

## DATA-DRIVEN LCA PER L'INNOVAZIONE INDUSTRIALE GREEN DELLE FACCIATE CONTINUE CUSTOMIZZATE

### DATA-DRIVEN LCA FOR GREEN INDUSTRIAL INNOVATION OF CUSTOM CURTAIN WALLS

Theo Zaffagnini, Luca Morganti

#### ABSTRACT

L'ottimizzazione e la gestione avanzata del design, dell'ingegnerizzazione e della produzione edilizia al fine di massimizzarne le prestazioni ambientali rientrano fra le innovazioni facilitate dagli strumenti della transizione digitale. In questo contesto, il saggio inquadra e propone l'integrazione di peculiari dati informatici nella valutazione del ciclo di vita del prodotto industriale. Vengono qui esposti gli attuali limiti delle pratiche di Life Cycle Assessment nel settore della prefabbricazione di cellule customizzate per facciate continue e come questi possano essere superati da un approccio data-driven integrato con le piattaforme e i software specifici utilizzati dalle aziende. Ciò al fine di stimolare un'innovazione sostenibile e resiliente e un avvicinamento tra la ricerca informazionale con la produzione industriale e i suoi processi organizzativi.

The optimization and advanced management of design, engineering, and building construction, aimed at the maximization of environmental performance, are among the innovations facilitated by the tools of the digital transition. In this context, this study focuses on and proposes the integration of peculiar IT data in the life cycle assessment of industrial products. The present paper also outlines the current limitations of Life Cycle Assessment practices concerning the prefabrication of custom modules for curtain walls and how these limitations can be overcome through a data-driven approach, integrated with specific platforms and software used by companies. The aim is to foster sustainable and resilient innovation, bridging the gap between information research, and industrial production and its organizational processes.

#### KEYWORDS

facciata continua a cellule prefabbricate, LCA, modello semantico dei dati per LCA, software di gestione industriale, transizione green e circolare

curtain wall with prefabricated modules, LCA, semantic data model for LCA, industrial management software, green and circular transition

**Theo Zaffagnini**, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture of the University of Ferrara (Italy). He conducts research in the field of Architectural Technology, mainly on the themes of technological and digital innovation of building processes, and sustainability aspects in architectural construction. Mob. + 39 347/36.35.290 | E-mail: theo.zaffagnini@unife.it

**Luca Morganti**, Architect, is a PhD Candidate in the International Doctorate in Architecture and Urban Planning at the University of Ferrara (Italy), with Focchi SpA as an industrial partner. His research activities focus on the green transition in the industry of prefabricated curtain walls for the promotion of circular and sustainable development. Mob. +39 333/57.78.977 | E-mail: luca.morganti@unife.it



Come venire a patti con la nostra inaspettata, senza precedenti e quasi miracolosa opulenza di dati di cui spesso non sappiamo cosa fare (Carpo, 2017) è parte del ragionamento dominante che sta caratterizzando la transizione digitale contemporanea. La possibilità di sfruttare tali dati per favorire uno sviluppo socialmente, economicamente e soprattutto ecologicamente sostenibile è ormai un tema centrale del dibattito internazionale. Il digitale rappresenta infatti un dispositivo tecnico e culturale che può consentire l'individuazione di nuovi approcci metodologici di interpretazione dei dati per la gestione del processo edilizio (Rigillo, Russo Ermolli and Galluccio, 2021) da un punto di vista costruttivo, normativo e ambientale.

Siamo nell'ambito di quelle rilevanti trasformazioni che stanno orientando la cultura tecnologica della progettazione di questi anni; una confluenza di grandi temi su cui la comunità scientifica, in modo inter-scalare e secondo articolate direzionalità, si sta confrontando: cambiamenti climatici, quarta rivoluzione industriale, sostenibilità e resilienza. Si tratta infatti della visione di uno scenario attuativo capace di considerare e mettere a sistema le recenti trasformazioni avvenute nei processi di progettazione e di produzione, ideato al fine di affrontare quella «[...] incertezza di tipo epistemico, dovuta all'impossibilità di creare modelli della realtà sufficientemente e adeguatamente definiti a causa dell'incompletezza della nostra conoscenza» (Campioli, 2017, p. 30). Una sfida che si fa carico delle note incertezze indotte dal mercato (di settore), dall'organizzazione e gestione della costruzione, dall'adeguatezza del livello di sostenibilità ambientale delle trasformazioni programmate, fino al reale comportamento prestazionale del costruito e alla rispondenza del ciclo di vita previsto (tra le altre).

Un momento non solo di transizione verso approcci operativi più attuali e di convergenza tra innovazioni materiali e immateriali, ma di riconsiderazione contestuale del perimetro degli apporti scientifici in questo quadro d'insieme. Sviluppi che, come si potrà apprezzare in seguito, paiono orientati in modo ambivalente sia verso le tecnologie forti (hard) della produzione industriale che verso i processi guida informazionali (soft)<sup>1</sup>, secondo una classificazione dei primi anni Settanta che mirava in qualche modo a rendere maggiormente riconoscibili gli ambiti di azione, gli apporti culturali e le ricadute pragmaticamente operative per l'industria della nuova compagine scientifica disciplinare della tecnologia che si stava coagulando.

Premesso che il dibattito circa la collocazione prioritaria degli interessi della comunità scientifica tecnologica verso uno di questi due perimetri di azione – hard e soft – sembra ancora aperto (Antonini, 2013), si ritiene interessante approfondire nuovi potenziali ambiti di ricerca, con uno sguardo attento sia alle necessità di nuovi strumenti guida sia alle istanze peculiari dei destinatari di tali azioni di governo del progetto (e/o della produzione).

Nell'attuale scenario generale di transizione digitale (indissociabile dalle istanze di emergenza climatica) ci si prefigge di indagare e proporre un approccio originale basato sull'analisi di dati peculiari e finalizzato a strategie Life Cycle Thinking, obiettivo questo possibile grazie ai nuovi strumenti digitali interoperabili improntati a contemplare un nuovo tipo di esigenze, oltre che a fornire suppor-

to per azioni predittive per il miglioramento di soluzioni sostenibili e resilienti. Nel caso specifico si tratta di un framework fra strumenti informatici industriali mirato all'innovazione tecnologica, all'ottimizzazione e alla gestione avanzata delle risorse e del processo produttivo nel settore delle facciate continue.

Oltre a ciò, questo studio si prefigge di evidenziare scenari di fattibilità dell'approccio presentato, reso possibile dall'integrazione tra software e piattaforme di data management con modelli di valutazione dell'impatto ambientale come il Life Cycle Assessment (LCA), al fine di supportare azioni sostenibili sul ciclo di vita del prodotto industriale. In seguito a questo inquadramento introduttivo si presenterà un'analisi dello stato dell'arte degli ambiti trattati, partendo dalla presentazione del contesto scientifico-produttivo di riferimento e delle relative pratiche di LCA (industriali e sinergiche con tecnici progettisti e specialisti). Ci si propone di analizzarne criticamente gli aspetti salienti, le criticità e i limiti da superare; inoltre, si definiscono gli obiettivi connotanti l'approccio innovativo qui proposto.

A seguire sono brevemente descritti e confrontati criticamente alcuni approcci data-driven di valutazione ambientale già sperimentati in edilizia e vengono anche presentati i modelli e gli strumenti attraverso cui si ritiene che le implicazioni pratiche/funzionali dei data-driven LCA possano essere utili in questo e in altri potenziali contesti del settore delle costruzioni. In conclusione verrà proposta una lettura critica dei vantaggi e delle ricadute degli stessi per l'industria e per la disciplina Tecnologica.

### **Know-how del LCA delle facciate continue customizzate a cellule prefabbricate**

La comunità scientifica che si occupa dell'affinamento del LCA, al pari dell'industria in piena transizione ecologica attraverso i propri dipartimenti di R&D, è alla costante ricerca di affidabili modelli innovativi per affinare, velocizzare, controllare e validare i processi esistenti. In quest'ottica i ragionamenti che seguono si riferiscono allo specifico contesto della progettazione, produzione, installazione e recupero di sistemi a cellule customizzate e prefabbricate per facciate continue ad alto contenuto tecnologico (Figg. 1-11).

Questo ambito, così come altri di prefabbricazione di sistemi e componenti edilizi, beneficia dei noti vantaggi ambientali offerti dalla preparazione e dall'assemblaggio fuori opera in stabilimenti produttivi specializzati e controllati. Tale caratteristica infatti prevede che i sistemi realizzati nell'ambito di questi processi siano mediamente più sostenibili di altri analoghi non prefabbricati, a seconda della distanza fra sito produttivo e cantiere, dei requisiti e delle tempistiche di progetto e delle circostanze in cui verte il mercato dei materiali e delle componenti per costruzioni (Pons, 2014). Tuttavia, la quantificazione e la verifica di questi vantaggi per organismi complessi e customizzati è tuttora oggetto di ricerca e dibattito a causa di una spesso eccessiva approssimazione e di insufficienti benchmark di riferimento.

Politiche internazionali volte allo sviluppo sostenibile e alla mitigazione del global warming stanno portando chi opera in questi mercati a occuparsi maggiormente dell'analisi ambientale dei

propri prodotti. Per quanto siano ancora limitati gli atti che ne costringono l'implementazione, l'Unione Europea sta adottando sempre più riferimenti al Life Cycle Thinking (LCT) e al LCA nelle sue comunicazioni e nelle sue policy (Sala et alii, 2021). Ciò, seppur indice di un pragmatico interesse nell'incentivare uno sviluppo sostenibile, costituisce una sfida rilevante per l'industria delle facciate architettoniche customizzate, in quanto ogni cellula, avendo caratteristiche uniche e non ripetibili, necessita di analisi puntuali ex-novo in mancanza di adeguate Product Category Rules.

La richiesta degli stakeholders (tra cui general contractor e clienti) di verificare target di sostenibilità, come i Science Based Targets (SBTs) o di altri sistemi di valutazione ambientale (del tipo LEED e BREEM), sta rendendo sempre più pressante l'esigenza industriale di dotarsi di una strategia digitale per l'analisi automatizzata e interoperativa dei dati in grado di valutare i propri manufatti, in tempi utili alle dinamiche di mercato e con la massima precisione possibile.

Viste tali articolate premesse, riferibili a questa specifica realtà produttiva, è proprio con la transizione digitale che si prospettano interessanti evoluzioni pratiche per la gestione delle citate criticità dell'impresa. Per ottenere questi risultati si ritiene utile la concezione di un nuovo framework di database che permetta alle varie divisioni aziendali in possesso di dati utili al LCA (uffici qualità, uffici tecnici, etc.) una condivisione in tempo reale con altri utilizzatori di quei dati (uffici gare, project e design manager, etc.), al fine di avere una disponibilità sempre aggiornata nel momento di consultazione del dato. L'obiettivo finale di questo passaggio è la creazione di condizioni ottimali per relazionare automaticamente i dati tra le piattaforme già in uso nell'industria, in particolare tra software di Enterprise Resource Planning (ERP)<sup>2</sup> e di Product Lifecycle Management (PLM)<sup>3</sup>, tra piattaforme Common Data Environment (CDE), e altri eventuali peculiari database aziendali specialistici. La finalizzazione di questa sinergia strumentale, consistente in un data-driven LCA, fornirebbe:

- la possibilità di quantificare l'impatto ambientale del prodotto, così come definito dalla norma ISO EN 14040:2006 tramite Life Cycle Impact Assessment (LCIA), e la simultanea valutazione di altri parametri richiesti dal mercato, come la conformità con percentuali minime di materiali riciclati o la reperibilità di Environmental Product Declarations (EPDs) degli elementi che compongono la cellula prefabbricata; l'importanza di questo passaggio risiede nella rilevanza delle informazioni funzionali all'ottenimento di certificazioni ambientali in riferimento alle norme ISO 14021:2016 ed EN 15978:2011 e/o compatibili con altri sistemi di valutazione internazionali;

- il supporto decisionale a scelte strategiche green in fase di progetto, di ingegnerizzazione, di produzione, di pianificazione logistica, di valutazione della catena di fornitura, assemblaggio e infine di disassemblaggio, ciò grazie alla possibilità di valutare preventivamente l'impatto delle varie operazioni alternative per il raggiungimento dell'obiettivo prefissato; considerazioni queste di altri difficili valutazioni attraverso i modelli convenzionali di LCA;

- il supporto all'ideazione di strategie (nuove e virtuose) per il fine vita delle facciate per favorire la transizione e innovazione circolare (Viscuso, 2021).



Il framework operativo proposto permetterebbe inoltre di ri-perimetrare i principali limiti dei metodi in uso per il LCA rilevati sia dalla comunità scientifica che dagli operatori industriali. Fra questi troviamo, ad esempio, l'insufficiente supporto a scenari 'what if', l'attualmente scarsa possibilità di integrazione con modelli BIM e la totale mancanza di informazioni in funzione del tempo per la gestione dell'End of Life (EoL) stage (Fnais et alii, 2022). L'uso dello stesso consentirebbe infatti di valutare diversi scenari operativi in base all'impatto ambientale e alle possibilità di EoL (in fase di progetto), e di aggiornare costantemente la valutazione durante l'avanzamento della commessa per la verifica dei requisiti. Tutto ciò attingendo a dati primari progettuali (dal modello BIM, dai software ERP e PLM) e ambientali, ottenuti dalle misurazioni dirette dell'impatto delle lavorazioni o ricavati dalle specifiche EPD dei materiali impiegati.

L'utilizzo di dati primari per queste analisi rappresenta un aspetto fondamentale per la precisione e la spendibilità del LCA (Silva et alii, 2020) e l'integrazione dell'analisi con un modello BIM, seppur ancora limitata, garantisce una tracciabilità totale delle cellule per la progettazione e l'ideazione dell'EoL (Llatas, Soust-Verdaguer and Passer, 2022). I modelli BIM, inoltre, offrono notevoli possibilità di integrazione con database e sono oggetto di sempre più frequenti studi volti all'ideazione di soluzioni manuali, semiautomatiche, e re-

centemente, anche automatiche di scambio dati (Safari and AzariJafari, 2021).

I risultati di questa analisi potrebbero a consuntivo essere visualizzati da manager e tecnici tramite dashboard generate da software di Business Intelligence (BI) o direttamente dal modello BIM, potenzialmente riconducibile a un Digital Twin della facciata ove sufficientemente sviluppato (caricato su una piattaforma CDE), quando collegato al framework operativo ideato. Un'ulteriore versatilità di questo approccio, a vantaggio dell'utilizzatore finale, risiede nella sua capacità di asservire la realizzazione di dashboard capaci di operare la valutazione contestuale di diverse opzioni costruttive integrando l'analisi di Life Cycle Costing (LCC) con il LCA (Zeng, Chini and Ries, 2020).

#### Ricognizione comparativa di alcuni modelli data-driven già sperimentati in edilizia | Negli

ultimi anni si sono progressivamente diffusi numerosi software per la realizzazione di LCA di prodotti edilizi, anche sotto forma di plug-in specifici per software BIM. Questi sistemi, tuttavia, risentono ancora in larga parte dei limiti precedentemente descritti e della possibilità di gestire dati primari con uno strumento all-in-one e interoperativo. Un raffronto tra le possibilità offerte dai principali software, stand alone e BIM plug-in offerti dal mercato e il modello proposto è presentato nella Tabella 1.

Recentemente approcci e strumenti data-driven, più sofisticati di quelli presenti sul mercato, iniziano a essere oggetto di ricerche scientifiche multi-scalari del settore edilizio e ambiscono a proporre modelli attuativi sfruttando le potenzialità dei software già diffusi. Tra questi, a seguire, si segnalano alcuni interessanti casi studio e buone pratiche, validati da ricerche e sperimentazioni sul campo, in cui i modelli attuativi adottati offrono spunti coerenti e funzionali per il modello originale che si va qui a proporre.

Un primo esempio riguarda l'ambito di soluzioni manuali e automatizzate per la condivisione dei dati con modelli BIM. Relativamente a questo tipo di approccio è certamente interessante da analizzare lo studio per l'impostazione di un modello di dati per la valutazione automatica BIM-based presentato da Jan Ružicka (et alii, 2022). Questo studio si basa sull'analisi e la verifica dei possibili workflow e prevede l'integrazione dei dati BIM per la valutazione del Complex Building Quality Assessment. Lo schema riassuntivo del workflow di questo approccio è sintetizzato nella Figura 12.

Altro esempio di modelli alternativi è rappresentato da due casi di modelli data-driven per la valutazione delle performance energetiche del costruito. In questo specifico ambito è interessante ai fini del presente studio il lavoro proposto da Jacopo Famiglietti e da un gruppo di ricerca del Politecnico di Milano (Famiglietti et alii, 2022). In que-

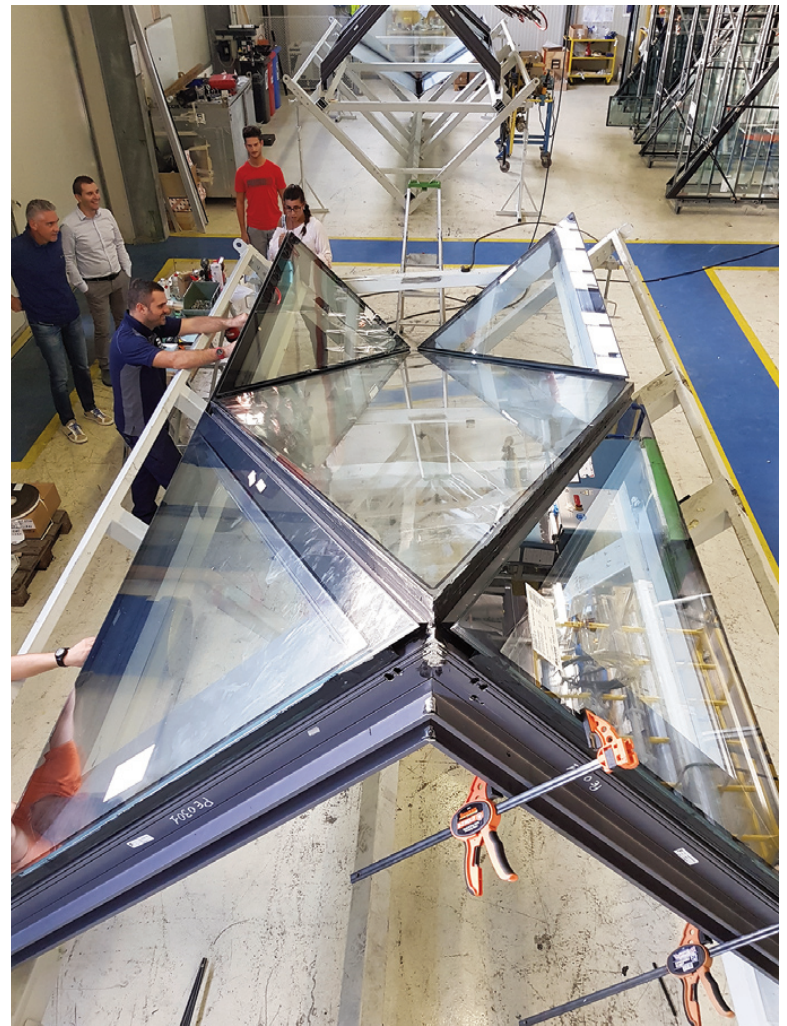


Fig. 1 | In-line production of curtain wall modules (credit: G. Salvatori, 2015).

Fig. 2 | Lean production of curtain wall modules (credit: Focchi SpA, 2017).



sto caso è stato sviluppato in Python un data-driven tool per la valutazione ambientale LCIA della fase d'uso di edifici a scala urbana, scenario per cui i software di valutazione in commercio non sono al momento ottimizzati. Sempre riguardo a questo aspetto, in seguito a una revisione sistematica, Venkatraj e Dixit (2022) hanno evidenziato potenziali soluzioni, direzioni future e opportunità di ricerca per i data-driven Life Cycle Energy Assessment.

È interessante notare come in entrambi i lavori citati il workflow dei dati per la realizzazione di queste valutazioni si suddivide in tre step (Fig. 13): 1) preparazione e collezione dei dati; 2) ricezione dei dati per il LCI come parametri di input e computazione ambientale dei sistemi energetici, in mancanza di metodologie standardizzate; 3) valutazione a livello di edificio, presentazione dei risultati, restituzione della valutazione, rappresentatività temporale ed eventuale import di dati a valle del processo.

Il confronto tra questi workflow attuativi (quello in tre fasi per la valutazione energetica e quello integrato con modelli BIM) con il modello originale proposto (ideato in seguito allo studio delle possibilità offerte dai software aziendali più diffusi e consolidati, e delle necessità delle compagini produttive) ha portato all'affinamento di un approccio data-driven per questo specifico settore.

Il workflow che di seguito si propone per l'utilizzo di dati primari per il LCA delle cellule di facciata prevede un'innovazione finalizzata al superamento dei limiti dei modelli precedenti, un avanzamento possibile in ragione dell'implementazione delle informazioni contenute nel modello BIM della facciata e nei software PLM e ERP aziendali per la computazione dei dati di progetto e l'utilizzo di database interni per i dati ambientali seguendo tre distinte sezioni attuative (Fig. 14). Un modello informativo così organizzato consente infatti una valutazione efficiente delle diverse strategie progettuali, una loro verifica in real-time durante l'avanzamento del processo produttivo e una maggiore qualità del progetto finale, oltre che favorire l'evoluzione di metodologie LCA colmandone le lacune evidenziate.

### Possibili scenari operativi, tra benefici e criticità, per la gestione avanzata dei dati di processo

Pare opportuno a questo punto entrare nel merito delle modalità con cui questi obiettivi possono essere raggiunti attuando il modello illustrato dalle compagini produttrici di facciate architettoniche prefabbricate customizzate. Il modello innovativo proposto in questo lavoro si fonda sull'applicazione seriale dei seguenti metodi (Fig. 15): 1) l'indagine delle informazioni necessarie per rispondere al mercato e ambire al raggiungimento dei Science-Based Targets (SBTs); 2) la definizione dei possibili flow chart per il Life Cycle Inventory (LCI) delle singole operazioni unitarie che compongono i processi produttivi oggetto di studio, e dei dati ambientali e di progetto necessari per il LCA; 3) la scomposizione e analisi delle commesse, allo scopo di identificare quali comparti aziendali gestiscono i dati utili al LCA (e altri dati richiesti) e quali richiedono quei dati; 4) la definizione del framework operativo dei dati utilizzando le informazioni contenute nei software gestionali in uso, secondo i requisiti e le informazioni analizzate (e valutazione di necessarie integrazioni); 5) l'at-

tuazione e l'organizzazione informatica dell'input e dell'output dei dati predisponendo le modalità di condivisione; 6) la messa in funzione del sistema di interazione e condivisione automatica dei dati.

Si evince come la definizione dei dati e la loro lavorabilità risulti essere la parte centrale di questi metodi. Per questo il primo passaggio prevede la raccolta dei target analitici necessari per analizzare il prodotto in base agli obiettivi e allo scopo di progetto (ad esempio categorie di impatto del LCIA, requisiti dei Rating System più diffusi, certificazioni richieste dai clienti): gerarchizzare questi parametri contribuisce alla valutazione di road map sostenibili a breve e a lungo termine. Successivamente devono essere individuati i punti in cui i dati di analisi sono reperibili direttamente da software e database aziendali (primari), o in alternativa dalla letteratura e da banche dati (dati secondari), o come definirli sulla base di stime e valori medi (dati terziari).

La possibilità di estrarre dati, dai gestionali ERP, oltre che da software BIM, porterebbe a risolvere in buona parte i limiti della pratica di LCA dovuti alla complessità dei modelli digitali delle facciate. Qui è tuttavia necessaria la previsione di una fase attuativa in cui definire l'unità funzionale ideale per confrontare le operazioni unitarie e gli elementi costruttivi con i parametri di conversione nel loro impatto in riferimento al LCIA (i dati dovranno necessariamente essere normalizzati in base alle unità funzionali individuate). A conclusione del processo, seguirà la fase attuativa in cui tecnici informatici possono rendere operativo il framework ideato applicando i metodi precedentemente descritti. Il modello adottato sarà così verificabile e iterativo grazie all'affinamento ottenuto dai feedback degli operatori.

I limiti di questo approccio sono soprattutto di natura tecnica. Fra questi troviamo la ragionevole necessità di acquisizione di software di BI o di CDE (qualora l'azienda non ne sia già fornita), l'imprescindibile competenza inter-disciplinare del tecnico o del team incaricato di ideare il framework attuativo (rispetto all'organizzazione aziendale, a tematiche di valutazione dell'impatto ambientale e a modelli BIM), e la necessaria programmazione informatica del workflow di dati da parte di Ingegneri informatici, strutturando e organizzando i dati secondo il modello semantico teorizzato (organizzando le informazioni e le loro relazioni). Per una corretta esecuzione di questa operazione è inoltre fondamentale una complessa cooperazione tra tutte queste figure e i vari dipartimenti dell'impresa. Per gli operatori finali, invece, non saranno necessarie particolari conoscenze informatiche aggiuntive, se non per la consultazione dei dati nelle dashboard tipicamente user-friendly della BI.

Volendo infine accennare alle ricadute applicative del modello messo a punto e proposto, pare utile a titolo esemplificativo descrivere una sua ipotetica attuazione. Ciò ipotizzandone l'utilizzo per l'analisi dell'impatto ambientale di una cellula customizzata durante l'avanzamento di una commessa tipica, ovvero dalla presa in carico del lavoro all'installazione in cantiere. Conclusa la fase di gara, nelle prime fasi di project management, i requisiti ambientali da perseguire vengono immessi nel framework, attraverso il software di BI, fungendo questi da benchmark per l'intera durata



Fig. 3 | Special packaging of a curtain wall module (credit: Focchi SpA, 2017).

Fig. 4 | Air, wind, and rain resistance test of a custom curtain wall system (credit: Focchi SpA, 2017).

del processo. Nella fase di studio di sistema, in cui viene definita la tecnologia della cellula tipo, sarà possibile valutare le diverse categorie di impatto di varie alternative progettuali sulla base dei dati ambientali primari raccolti direttamente da altri dipartimenti aziendali.

Una volta definite le specifiche tecnologiche, tutti i dati progettuali sono automaticamente integrati nel framework di valutazione in quanto i software già utilizzati ne sono inclusi e non prevedono ulteriori piattaforme entro cui caricare manualmente i dati interessati al LCA. Lo stesso varrebbe nella fase di sviluppo costruttivo, momento in cui da prassi, uno o più uffici tecnici definiscono i dettagli esecutivi per tutta la facciata e il piano di produzione. In questo scenario i dati ambientali deriverebbero invece da archivi ideati ad hoc e condivisi con gli operatori dei comparti dell'industria a vario titolo interessati.

Ulteriori vantaggi del metodo qui proposto risiedono nella possibilità da parte dell'azienda di poter rivalutare in ogni momento scelte prese anche precedentemente in risposta ad eventuali richieste di affinamento pervenute dagli stakeholders e di implementare la possibilità di valutare in tempo reale l'ecologia di nuovi prodotti, sistemi, materiali o servizi in fase di R&D per futuri virtuosi brevetti. Oltre a ciò permetterebbe di ampliare la



portata e la precisione del LCA anche alle fasi di manufacturing e utilizzo grazie a DT degli stabilimenti produttivi e dei sistemi di facciata installati opportunamente sensorizzati.

**Conclusioni e sviluppi futuri** | Ragionando di innovability<sup>®</sup>4, termine che rimanda a una innovazione orientata alla ricerca della massima sostenibilità dei processi gestionali e produttivi a servizio dei diversi stakeholders e dell'industria in particolare, non si può non tornare con la memoria ai contenuti di un libro di uno tra i più fini studiosi dell'innovazione delle tecnologie per l'architettura, ovvero Nicola Sinopoli (2002) con il suo *La Tecnologia Invisibile*. L'immaterialità tecnologica – e nello specifico quella introdotta dalla transizione digitale – spesso tende ad essere sfuggente ad un immediato riconoscimento, arricchendo ulteriormente l'elenco di quei saperi meno visibili e misurabili nella produzione dell'architettura. Questo contributo si addentra e mette a sistema una molteplicità di criticità e di limiti da superare in un particolarissimo ambito della produzione edilizia, grazie all'apporto delle nuove tecnologie digitali a servizio di un futuro più responsabile e rispettoso dell'ambiente e delle prossime generazioni.

L'approccio metodologico interdisciplinare qui presentato, ottenuto a seguito di una mediazione critica tra alcune delle più interessanti proposte di natura teorico-sperimentale e consolidati

know-how aziendali produttivi, si pensa possa giovare sia all'innovazione sostenibile di prodotto che di processo.

Ciò di fatto seguendo l'auspicata traiettoria di riavvicinamento della cultura tecnologica nazionale verso l'hard e verso l'industria rispetto ai «[...] troppi soft di cui la disciplina si è occupata in questi anni» proposta da Sinopoli (cit. in Antonini, 2013, p. 46), con la prospettiva che queste piattaforme per database, una volta sviluppate e testate secondo il modello teorico proposto, possano anche essere ad accesso aperto per la condivisione dei dati al di fuori dello specifico contesto produttivo a cui qui si riferiscono, a beneficio di successive innovazioni di settore in linea e funzionali alle tendenze di un'industria manifatturiera, più intelligente e competitiva. In quest'ottica la smartness industriale richiede appunto la disponibilità o il potenziamento di strumenti digitali di dialogo interoperabili ritenuti fondamentali per un incremento di imprenditorialità e competitività, per un corretto impiego delle risorse, per la consapevolezza del proprio valore nazionale e internazionale e per nuove competenze predittive su aspetti peculiari di produzione in ragione del LCA.

---

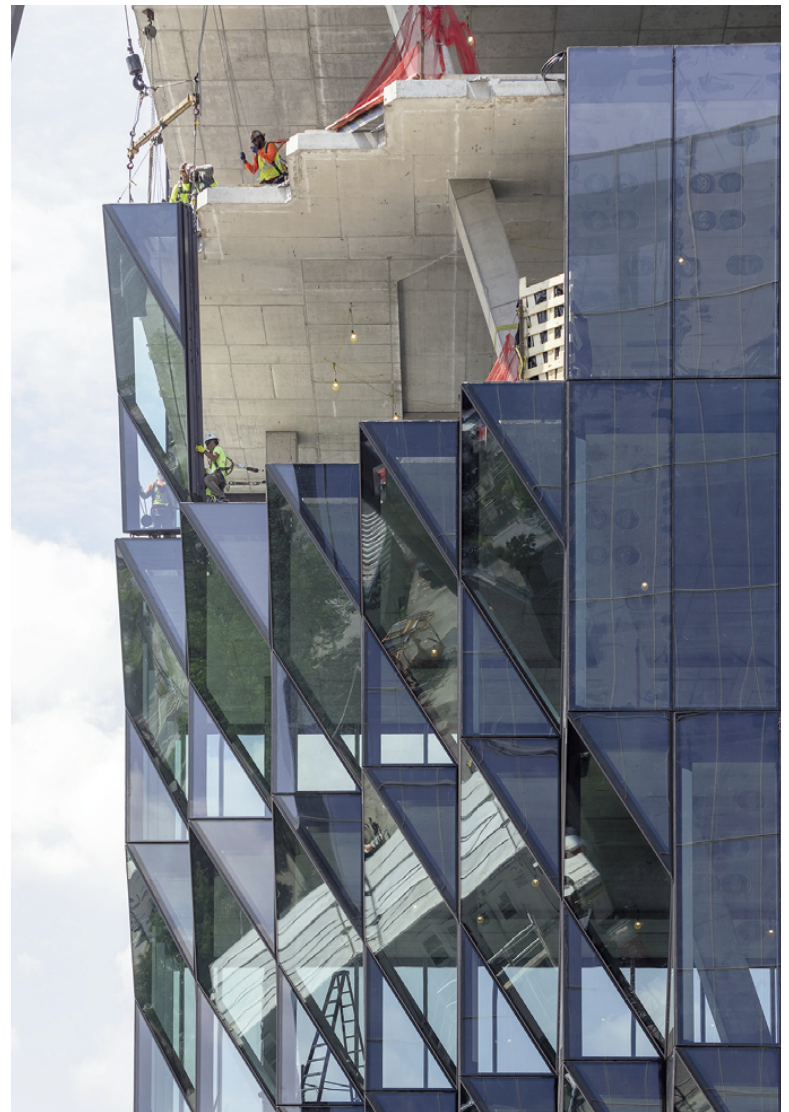
Dealing with «[...] our unprecedented, unexpected, and almost miraculous data opulence, [which]

often we do not know what to do with» (Carpo, 2017, p. 9) is part of the prevailing argument that is characterising the contemporary digital transition. The possibility to employ such data to foster socially, economically and, above all, environmentally sustainable development is now a key theme in the international debate. Indeed, digital represents a technical and cultural device, which can lead to the identification of new methodological approaches for the interpretation of building management-related data (Rigillo, Russo Ermolli and Galluccio, 2021) from a construction, regulatory, and environmental perspective.

The scope is that of the relevant transformations which are orienting the technological culture of design in recent years; a convergence of major themes that form the object of debate for the scientific community, in an inter-scalar manner and through articulate directions: climate change, the fourth industrial revolution, sustainability, and resilience. It is the vision of an implementation scenario, capable of considering and systemising the recent transformations that have occurred in design and production processes. Indeed, digitalism originates to deal with the «[...] epistemic uncertainty, the result of the impossibility of creating sufficiently detailed models of reality due to incomplete knowledge» (Campioli, 2017, p. 31). This challenge takes on the well-known uncertainties induced by the market (sector), the organization



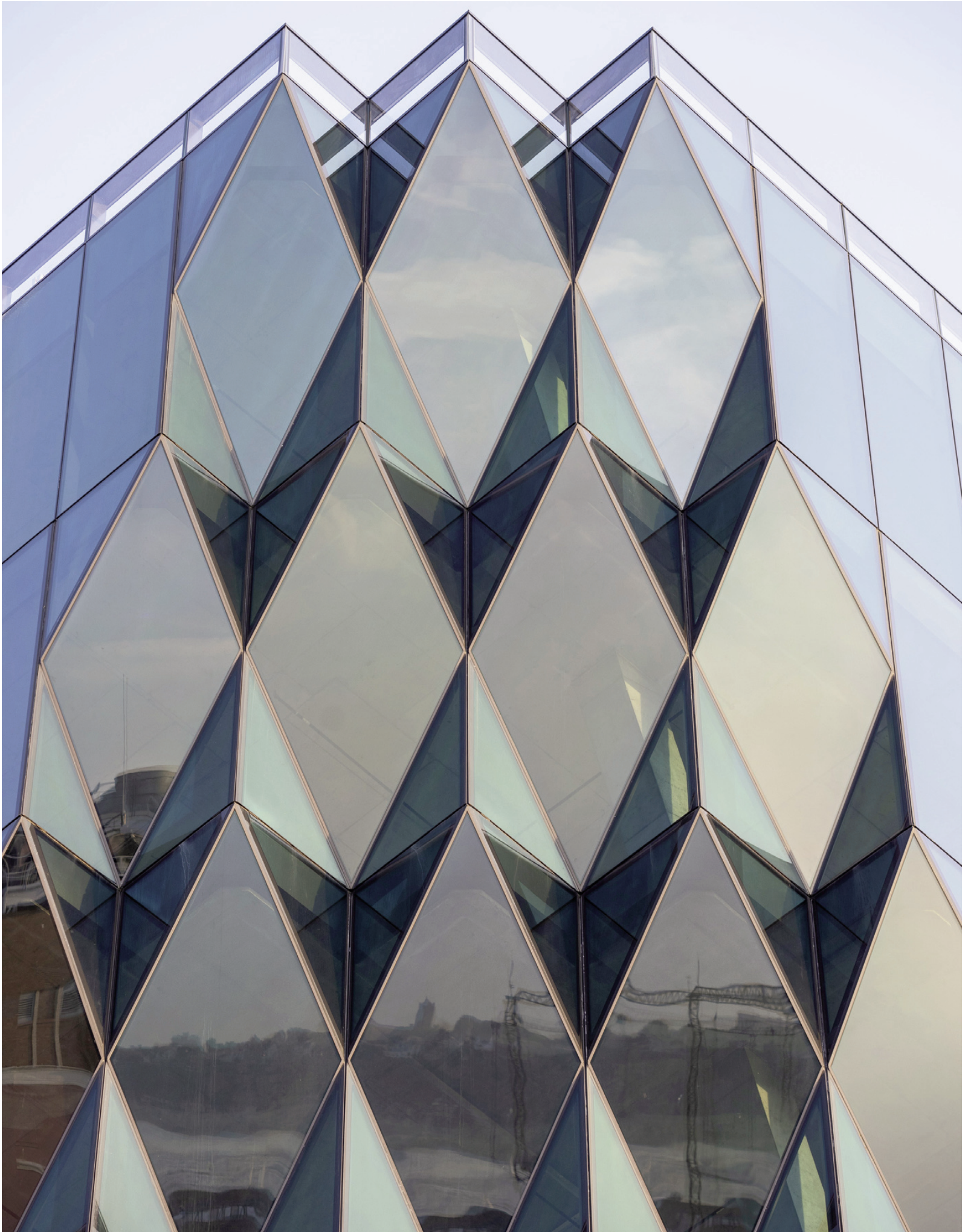
**Fig. 5, 6** | Installation of the module of a 3D spatial system (diamond-like façade) in insulated double glass (credits: Focchi SpA, 2018).



Next page

**Fig. 7** | Gang Architects Studio, 40 Tenth Avenue Solar Cave Tower (targeting LEED Gold), New York, NY (credit: T. Schenk, 2019).









**Fig. 8** | Installation of the first module of a structural bonding unitized system (credit: Focchi SpA, 2019).

**Fig. 9** | 100 Liverpool Street (targeting BREEAM Excellent) in London, designed by Hopkins Architects (credit: J. Hobhouse Photographer, 2021).

**Fig. 10** | Installation of a custom stick-system curtain wall with shaped internal aluminium mullion/fins (credit: Focchi SpA, 2022).

*Next page*

**Fig. 11** | Paddington Square in London, designed by Renzo Piano Building Workshop + Adamson Associates (credit: Focchi SpA, 2022).

and management of construction processes, the adequacy of the level of environmental sustainability of programmed transformations, up to the actual performance behaviour of the built environment, and the compliance with the expected life cycle (among others).

The current moment is not only a transition toward more updated operational approaches, which represent a convergence between material and immaterial innovations; it stands as a contextual reconsideration of the scope of scientific contributions within this framework. As will be further detailed below, the present developments seem to be ambivalently oriented both toward the ‘strong’ (hard) technologies of industrial production as well as toward guiding information (soft) processes<sup>1</sup>. This according to an interpretation of this theme based on a classification dating back to the early '70s, which somewhat aimed to increase recognizability of action scopes, cultural contributions, and operational repercussions for the industry of the new scientific disciplinary technology area, in a ‘clotting’ phase at that time.

Given that the debate on the prioritized placement of the interests of the scientific-technological community toward one of these two scopes – hard and soft – seems to be still open (Antonini, 2013), it is worth exploring new potential research areas, with careful regard both toward the need for new guiding tools and the specific requests of

the recipients of those design (and/or production) management actions.

In the current general scenario of digital transition (which cannot be separated from the demands of the climatic emergency), the purpose of this study is to investigate and propose an original approach based on the analysis of peculiar data and aimed at Life Cycle Thinking strategies: this goal is possible thanks to the new interoperable digital tools, geared to this new type of demands and able to provide support to predictive actions for the enhancement of sustainable and resilient solutions. Specifically, this approach is a framework that combines industrial IT tools for technological innovation, optimization, and advanced management of resources and production processes in the sector of curtain walls.

Moreover, the study aims to highlight feasible scenarios for the presented approach, made possible by the integration between data management software and platforms with environmental impact assessment models such as the Life Cycle Assessment (LCA), to support sustainable industrial product life cycle actions.

This introductory framing is followed by an analysis of the state of the art regarding the discussed themes, starting from the presentation of the scientific-productive context of reference and related LCA practices (industrial, and synergic with technical designers and specialists). The aim is to critically analyse the key aspects, critical is-

sues, and limitations to be overcome, in addition to defining the objectives that characterize the proposed innovative approach.

This is further followed by a brief description and critical comparison of specific data-driven approaches to environmental assessment, which are already being tested in the building sector, accompanied by the presentation of the models and tools through the practical-functional implications of data-driven LCA, which are believed to be useful in this and other potential contexts of the construction industry. A critical interpretation of their advantages and effects in the industry and the sector of Architectural Technology is proposed in conclusion.

#### **LCA know-how for custom curtain prefabricated modular curtain walls**

The scientific community involved in the perfecting of LCA, just like the industry, which is in the middle of the ecological transition through its R&D departments, is constantly seeking reliable innovative models to refine, speed up, check, and validate existing processes. In this context, the considerations which follow relate to the specific context of design, production, installation, and maintenance of high-tech custom prefabricated modules for curtain walls (Figg. 1-11).

This context – similarly to other cases of prefabrication of building systems and components – benefits from well-known environmental advan-



tages offered by off-site preparation and assembly in specialized and controlled manufacturing facilities. This characteristic suggests that systems realized within these processes are on average more sustainable than the equivalent non-prefabricated ones, depending on the distance between the production and the construction sites, the project requirements and timelines, as well as the circumstances pertaining to the market of construction materials and components (Pons, 2014). However, the quantification and verification of these advantages for complex and custom systems is still the subject of extensive research and debate, due to often excessive approximation and insufficient reference benchmarks.

The international policies for sustainable development and global warming mitigation are leading market operators to become more concerned with the environmental analysis of their products. Although legislation enforcing implementation is still currently limited, the European Union is increasingly adopting references to Life Cycle Thinking (LCT) and LCA in its communication and policies (Sala et alii, 2021). Despite showing pragmatic interest in incentivizing sustainable development, this represents a significant challenge for the industry of custom curtain walls, as each module, due to its unique and unrepeatable characteristics, requires punctual ex-novo analyses in absence of adequate Product Category Rules.

Stakeholders' request (among them, general contractors and clients) to verify sustainability tar-

gets, such as Science-Based Targets (SBTs) or other environmental assessment methods (like LEED and BREEAM), gives greater urgency to the industrial need for a digital strategy for automated and interoperative data analysis to evaluate buildings, in time with market dynamics and with the highest possible accuracy.

Considering these articulate premises, related to this specific productive sector, the digital transition indeed promises interesting practical evolutions for the management of the above-mentioned business criticalities. The conception of a new database framework could be useful to achieve these results, allowing, for each department with LCA data availability (quality departments, technical departments, etc.), real-time sharing with other users of those data (tender, project management, and design manager, etc.), thus achieving continuous updated availability at the moment of data consultation. The final goal of this step is the creation of optimal conditions to automatically relate the data between the currently used platforms, specifically between Enterprise Resource Planning (ERP)<sup>2</sup> and Product Lifecycle Management (PLM)<sup>3</sup> software tools, between Common Data Environment (CDE) platforms and other specialized business databases, when present. The finalization of this instrumental synergy, constituting a data-driven LCA, would provide several benefits:

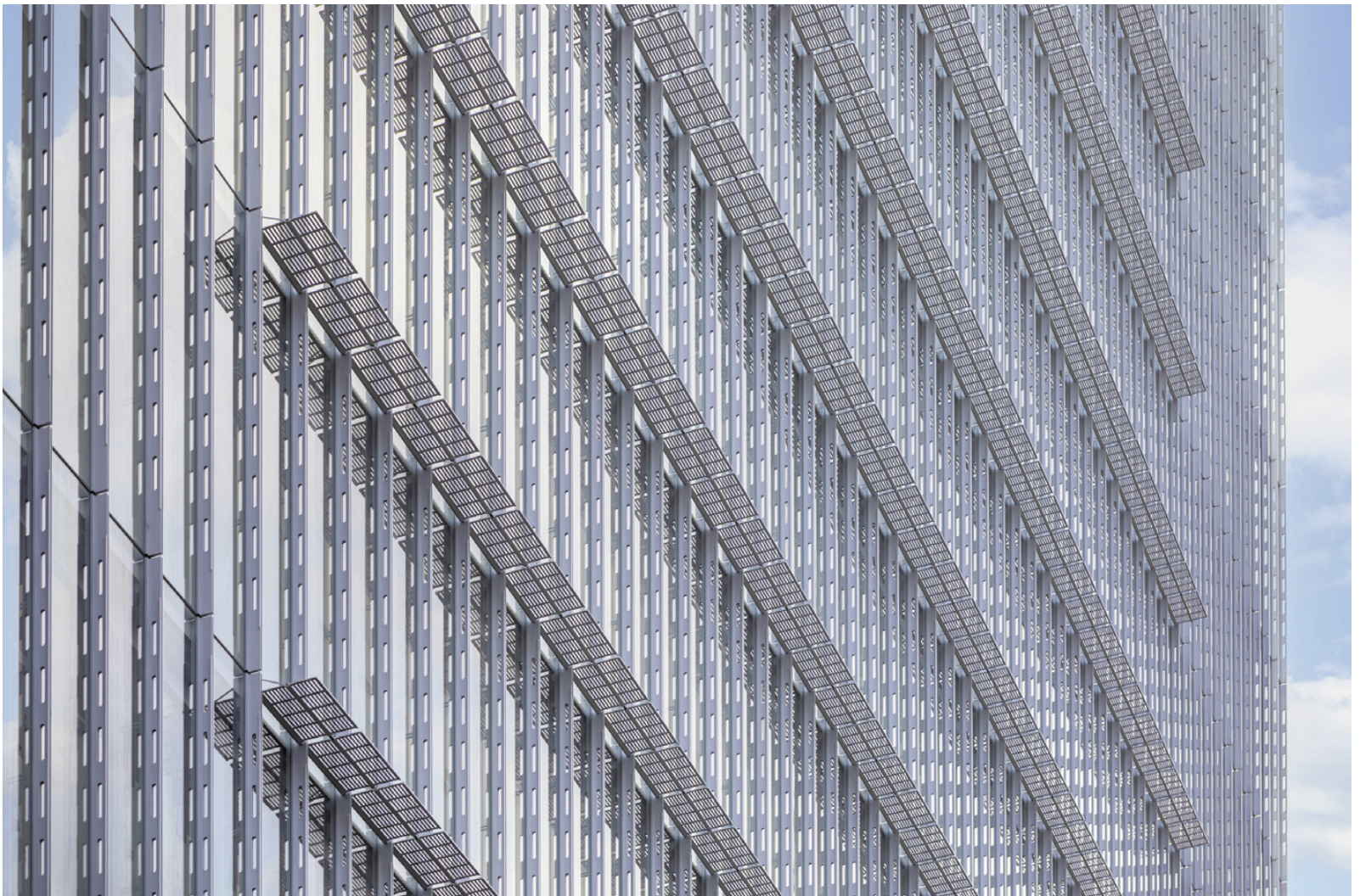
- the possibility to quantify the environmental impact of the product, through the methodology of

Life Cycle Impact Assessment (LCIA) as defined by the ISO EN 14040:2006 code; the simultaneous evaluation of other parameters required by the market, such as compliance with minimum percentages of recycled materials or the availability of Environmental Product Declarations (EPDs) for the constitutive elements of prefabricated modules; the importance of this step is due to the relevance of data functional for obtaining environmental certifications, with reference to ISO 14021:2015 and EN 15978:2011 codes and/or in compatibility with other international assessment systems;

- decision support to green strategic choices in design, engineering, production, logistic planning, supply chain evaluation, assembly, and finally disassembly, due to the possibility of preventively evaluating the impact of the various alternative operations for the achievement of the desired goal; considerations that would be otherwise difficult to assess through conventional LCA models;

- support for the ideation of new and virtuous strategies for the end life of curtain walls, to favour their circular transition and innovation (Viscuso, 2021).

The proposed operational framework would also allow for the re-definition of the main limits of the currently used LCA method, as noted by both the scientific community and industrial operators. These include, for example, the insufficient support for 'what if' scenarios, the currently scarce possibility of integration with BIM models, and the





LCA Software	Users	Studied Objects	Project data import (software)	Environmental data import (database)	EoF options	Standard compliance	All-in-one platform
Possibilities of stand alone software	Designers, facility managers, and environmental managers	Single Building, products, corporations, and infrastructures	BIM, Structural-BIM, DT, Building Performance Simulator, CDE	Software-included database, EPD platforms, online databases (e.g., Ecoinvent)	Compare design options, Optimize carbon, cost, circularity throughout the design process	EN and ISO standards depending on the geographic areas, Building Rating Systems (e.g., LEED)	
Possibilities of BIM plug-in software	Designers, technicians, and BIM managers	Single building, multiple buildings or a comparative analysis	BIM	Custom designed LCA database, Software-included database	ND	EN and ISO standards depending on the geographic areas	✓
Possibilities of the proposed custom data-driven LCA framework	All corporate offices that need the data	Company products, corporations	ERP, PLM, BIM, Structural-BIM, DT, Building Performance Simulator, CDE	EPD of suppliers, Factory DT and databases, EPD platforms, online databases (e.g., Ecoinvent)	Achieve a product passport, Compare design options, Optimize carbon, cost, circularity throughout the design process	Customizable by project manager and tender office, EN and ISO standards, Rating Label Systems	✓

Tab. 1 | Possibilities summary of the software used for LCA (credit: the Authors, 2022).

total lack of time-dependent data for End of Life (EoL) stage management (Fnais et alii, 2022). In fact, the use of the proposed framework would make it possible to assess various operational scenarios based on the environmental impact and EoL possibilities (at the design phase) and to constantly update the evaluation during job progress to verify requirements. This is performed by drawing from primary design data (from the BIM model, ERP and PLM software) and environmental data, obtained from the direct measurement of the processing impact, or from the EPD specifications of the employed materials.

The use of primary data for this analysis is a key factor for the accuracy and the expendability of LCA (Silva et alii, 2020); the integration with a BIM model, although still limited, provides total traceability of the modules for the design and conception of the EoL (Llatas, Soust-Verdaguer and Passer, 2022). Moreover, BIM models offer significant possibilities for integration with databases and are being increasingly studied in relation to the ideation of manual, semi-automatic, and – recently – even automatic data exchange solutions (Safari and AzariJafari, 2021).

In conclusion, the results of this analysis could be viewed by managers and technicians through dashboards, generated by Business Intelligence (BI) software or directly from the BIM model – which could stand as a Digital Twin of the façade if sufficiently developed (uploaded to a CDE platform) – in connection with the envisaged operational framework. This approach is also made more versatile – as a benefit for the final user – by its capacity to serve for the realization of dashboards that can perform the contextual evaluation of several construction options, integrating the Life Cycle Costing (LCC) analysis with the LCA (Zeng, Chini and Ries, 2020).

### Comparative analysis of some data-driven models tested in the building sector

In recent years, several software programs for the LCA of building products, including in the form of specific plug-ins for BIM platforms, have become progressively popular. However, these systems still widely suffer from the abovementioned limitations and the possibility to manage primary data with an all-in-one, interoperative tool. Table 1 reports a comparison between the possibilities offered by the main software, stand-alone tools, and BIM plug-ins on the market and the proposed model.

Recently, data-driven approaches and tools, more sophisticated than those on the market, are increasingly becoming the subject of multi-scalar scientific research in the building sector, aspiring to propose implementation models by leveraging the potential of already popular software. Among these are some interesting case studies and good practices, validated by research activities and field experimentations. The implementation models adopted in these experiences provide consistent and functional insights for the original model proposed here.

The first example is related to manual and automatized solutions for data sharing with BIM models. Concerning this typology of approach, it is certainly interesting to analyse the study on the configuration of a data model for automatic BIM-based evaluation by Jan Ružicka (et alii, 2022). This study is based on the analysis and verification of the possible workflows and includes the integration of BIM data for Complex Building Quality Assessment, as summarized in Figure 12.

Further examples of alternative models are represented by two cases of data-driven models for the assessment of the energy performance of existing buildings. In this specific area, the research conducted by Jacopo Famiglietti and a

research group at the Politecnico di Milano (Famiglietti et alii, 2022) is of interest. The study involved the development in Python of a data-driven LCIA tool at the urban scale for the evaluation of the energy performance of buildings, a scenario for which commercial assessment software is not currently optimized. Concerning the same aspect, following a systematic literature review, Venkatraj and Dixit (2022) highlighted potential solutions, future directions, and research opportunities for data-driven Life Cycle Energy Assessments.

Interestingly, in both of the aforementioned studies, the data workflow for these assessments is divided into three steps (Fig. 13): 1) data preparation and collection; 2) reception of LCI data as input parameters for the environmental analysis of energy systems, in absence of standardized methodologies; 3) building-scale evaluation, presentation of results, assessment, temporal representativeness and possible data import downstream of the process.

The comparison between these implementation workflows (the three-phase workflow for energy assessment and the integrated workflow with BIM models) with the proposed original model (conceived after studying the possibilities offered by the most widespread and established business software, and the needs of the production sector) has led to fine-tuning a data-driven approach for this specific sector.

The workflow proposed below for the use of primary data for the LCA of curtain wall modules features an innovation aimed at overcoming the limitations of previous models: an advancement which is possible due to the implementation of the data from the BIM model of the curtain wall and PLM and ERP business software for the analysis of design data, and the use of internal databases



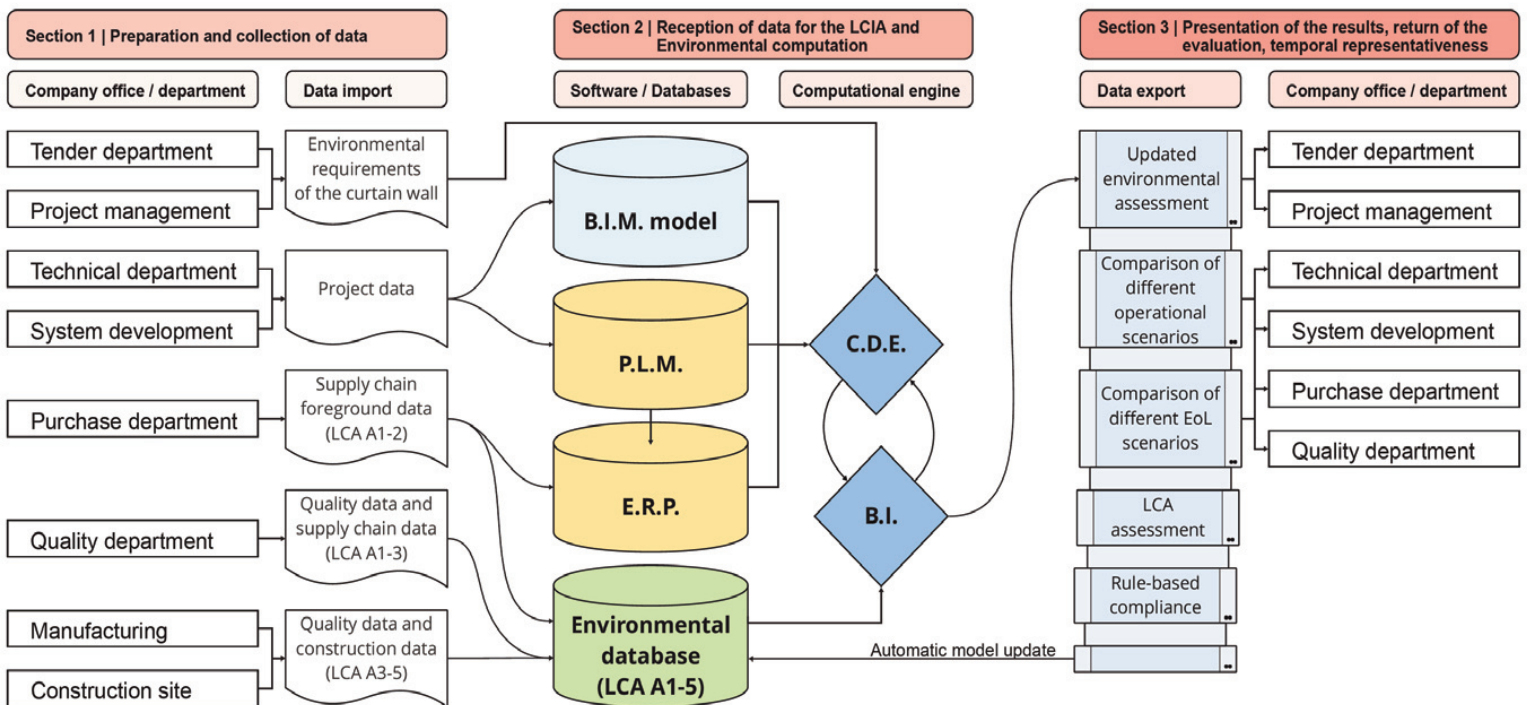
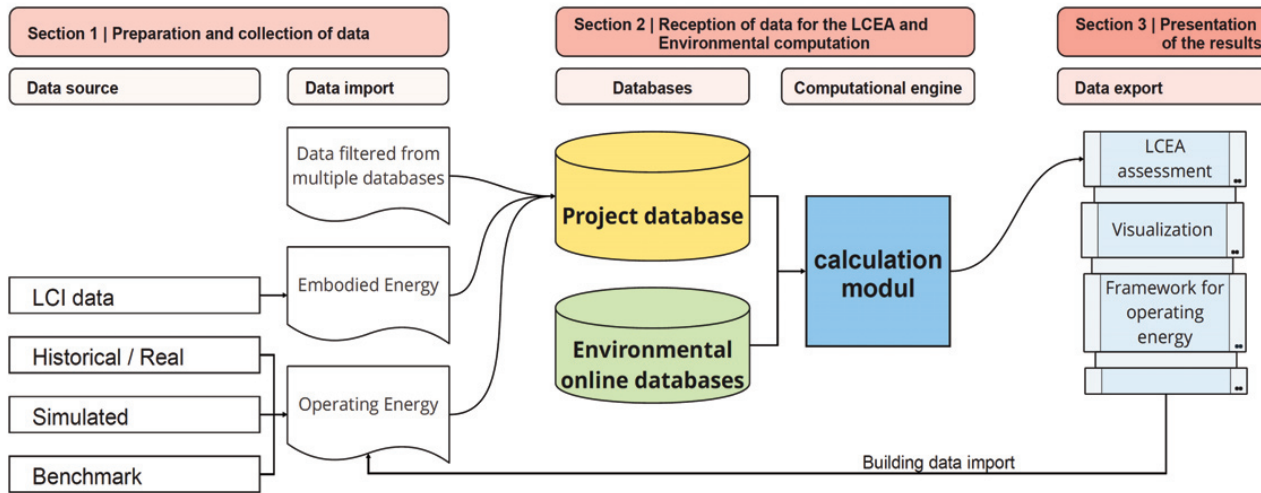
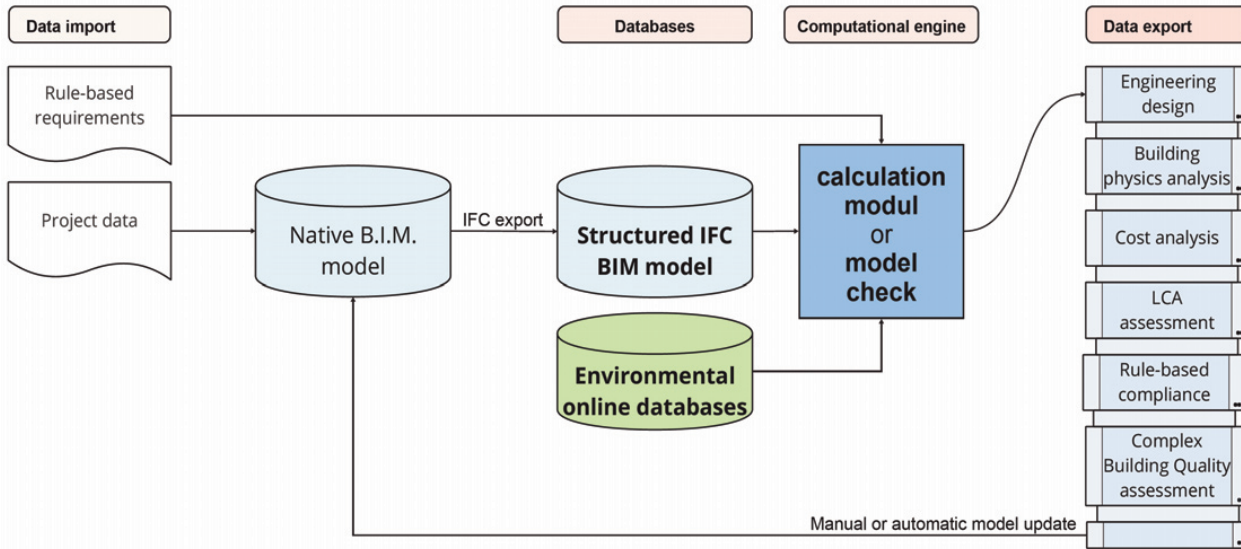


Fig. 12 | Highly structured IFC data model in a completely automatic workflow (source: Ružicka et alii, 2022).

Fig. 13 | Workflow for data-driven life cycle energy assessment of buildings, a combination of the models by Famiglietti et alii (2022), and Venkatraj and Dixit (2022).

Fig. 14 | Workflow for data-driven automatic LCA of custom modules for curtain walls, integrated with a BIM model and ERP and PLM software (credit: the Authors, 2022).



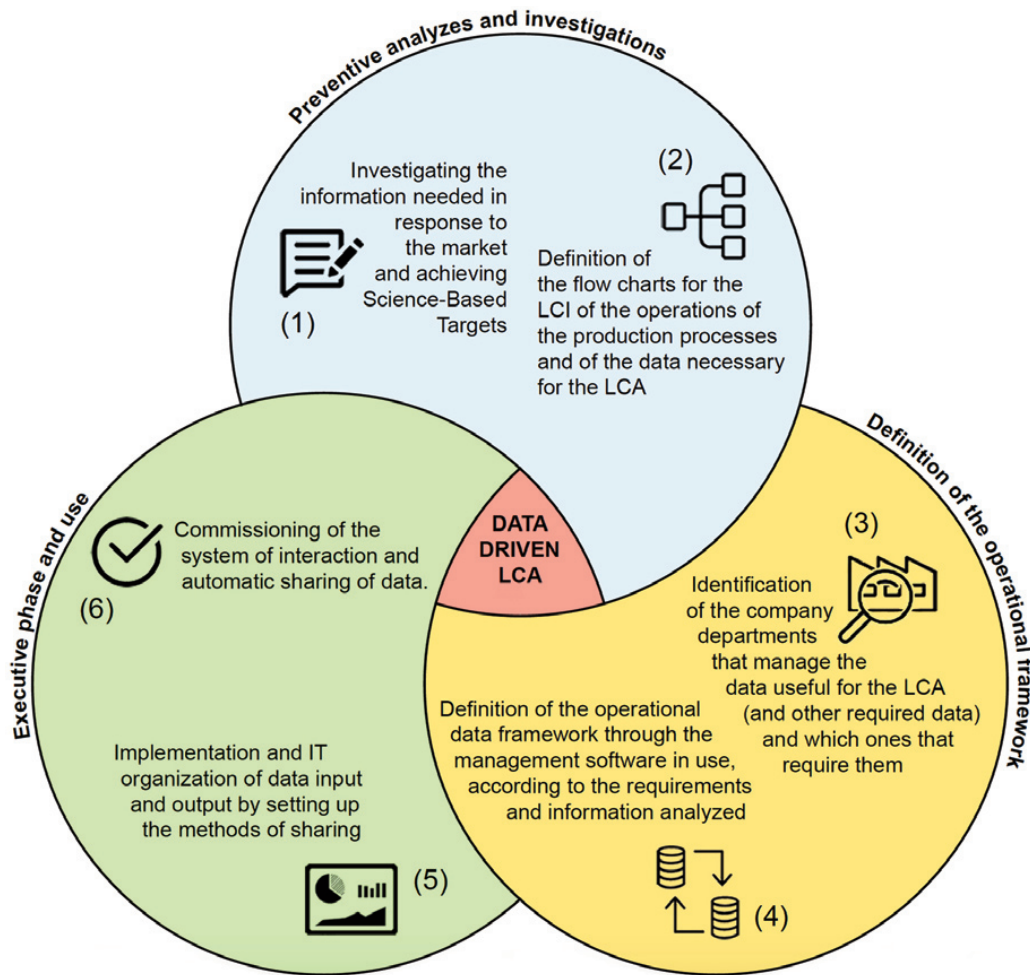


Fig. 15 | Consequential methods for the implementation of the proposed innovative model (credit: the Authors, 2022).

for environmental data, divided into three different implementation sections (Fig. 14). This organization of the information model allows for efficient assessment of the various design strategies, their real-time verification during the advancement of the productive process, and higher quality of the final product, in addition to favouring the evolution of LCA methodologies by overcoming the highlighted shortcomings.

**Possible operational scenarios, with benefits and criticalities, for the advanced management of process data** | At this point, it seems appropriate to discuss how these goals can be achieved by implementing the model illustrated by the companies producing custom prefabricated curtain walls.

The innovative model proposed in this paper is based on the serial application of the following methods (Fig. 15): 1) the investigation of the required data to fulfil the market need for the achievement of Science-Based Targets (SBTs); 2) the definition of the possible flowcharts for the Life Cycle Inventory (LCI) of the single operations comprising the examined productive processes, and of the environmental and design data required for LCA; 3) the breakdown and analysis of commissions, to identify the business departments that manage the data needed for LCA (and other required data), and the departments that need the data; 4) the definition of the operational data framework by using the information contained in the in-use management software, ac-

ording to the analysed requirements and information (as well as the evaluation of necessary integrations); 5) the implementation and IT organization of data input and output, establishing sharing modalities; 6) the implementation of the system for automatic data interaction and sharing.

Data definition and processability represent the core of these methods. For this reason, the first step is the collection of the analytical targets needed to analyse products according to the design goals and purpose (e.g., LCIA impact categories, requirements of the most widespread Rating Systems, and certifications requested by the clients). The hierarchization of these parameters contributes to the evaluation of short-term and long-term roadmaps. Subsequently, it is necessary to identify the items for which input data can be directly obtained from business software and business databases (primary data), or alternatively from literature and databases (secondary data), or how to define them based on estimations and average values (tertiary data).

The possibility of extracting data from ERP management platforms, in addition to BIM software, could solve a significant amount of the limits of LCA practices, caused by the complexity of digital curtain wall models. However, this requires the introduction of an implementation phase for the definition of the ideal functional units, to compare unit operations and building elements with the conversion parameters in their impact with reference to the LCIA (the data will have to be normalized according to the identified functional

units). The process shall be followed by the implementation phase, in which IT technicians can operationalize the designed framework by applying the previously described methods. The adopted model will therefore be verifiable and iterative, as a result of the improvement obtained through operator feedback.

The limits of this approach are mostly technical. These include the reasonable need to acquire BI or CDE software (if the company does not already employ such software), the essential interdisciplinary skills of the technicians or the team responsible for developing the implementation framework (concerning business organization, environmental impact assessment, and BIM models), and the need for IT programming of the data workflow. IT engineers must perform the latter by structuring and organizing data according to the theorized semantic model (organizing the data and the consequent relationships). The successful execution of this operation also requires complex cooperation between all these roles and all business departments. Instead, end-operators will not require significant additional IT skills, other than for consulting data in the typically user-friendly BI dashboards.

Finally, concerning the operational consequences of the developed and proposed model, it is worth describing its hypothesized implementation, in relation to its use for the environmental impact assessment of a custom module during the advancement of a typical commission, that is from the job assignment to its on-site installation. Following the tender phase, in the initial project management phases, the target environmental requirements are introduced in the framework through the BI software, serving as benchmarks for the whole duration of the process. In the system analysis phase, when the technology of the typical module is defined, it shall be possible to evaluate the different impact categories of various design alternatives, based on the primary environmental data directly collected from other business departments.

After the definition of technological specifications, all design data are automatically integrated into the evaluation framework, as the utilised software is included and no additional platforms to manually upload the data needed for LCA are provided. The same applies in the construction development phase, in which one or more technical departments provide the execution data for the whole curtain wall and the production plan. In this scenario, environmental data would derive from archives developed ad-hoc and shared with the operators of the various business departments who require them for different purposes.

Further advantages of the proposed method are represented by the possibility of the company to re-evaluate previous choices at any time, as a response to improvement requests on behalf of the stakeholders, and to assess in real-time the ecological characteristics of new products, systems, materials, or services during the R&D phase, for future virtuous patents. Moreover, this would extend the scope and accuracy of LCA to the manufacturing and utilization phases as well, thanks to the DT of the production facilities and the installation of curtain wall systems suitably equipped with sensors.



**Conclusions and future developments** | When talking about innovability<sup>®</sup> – a term that refers to innovation-oriented toward the maximum sustainability of management and production processes for the various stakeholders and, in particular, for the industry – it is impossible to avoid recalling the contents of a book by one of the finest scholars of innovation in architectural technology, that is Nicola Sinopoli (2002)'s *La Tecnologia Invisibile* (The Invisible Technology). Technological immateriality – specifically, the one introduced by the digital transition – often tends to escape immediate recognition, further enriching the list of those kinds of knowledge in architectural production which are less visible and measurable. This contribution delves into and systematizes a high number of criticalities and limits to be overcome, in a very specific area of building production,

thanks to the contribution of new digital technologies, to achieve a more responsible and environmentally friendly future for the next generations.

The hereby presented interdisciplinary methodological approach derives from a critical mediation between some of the most interesting theoretical-experimental proposals and consolidated know-how in business production, contributing to the sustainable innovation of products and processes.

This follows the desired trajectory of Italian technological culture toward hard systems and industry, rather than the «[...] too many 'soft' the discipline has dealt with in the last years», proposed by Sinopoli (cit. in Antonini, 2013, p. 46). Hopefully, following development and testing according to the proposed theoretical model, these database platforms could also become open-access for data sharing outside the specific manu-

facturing context to which they refer here, for the benefit of subsequent industry innovations in line with and functional to the trends of a smarter, more competitive manufacturing industry. In this perspective, industrial smartness requires the availability or the improvement of interoperable digital dialogue tools, fundamental for the increase of entrepreneurship and competitiveness, for the correct employment of resources and the awareness of national and international value, to achieve new predictive skills regarding peculiar production aspects based on LCA.

## Acknowledgements

The contribution is the result of the joint reflections of the authors, who declare no conflict of interest. The authors thank A. Pracucci (Innovation Manager in Focchi SpA), E. Tonelli (Environmental Manager), M. Cicognani (Senior Software Engineer and CAD-BIM Manager) and Focchi SpA for the kind concession of certain pictures.

## Notes

1) Ciribini (1971) borrows the technical and terminological distinctions of IT systems between hardware and software and distinguishes between hard (or strong) technology and soft (or weak) technology. The former is meant as the one focusing on executive operations, from technological transformations to real production processes, while the latter consists of all the information operations (or information processes) related to the guide, control, and management of the building process.

2) ERP software tools are typically defined as 'business management software'; they can be local-based or cloud-based, and allow an updated vision of the core business of a company, by integrating common databases and tracing data related to costs, raw materials, production capacity, orders, purchases, or payments.

3) PLM, which is part of the typical modules of an ERP, supports the life cycle planning and optimization of industrial products from the start of the process, through the design, production, and planning of material resources.

4) The term innovability<sup>®</sup> is a trademark of Enel SpA. All rights reserved to Enel SpA.

## References

Antonini, E. (2013), "La memoria del future – Tavola rotonda su Giuseppe Ciribini | Memory of the future – Round table discussion about Giuseppe Ciribini", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 6, pp. 43-47. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-13454 [Accessed 07 September 2022].

Campioli, A. (2017), "Il carattere della cultura tecnologica e la responsabilità del progetto | The character of technological culture and the responsibility of design", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, pp. 27-32. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-21129 [Accessed 07 September 2022].

Carmo, M. (2017), *The Second Digital Turn – Design Beyond Intelligence*, The MIT Press, Cambridge (MA). [Online] Available at: mitpress.mit.edu/books/second-digital-turn [Accessed 07 September 2022].

Ciribini, G. (1971), "Una nuova tecnologia per l'ambiente costruito", in Ente Autonomo Fiere di Bologna and Associazione Italiana Prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, *Un pianeta da abitare – Requisiti e prestazioni per l'ambiente costruito*, Ente Fiere di Bologna, Bologna, IT. [Online] Available at: ibs.it/pianeta-da-abitare-requisiti-prestazioni-libri-vintage-vari/e/2560038137232 [Accessed 07 September 2022].

Famiglietti, J., Amini Toosi, H., Dénarié, A. and Motta, M. (2022), "Developing a new data-driven LCA tool at the urban scale – The case of the energy performance of the building sector", in *Energy Conversion and Management*, vol. 256, 115389, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115389 [Accessed 07 September 2022].

Fnais, A., Rezgui, Y., Petri, I., Beach, T., Yeung, J., Ghotghi, A. and Kubicki, S. (2022), "The application of life cycle assessment in buildings – Challenges, and directions for future research", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 27, pp. 627-654. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-022-02058-5 [Accessed 07 September 2022].

Llatas, C., Soust-Verdaguer, B. and Passer, A. (2020), "Implementing life cycle sustainability assessment during design stages in building information modelling – From systematic literature review to a methodological approach", in *Building and Environment*, vol. 182, 107164, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107164 [Accessed 07 September 2022].

Pons, O. (2014), "18 – Assessing the sustainability of prefabricated buildings", in Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J. and de Magalhães, A. (eds), *Eco-efficient Construction and Building Materials – Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*, Woodhead Publishing, Philadelphia (PA), pp. 434-456. [Online] Available at: doi.org/10.1533/9780857097729.3.434 [Accessed 07 September 2022].

Rigillo, M., Russo Ermolli, S. and Galluccio, G. (2021), "Processi digitali di conformità normativa – La rigenerazione urbana della ex-Corradini a Napoli | Digital Rule-Based compliance processes – The urban regeneration of ex-Corradini, Naples (IT)", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 120-131. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10102021 [Accessed 07 September 2022].

Růžička, J., Veselka, J., Rudovský, Z., Vitásek, S. and Hájek, P. (2022), "BIM and Automation in Complex Building Assessment", in *Sustainability*, vol. 14, issue 4, 2237, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14042237 [Accessed 07 September 2022].

Safari, K. and AzariJafari, H. (2021), "Challenges and

opportunities for integrating BIM and LCA – Methodological choices and framework development", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 67, 102728, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2021.102728 [Accessed 07 September 2022].

Sala, S., Amadei, A. M., Beylot, A. and Ardenne, F. (2021), "The evolution of life cycle assessment in European policies over three decades", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, pp. 2295-2314. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-021-01893-2 [Accessed 07 September 2022].

Silva, F. B., Reis, D. C., Mack-Vergara, Y. L., Pessoto, L., Feng, H., Pacca, S. A., Lasvaux, S., Habert, G. and John, V. M. (2020), "Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products – Focus on foreground processes", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, issue 6, pp. 980-997. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-020-01762-4 [Accessed 07 September 2022].

Sinopoli, N. (2002), *La tecnologia invisibile – Il processo di produzione dell'architettura e le sue regole*, FrancoAngeli, Milano.

Venkataj, V. and Dixit, M. K. (2022), "Challenges in implementing data-driven approaches for building life cycle energy assessment – A review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 160, 112327, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2022.112327 [Accessed 07 September 2022].

Viscuso, S. (2021), "Coding the circularity – Programmare il disassemblaggio e il riutilizzo dei componenti edili | Coding the circularity – Design for the disassembly and reuse of building components", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 22, pp. 271-278. [Online] Available at: doi.org/10.36253/teche-10620 [Accessed 07 September 2022].

Zeng, R., Chini, A. and Ries, R. (2020), "Innovative design for sustainability – Integrating embodied impacts and costs during the early design phase", in *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 28, issue 3. [Online] Available at: doi.org/10.1108/ECAM-09-2019-0491 [Accessed 07 September 2022].