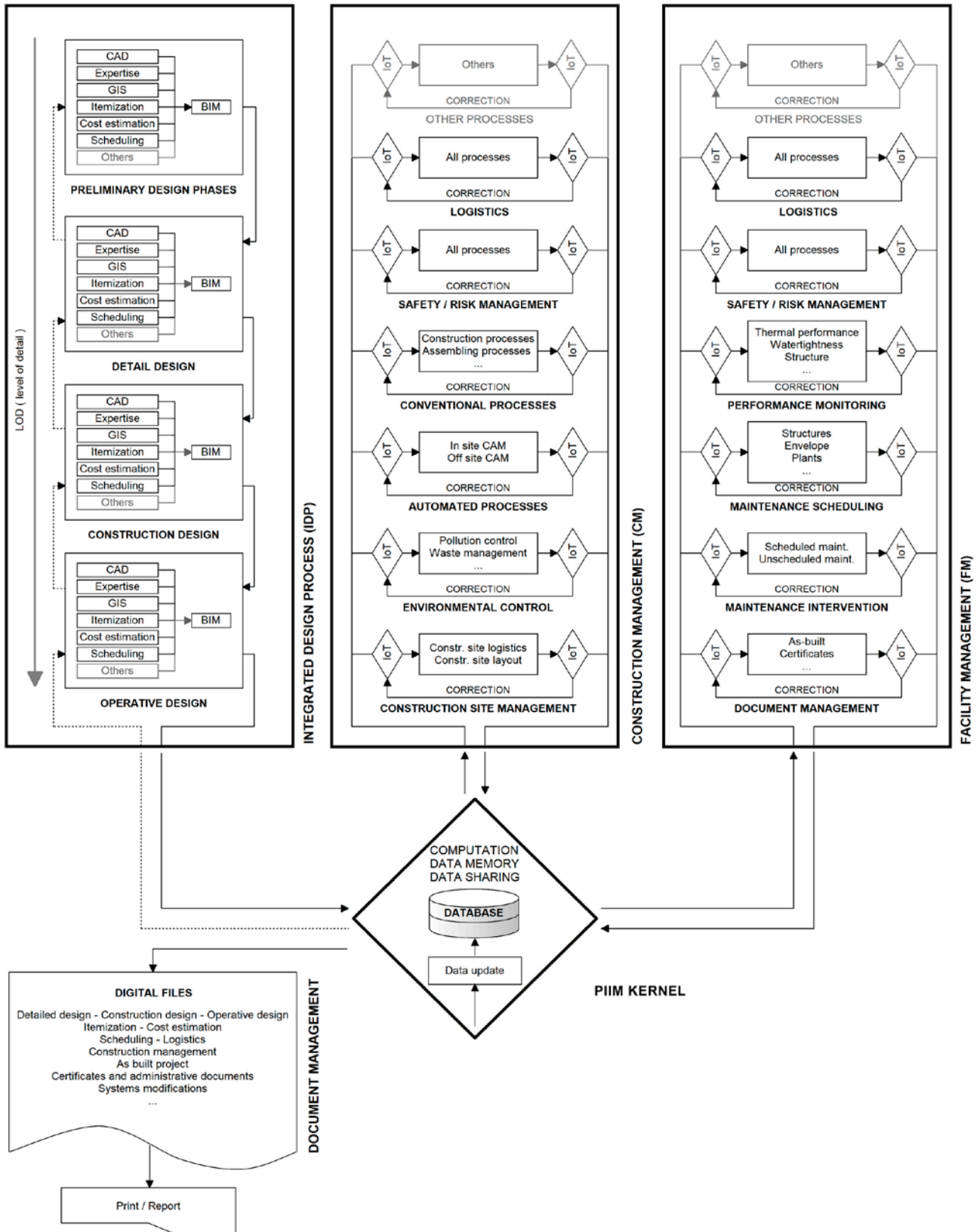
We go beyond the most advanced information model framework currently gaining ground. At the design

stage, BIM tends, for instance, to aim at the finest description detail that can be controlled. However, the extent of its integration and interactions with building site processes isn't fully defined.

An integrated model could, therefore, be developed for (IDP, CM, FM, etc.) process management, with the aim of managing and storing information, optimizing operations and monitoring performance over time. This paper, therefore, introduces the Processes Integrated Information Model (PIIM), which interconnects Integrated Design Process (IDP), Construction Management (CM) and Facility Management (FM) with Document Management, thereby spanning the entire building process.

The PIIM model describes a kernel characterized by computing, memory and data sharing capabilities, including

PROCESSES INTEGRATED INFORMATION MODEL (PIIM)



REFERENCES

- Bardelli, P.G. (1994), "Una interpretazione del concetto di progettazione integrale per edilizia", in Cavaglia, G. (Ed.), *Lecture Tecnologiche*, Edizioni Sciptorium, Torino, pp. 53-63.
- Bennet, J. (2000), *Construction the third way: Managing Cooperation and Competition in Construction*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Brugnaro, G. and Hanna, S. (2018), "Adaptive Robotic Carving: Training Methods for the Integration of Material Performances in Timber Manufacturing", in Block, P., Byrne, K., Hutter, M., Schork, T. and Willmann, J. (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*, Proceedings of the ROB|ARCH 2018, Springer Nature Switzerland AG, Cham, CH, pp. 337-348.
- Cattaneo, L., Cerri, D. and Terzi, S. (2017), "Industria 4.0: una rivoluzione anche nella progettazione", available at: <https://www.industriaitaliana.it/industria-4-0-una-rivoluzione-anche-nella-progettazione/> (accessed 3 February 2019).
- Ciribini, A.L.C., (2016), "Cantieri Digitali, BIM, 4.0", available at: <http://www.bollettinoadapt.it/cantieri-digitali-bim-4-0/> (accessed 16 February 2019).
- Eastman, C., Liston, K., Sacks, R. and Teicholz, P. (2011), *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, US.
- Gramazio, F., Jenny, D., Kohler, M., Mayer, H., Parascho, S. and Piškorec, L. (2018), "The Brick Labyrinth", in Block, P., Byrne, K., Hutter, M., Schork, T. and Willmann, J. (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*, Proceedings of the ROB|ARCH 2018, Springer Nature Switzerland AG, Cham, CH, pp. 490-500.
- Khosnevis, B. (2004), "Automated Construction By Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies", *Automation in Construction, Special Issue: The best of ISARC 2002*, Vol. 13, Issue 1, January 2004, pp. 5-19.

a digital information archive connected to the cyber-physical systems and subject to human operator supervision and control (Fig. 7).

By exploiting the BIM information architecture, the IDP keeps track of project recursive development and refinement (Level Of Detail, LOD) from Preliminary Design to Detailed Design, Construction Design and Operative Design.

Within CM, the kernel interconnects and manages all construction processes by means of sensors and IoT technologies. Such processes include off-site and on-site automated activities, building site logistics and safety, as well as environmental monitoring and control. CM management can be implemented by means of further processes.

Within FM, the kernel monitors and manages, with the help of sensors,

buildings' performance, logistics and safety over the operational phase. It also saves and updates the as-built project, as required by the changes undergone by buildings over their operating lives and by the need to keep track of them. The described information model can generate a "building logbook" containing relevant information about the building operation, as well as maintenance work schedules and results, in order to guarantee the building performance level over time. The kernel also allows document management by retrieving all the building-related documents in digital and analogue format.

Further research developments and activities may involve the implementation of the described model by integrating further processes. A further possibility is the development of integrated system clusters. These could

be aimed at monitoring the existing building stock in order to expand the associated knowledge base and allow Big Data with a view to implementing performance-enhancing measures at various scales. The use of cyber security in the management of building processes is also worth further research work. The model identified limitations have to do with the unforeseeable nature of some technological, environmental, organizational events, and so on, which can disrupt the system and the underlying processes.