POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

L’approccio parametrico basato su LCA per l’eco-progettazione di involucri edilizi.

Original
L’approccio parametrico basato su LCA per l’eco-progettazione di involucri edilizi / Thiebat, Francesca; Tomalini, Andrea; Giovanardi, Matteo. - ELETTRONICO. - (2022), pp. 249-255. (INNOVAZIONE E CIRCOLARITÀ Il contributo del Life Cycle Thinking nel Green Deal per la neutralità climatica Reggio Calabria (IT) 22-24 settembre 2021).

Availability:
This version is available at: 11583/2970303 since: 2023-04-16T16:56:38Z

Publisher:
Associazione Rete Italiana LCA

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

17 December 2025

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI REGGIO CALABRIA Mediterranea

ASSOCIAZIONE RETE ITALIANA LCA

ATTI

X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA
XV Convegno della Rete Italiana LCA

INNOVAZIONE E CIRCOLARITÀ

Il contributo del *Life Cycle Thinking* nel Green Deal per la neutralità climatica

22-24 settembre 2021

Università Mediterranea di Reggio Calabria
Via dell'Università, 25
Reggio Calabria

ATTI

X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA
XV Convegno della Rete Italiana LCA

INNOVAZIONE E CIRCOLARITÀ

Il contributo del *Life Cycle Thinking* nel Green Deal per la neutralità climatica

22-24 settembre 2021

Università Mediterranea di Reggio Calabria
Via dell'Università, 25
Reggio Calabria

© 2022 Associazione Rete Italiana LCA

.

Pubblicato da: Associazione Rete Italiana LCA
Data di pubblicazione: 2022
Paese di pubblicazione: Italia
Lingua: Italiano
Formato dell'e-book: PDF

ISBN: 9791221004564

Comitato Scientifico del Convegno

Michela Aresta	Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Reattività Chimica e la Catalisi (CIRCC)
Maurizio Cellura	Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
Laura Cutaia	ENEA, Roma
Monica Lavagna	Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC)
Alessandro Manzardo	Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Centro Studi Qualità Ambiente (CESQA)
Paolo Masoni	Ecoinnovazione srl
Marina Mistretta	Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento Patrimonio Architettura Urbanistica (PAU)
Bruno Notarnicola	Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Dipartimento Jonico in "Sistemi Giuridici ed Economici del Mediterraneo: società, ambiente, culture"
Andrea Raggi	Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara, Dipartimento di Economia
Lucia Rigamonti	Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA)
Serena Righi	Università di Bologna, Campus di Ravenna, Dipartimento di Fisica e Astronomia (DIFA) e Centro Interdipartimentale di Ricerca per le Scienze Ambientali (CIRSA)
Roberta Salomone	Università degli Studi di Messina, Dipartimento di Economia
Antonio Scipioni	Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Centro Studi Qualità Ambiente (CESQA)

L'approccio parametrico basato su LCA per l'eco-progettazione di involucri edilizi

Francesca Thiebat[1*], Andrea Tomalini[1], Matteo Giovanardi[1]

Abstract: Progettare il sistema di facciata di un edificio è un'operazione complessa e multidisciplinare. Questa complessità deriva dall'eterogeneità delle prestazioni che deve assicurare il sistema di involucro durante l'intera vita utile. Alla luce delle sfide imposte dalla transizione verso la neutralità climatica, l'analisi Life Cycle Assessment (LCA) entra sempre più frequentemente nella prassi progettuale richiedendo strumenti specifici per valutare i principali indicatori di impatto ambientale. Sebbene negli ultimi anni vi sia stato un aumento nel numero di software in grado di eseguire analisi LCA, oggi è ancora difficile trovare una reale interoperabilità con gli strumenti di progettazione architettonica. Partendo da tali premesse il contributo propone un framework di lavoro sviluppato in ambiente Visual Programming Language (VPL) in grado di esprimere le prestazioni ambientali del progetto in real time e assicurare un'elevata flessibilità nel progettare edifici capaci di rispondere alle sfide imposte dal cambiamento climatico.

Introduzione

I cambiamenti in atto a livello mondiale stanno contribuendo ormai in modo significativo al cambio di paradigma da modelli basati sulla linearità verso modelli complessi, che si compongono di più funzioni, in cui sistemi e sotto-sistemi sono regolati da processi di circolarità (Sala et. Al, 2021; EU Green Deal). La progettazione architettonica, quale attività intrinsecamente complessa, si sta configurando sempre di più come luogo privilegiato in cui convergono esperienze e connessioni interdisciplinari.

Se l'obiettivo principale delle politiche europee e internazionali è una drastica riduzione dell'impatto ambientale provocato dal mondo delle costruzioni, l'analisi di tutte le fasi presenti nel ciclo di vita dell'edificio e dei suoi componenti diviene una prerogativa essenziale.

Il tema del risparmio energetico è inevitabilmente legato a quello delle emissioni prodotte in ambiente. Ad esempio nel corso degli anni, per aumentare l'efficienza energetica di un edificio, sono state utilizzate strategie passive che hanno richiesto un aumento dello spessore del sistema di involucro. Un caso emblematico è quello dei sistemi di facciata a doppia pelle che, sebbene possano garantire una significativa riduzione delle dispersioni per involucro, richiedano tuttavia il doppio dell'energia e dei materiali per essere prodotti, aumentando a loro volta le emissioni di gas serra nell'ambiente.

A questo proposito, l'analisi LCA può essere un valido strumento per comprendere le criticità delle attuali attività legate al mondo delle facciate e definire linee guida che possano portare a miglioramenti ambientali. Generalmente queste analisi vengono effettuate dai produttori per

[1] Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design
* Email: francesca.thiebat@polito.it

definire l'impatto dei loro prodotti e individuare soluzioni di ottimizzazione nel processo di industrializzazione. Tuttavia, sono ancora un'applicazione molto limitata tra i progettisti, spesso utilizzate ex-post per testimoniare la qualità del progetto architettonico, diventando uno strumento di verifica e non di progettazione. La tendenza attuale, testimoniata dalle ultime linee di indirizzo europee e dall'aumento dei protocolli di certificazioni ambientali, impone la necessità di estendere la valutazione ambientale all'intera vita utile dell'edificio e dei suoi componenti. Questo approccio assume un valore ancora più significativo se riferito al sistema di involucro dove la vita utile è generalmente inferiore al resto dei componenti dell'edificio (Brand, 1994).

1. LCA e progettazione dell'involucro edilizio

L'estensione dell'analisi ambientale all'intero ciclo di vita, rappresentando oggi un nodo centrale e una sfida imminente nel futuro del mondo delle costruzioni, ha introdotto nuovo parametri nella valutazione del progetto edilizio. Embodied Energy (EE) e Embodied Carbon (EC) diventano parametri progettuali essenziali nella progettazione di edifici che mirino ad un alto livello di sostenibilità. Diverse ricerche (Giordano et al., 2017; Trabucco et al., 2012), infatti, hanno dimostrato come la quota relativa l'EE di un edificio possa superare, in alcuni casi specifici, il consumo di 40 anni dovuto alle attività di Operating Energy (OE) (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e ausiliari). Nell'ambito delle stesse ricerche è possibile notare come il sistema di involucro sia tra i sottosistemi dell'edificio, dopo il sistema strutturale, il più influente nella domanda di energia primaria e nelle conseguenti emissioni di gas serra prodotte in ambiente per le attività di produzione e fine vita. Si stima, nelle poche ricerche effettuate su casi studio reali (Naboni, 2017), che l'EE relativa alla sola facciata possa equivalere, in un contesto europeo, tra i 10 e i 15 anni di OE spesa per garantire le corrette condizioni di comfort durante la fase di utilizzo. Aspetti strutturali, energetici, di comfort, economici e architettonici devono convergere in un'unica soluzione che possa offrire le migliori prestazioni possibili.

L'articolo illustra come strumenti per il calcolo dell'impatto ambientale (LCA-based) possano essere integrati nel processo di progettazione. Nella ricerca presentata le discipline della Rappresentazione dell'Architettura e della Tecnologia dell'Architettura, si pongono l'obiettivo di permettere una visualizzazione in real-time del progetto attraverso algoritmi di Visual Programming Language per il calcolo e la valutazione LCA.

2. Strumenti integrati per la progettazione sostenibile

Se da una parte, le sfide del progetto diventano sempre più numerose, dall'altra, l'aumento del grado di complessità richiesto ha favorito lo sviluppo di metodi e strumenti per la gestione del progetto in una visione che tenga conto dell'intero ciclo di vita dell'edificio (Thiebat, 2019). Gli strumenti informatici integrando strumenti interdisciplinari, mirano a rispondere alle complesse sfide della contemporaneità. Il Building Information Modelling (BIM), ad esempio, ha lo scopo di facilitare l'interoperabilità tra le applicazioni software utilizzate durante tutte le fasi del ciclo di vita dei lavori di costruzione, inclusi briefing, progettazione, documentazione, costruzione, funzionamento e manutenzione e demolizione, promuovendo la collaborazione digitale tra gli attori nel processo di costruzione attraverso uno scambio di informazioni accurato.

2.1. Gestione parametrica del progetto

Da diversi anni il settore della Rappresentazione ha acquisito nuovi strumenti di espressione, oltre ai metodi classici (proiezioni ortogonali, assonometria, prospettiva) si sono aggiunti metodi digitali di rappresentazioni matematica (NURBS) e numerica (mesh) (Baglioni, 2012; Bartoli et al., 2016). In parallelo sono stati sviluppati strumenti specifici, ormai consolidati, per il supporto e la gestione del progetto di architettura come i sistemi di BIM (Calvano et al., 2020). Le metodologie BIM uniscono la natura informatica (flessibile, parametrizzabile, modellabile e collaborativa) con la creazione di modelli che, attraverso un insieme di parametri manipolabili, gestiscono richieste di progetto apparentemente divergenti. In questa situazione, si conferma che la geometria guida il disegno e ne definisce gli attributi fisici, mentre l'information modeling ne favorisce utilizzazioni più allargate convergendo informazioni di discipline diverse in un unico spazio (Lo Turco, 2015). Per venire incontro ad una complessità sempre crescente, i software di modellazione digitale e informativa si stanno dotando di ambienti di programmazione visuale (VPL) (Boshernitsan, 2004). A differenza dei sistemi di disegno tradizionale, che si basano su un processo additivo in cui la complessità è ottenuta mediante le aggiunte e la sovrapposizione di segni indipendenti che non possono gestire relazioni associative, questi ambienti servono per la codifica di algoritmi.

Un algoritmo è una procedura utilizzata per restituire una soluzione a una domanda attraverso un elenco finito di istruzioni base e ben definite. In tal senso, un algoritmo può essere considerato qualcosa di simile ad una ricetta (Tedeschi, 2014). Si può dire che l'attenzione del progettista non è rivolta al solo risultato formale, ma anche alle procedure algoritmiche, mettendo in evidenza nuove modalità creative. Questa capacità di costruire relazioni efficienti tra dati e informazioni collegate ad un modello architettonico viene definita Disegno Digitale Esplicito (DDE) (Calvano, 2019). Il DDE basato su strumenti VPL diviene particolarmente efficace, in quanto l'algoritmo lascia una sua traccia sulla viewport di programmazione (flowchart) e si interrompe una volta raggiunto il risultato ottimale. Nella traccia è possibile identificare localmente diverse diramazioni modificabili nell'ottica dell'efficienza.

Ma il vero potenziale di questi sistemi è la possibilità di connettere e analizzare, in modo interoperabile, dati provenienti da discipline diverse. In quest'ottica di innovazione e di ricerca per la gestione dei dati di diverse fonti sono interessanti gli sforzi per integrare strumenti di *data mining* all'interno di questi sistemi VPL. Da sottolineare come la programmazione ad oggetti sblocchi prospettive differenti, ad esempio per il management di architetture già costruite (La Russa et al., 2020), anche per utenti non esperti allo scripting tradizionale ma che con approccio parametrico vuole testare su dati differenti la bontà del proprio progetto.

2.2. VPL, BIM e LCA

La diffusione del BIM, insieme alla ricerca del settore delle costruzioni verso i temi dell'architettura a basse emissioni di CO2 e della riduzione del consumo di risorse, hanno contribuito nell'ultima decade allo sviluppo di strumenti semplificati che calcolano gli impatti ambientali e altri aspetti della sostenibilità a partire dai dati contenuti nel modello architettonico, agevolando in questo modo la valutazione e rendendo più comprensibili i risultati. Ciò permette di tener conto dell'impatto ambientale e di altri fattori in relazione alla disponibilità crescente dei dati lungo tutto il processo progettuale. Numerose ricerche si sono concentrate sul miglioramento dell'interoperabilità tra BIM e strumenti LCA (Moon et al. 2011; Cemesova et al. 2015). Tuttavia, l'utilizzo

di software che affrontano tematiche specifiche aumenta la complessità e il trasferimento degli errori, riducendone l'adozione da parte dei progettisti. Emerge quindi la necessità di definire un framework metodologico per l'integrazione di strumenti di valutazione ambientale e metodologie per consentire ai progettisti di confrontare facilmente diverse alternative già nella fase iniziale di progettazione (Nwodo et al. 2017).

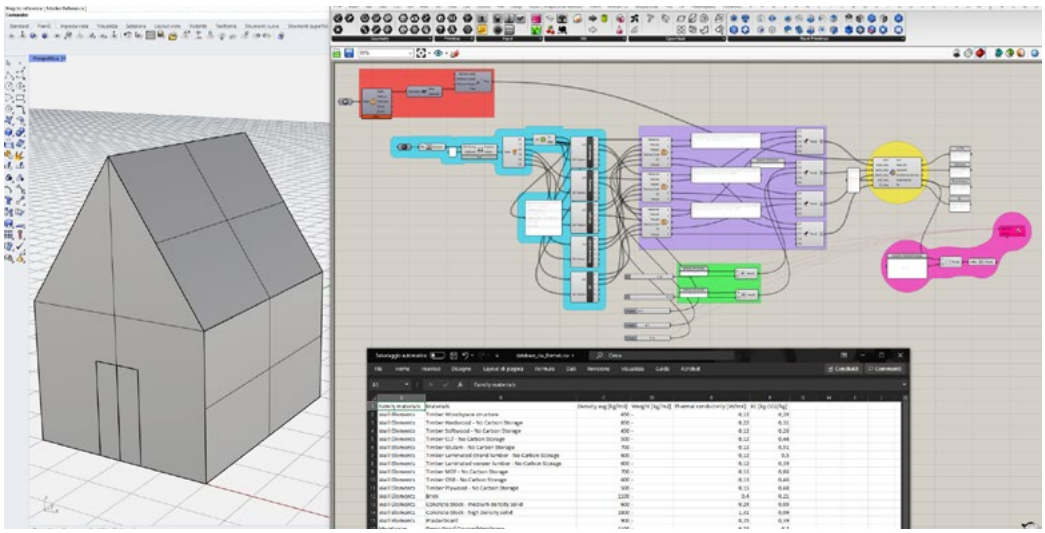
Negli ultimi anni si sono stabilite diverse partnership tra case produttrici di software finalizzate all'integrazione di tools per il calcolo degli impatti ambientali con strumenti di modellazione 3D. Tali software si configurano in genere come interfacce di scambio dati e contengono al loro interno banche dati e metodi di calcolo sviluppati e in continua evoluzione da enti di ricerca pubblici e privati. I programmi più sofisticati e completi vengono in genere utilizzati da utenti esperti alla fine del processo di progettazione, o addirittura in fase di costruzione, quando le scelte progettuali sono definite e le quantità dei materiali stabilite rendendo quasi impossibile un confronto tra soluzioni alternative (Dalla Valle et al., 2016). Tali programmi permettono di accedere direttamente ai database e ai metodi di calcolo garantendo la tracciabilità, la trasparenza e la personalizzazione dei dati.

Nelle fasi iniziali di un progetto si possono invece impiegare software caratterizzati da un'interfaccia semplificata, che fanno riferimento a banche dati e metodi di valutazione riconosciuti dalla comunità scientifica, ma in cui spesso non è possibile modificare la configurazione. La validità dei risultati è quindi compromessa da fattori legati alla localizzazione dei dati e alla poca trasparenza. Tuttavia, questi ultimi, utilizzabili anche da utenti non esperti di LCA, possono essere molto utili per confrontare soluzioni costruttive diverse nella fase preliminare del progetto.

3. Framework metodologico

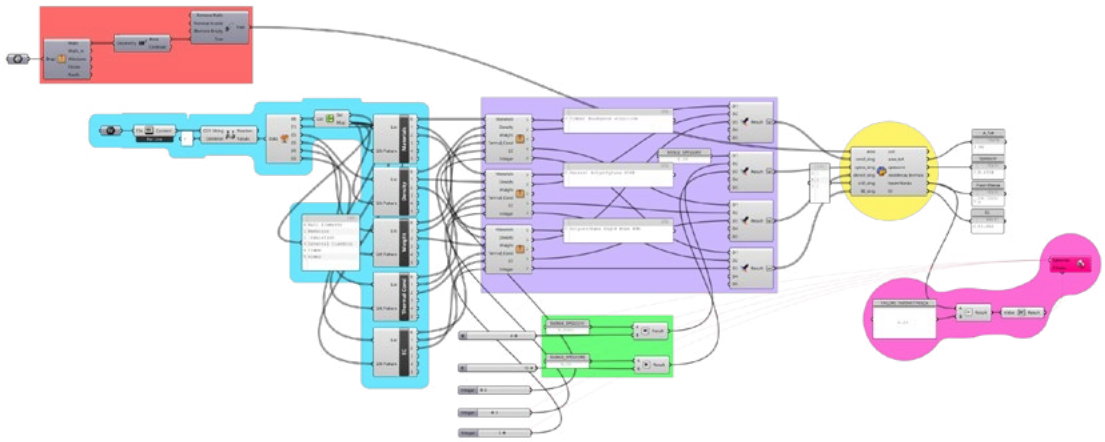
In un workflow di progettazione tradizionale, sin dalle prime fasi preliminari, il progettista operando sulla geometria, sui materiali e sui sistemi impiantistici influisce indirettamente sulle prestazioni ambientali dell'edificio. Di solito la geometria viene descritta in ambiente 3d e proprio su questo modello si prendono le prime decisioni progettuali. La metodologia proposta si inserisce in questo punto della fase di design per guidare il progettista verso scelte più consapevoli ed informate rispetto agli impatti ambientali di ogni soluzione.

Figura 1: Esempio di interfaccia di lavoro per il progettista con, da destra, Rhinoceros Grasshopper e Foglio di calcolo in formato csv.



La geometria può essere direttamente disegnata e descritta attraverso algoritmi oppure essere predefinita come elementi discreti (linee, superfici) in Rhinoceros (modellatore NURBS) e caricata in un secondo momento in Grasshopper (ambiente VPL), dove ogni elemento identifica un componente edilizio differente. A questo punto in ambiente VPL è facile importare banche dati ambientali generiche (es. EcoInvent) o specifiche di progetto (EPD di prodotti) per arricchire di informazioni questi componenti attraverso fogli di calcolo (Fig. 1).

Figura 2: Algoritmo per l'analisi LCA sviluppato con Grasshopper



Nel framework proposto, mostrato in Figura 2, si identificano pochi componenti. Leggendo l'algoritmo da sinistra è possibile identificare una prima parte dove la geometria concettuale del manufatto viene scomposta automaticamente per identificare le componenti principali (muri perimetrali, muri interni, pavimenti, aperture e copertura), si sottolinea come questa scomposizione automatica debba essere vagliata dal progettista in quanto ad oggi il sistema non ha consapevolezza di che tipologia di geometria stia gestendo.

La seconda parte dell'algoritmo legge il foglio di calcolo (csv file). In base alla struttura del file, il progettista deve essere in grado di selezionare solo le colonne/righe a lui necessarie. In questo caso, il file csv contiene le caratteristiche fisiche e ambientali di alcuni prodotti/materiali da costruzione per l'involucro. Nelle colonne si trovano valori che identificano il nome, la densità, il peso, il valore di conducibilità termica e l'indicatore di embodied carbon (EC) di ciascun materiale, mentre le righe suddividono i materiali a seconda della loro funzione all'interno della stratigrafia (ad es. rivestimento, isolamento, ecc.).

Nella parte centrale dell'algoritmo si costruisce la stratigrafia del componente edilizio. Partendo dalla segmentazione delle colonne del file csv, che in questo caso è avvenuta in base alla tipologia di materiale, si seleziona l'insieme dei materiali da analizzare, questi vengono sommati in una possibile stratigrafia, dall'esterno verso l'interno.

La penultima parte, rappresentata da un singolo componente, restituisce, in base ai dati di input che gli sono stati forniti, valori complessivi di trasmittanza, EC e spessore totale della stratigrafia raggiunto.

L'ultimo componente è un ottimizzatore a singolo fattore. Tramite un ulteriore componente VPL (Galapagos), l'algoritmo proverà più combinazioni per massimizzare o minimizzare un determinato valore. Nel caso proposto cercherà quali combinazioni di materiale restituiscono il valore di trasmittanza verificato da normativa, una volta concluso il calcolo l'operatore potrà scegliere tra quelle soluzioni che a parità di valore di trasmittanza hanno un valore di EC minore.

Il vantaggio di questo approccio è riconoscibile nel fatto che più il database usato in input si arricchisce di informazioni legate ad ogni singolo strato, più la scelta sulla linea del pareto front si arricchirà di soluzioni confrontabili. Inoltre è da sottolineare come le scelte effettuate possano essere visualizzabili non solo in forma tabellare, a volta di difficile lettura per i non addetti ai lavori, ma possano tradursi in *real-time* in geometrie che restituite attraverso un linguaggio di proiezioni e viste diventeranno di immediata lettura.

4. Conclusioni

Il contributo ha messo in evidenza la complessità legata all'integrazione di modelli di valutazione LCA e modelli architettonici basati su metodologia BIM e VPL nel campo della progettazione. Oggi l'integrazione di tali strumenti non permette una visione in *real-time* delle ottimizzazioni che possono mettere in relazione la geometria con gli aspetti di valutazione (es. aspetti ambientali ed energetici). Attraverso il framework metodologico proposto nell'articolo, gli autori tentano di dare una risposta a tale criticità grazie alla messa a punto di un algoritmo dedicato ed implementabile capace di adattarsi alle diverse esigenze che ogni progetto richiede. Sebbene il tool sia ancora in fase di sviluppo, l'approccio parametrico basato in ambiente VPL, Grasshopper, consente di evidenziarne le potenzialità in ottica di Life Cycle Thinking legate all'aggiornamento continuo e in forma grafica dei risultati sulla base delle correzioni architettoniche.

Come evidenziato da altre ricerche e sperimentazioni nel campo dell'ottimizzazione attraverso sistemi parametrici (Basic, et al. 2019, D'Amico, 2015; Fusero et al., 2017; Roudsari et al., 2013), il framework proposto può essere integrato con ulteriori dataset di natura e discipline differenti (strutturale, energetico, economico, ecc...).

5. Bibliografia

Azari-N, R.; Kim, Y.W. (2012). Comparative assessment of life cycle impacts of curtain wall mullions. *Building and Environment*, 48, 135-145

Baglioni, L. (2012). *Nuove applicazioni della geometria descrittiva: le PQ mesh nell'architettura contemporanea*, in "*DisgnareCon*", vol. 5, n. 9.

Bartoli, G.; Biagini, C.; Pellis, D. (2016). *Free Form Architecture Engineering: An Applied Methodology for Double Curved Surfaces*, in Amoruso G. (a cura di), *Handbook of Research on Visual Computing and Emerging Geometrical Design Tools*, IGI Global, Hershey, pp. 771-789

Basic, S., Hollberg, A., Galimshina, A., & Habert, G. (2019, August). A design integrated parametric tool for real-time Life Cycle Assessment–Bombyx project. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 323, No. 1, p. 012112). IOP Publishing.

Boshernitsan, M., & Downes, M. S. (2004). *Visual programming languages: A survey*. Computer Science Division, University of California.

Calvano, M, Lo Turco, M.; Giovannini, E.C.; Tomalini, A. (2020). Il disegno narrato. Esplicitare algoritmi per insegnare la modellazione digitale. 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. ISBN: 9788835104490

Calvano, M. (2019). Disegno digitale esplicito. *Rappresentazioni responsive dell'architettura e della città. Aracne, Roma*.

Cemesova, A. Hopfe, C.J. Mcleod, R.S. (2015) PassivBIM: Enhancing interoperability between BIM and low energy design software. Automation in Construction, 57 (2015), pp. 17-32

Dalla Valle, A., Lavagna, M., Campioli A., (2016) "Strumenti LCA di supporto al settore delle costruzioni" in X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA 2016 Life Cycle Thinking, sostenibilità ed economia circolare Ravenna 23 - 24 giugno 2016

D'Amico, B., Kermani, A., Zhang, H., Pugnale, A., Colabella, S., & Pone, S. (2015, August). Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure. In *Structures* (Vol. 3, pp. 227-235). Elsevier.

Fusero, P., Massimiano, L., Tedeschi, A., & Lepidi, S. (2013). Parametric urbanism: A new frontier for smart cities. *Planum the journal of urbanism*, *2*(27), 1-13.

Giordano, R.; Giovanardi, M.; Guglielmo, G.; Micono, C. (2017). Embodied energy and operational energy evaluation in tall buildings according to different typologies of façade. *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 224-233. ISSN 1876-6102

La Russa, F. M., & Santagati, C. (2020). HISTORICAL SENTIENT–BUILDING INFORMATION MODEL: A DIGITAL TWIN FOR THE MANAGEMENT OF MUSEUM COLLECTIONS IN HISTORICAL ARCHITECTURES. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *43*, 755-762.

Lo Turco, M. (2015). Il BIM e la rappresentazione infografica del processo edilizio. Dieci anni di ricerche e applicazioni. Aracne, Roma.

Moon, H., Kim, H., Kamat, V. R., and Kang, L. (2013). "BIM-based construction scheduling method using optimization theory for reducing activity overlaps." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(3),

Naboni, E. (2017). The use of facade mockups in LCA based architectural design. International High- Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16), iHBE 2016. *Procedia Engineering*, 180, 759-766

Nwodo, M. N. Anumba, C. J., Asadi S., (2017), "BIM-based Life Cycle Assessment and Costing of Buildings: Current Trends and Opportunities", ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering

Roudsari, M. S., Pak, M., & Smith, A. (2013, August). Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In *Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug* (pp. 3128-3135).

Sala, S., Amadei, A.M., Beylot, A. *et al.* (2021). The evolution of life cycle assessment in European policies over three decades. *Int J Life Cycle Assess*.

Tedeschi, A. (2014). *AAD, Algorithms-aided design: parametric strategies using Grasshopper*. Le penseur publisher.

Thiebat, F. (2019), Life cycle design, Springer, Cham, Switzerland

Trabucco D. (2012) Life Cycle Energy Analysis of Tall Buildings: Design principles, *CTBUH Research Paper*, pp. 447-453