

## ARTICLE INFO

Received	29 March 2024
Revised	29 April 2024
Accepted	09 May 2024
Published	30 June 2024

## STRATEGIE LIFE CYCLE THINKING PER LA REALIZZAZIONE DI SCUOLE NZEB

## LIFE CYCLE THINKING STRATEGIES FOR CONSTRUCTING NZEB SCHOOLS

Elisabetta Palumbo, Rosa Romano, Paola Gallo

### ABSTRACT

Entro il 2050 anche l'Italia dovrà raggiungere la neutralità climatica. Rispetto agli attuali standard quasi il 75% del patrimonio edilizio esistente è energeticamente inefficiente e poiché il 17% è costituito da edifici scolastici intervenire su questa tipologia edilizia è fondamentale per sviluppare percorsi virtuosi indirizzati al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione per il 2030. Le chiusure verticali sono tra le unità tecnologiche che contribuiscono maggiormente al raggiungimento di migliori performance energetico-ambientali dell'edificio, ma allo stesso tempo hanno un certo peso in termini di carbonio ed energia incorporata; inoltre gli studi LCA che trattano l'involucro verticale dell'edificio si concentrano principalmente sugli impatti 'dalla culla alla tomba', trascurando scenari di fine vita basati sul riciclo dei materiali provenienti da demolizione selettiva. Il presente studio esplora gli effetti che l'adozione di strategie progettuali circolari hanno come impatti ambientali LCA-based in una Scuola nZEB.

By 2050, Italy, too, will have to achieve climate neutrality. Compared to current standards, almost 75% of the existing building stock is energy inefficient, and since 17% consists of school buildings, intervening in this type of building is essential to develop virtuous paths to achieve 2030 decarbonisation targets. Vertical envelopes are among the technological units that contribute the most to achieving better energy-environmental performance of the building, but at the same time, they have a certain weight in terms of carbon and embodied energy; moreover, LCA studies dealing with the vertical building envelope mainly focus on 'cradle-to-grave' impacts, neglecting end-of-life scenarios based on the recycling of selective demolition materials. This study explores the effects of adopting circular design strategies as LCA-based environmental impacts in an nZEB school.

### KEYWORDS

edificio a energia quasi zero, edifici scolastici, valutazione del ciclo vita, progettazione sostenibile, fine vita

nearly zero energy building, school buildings, life cycle assessment, sustainable design, end-of-life

**Elisabetta Palumbo**, Architect and PhD, is a Researcher at the Department of Engineering and Applied Sciences (DISA) of the University of Bergamo (Italy). She carries out research activities mainly in the field of tools and methods for assessing sustainability in the three dimensions (environmental, economic and social) of materials, products, buildings and neighbourhoods. Mob. +39 333/526.15.72 | E-mail: elisabetta.palumbo@unibg.it

**Rosa Romano**, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture, University of Florence (Italy). Member of the Scientific Committee of the ABITA Centre and Independent Expert for the European Community, she is involved in several research on bio-ecological architecture and innovative environmental technologies, focusing on managing complex building processes. E-mail: rosa.romano@unifi.it

**Paola Gallo**, Associate Professor at the Department of Architecture (DIDA) of the University of Florence (Italy), is the Scientific Secretary of the Interuniversity Research Centre ABITA and the Scientific Director of the 'Laboratorio per l'Abitare Mediterraneo'. She conducts technological and environmental design research activities. E-mail: paola.gallo@unifi.it



Un'Europa a emissioni zero entro il 2050 è una difficile e articolata sfida che ciascun Paese membro deve affrontare con impegno. Il settore delle costruzioni è uno degli ambiti in cui occorre intensificare gli sforzi, in quanto è responsabile del 37% delle emissioni di CO<sub>2</sub> legate all'energia e ai processi e del 21% delle emissioni globali di gas serra (UNEP, 2023). Stime che potrebbero aumentare in modo significativo nel 2035 (Falana, Osei-Kyei and Tam, 2024), soprattutto alla luce dei recenti dati sulla crescita del consumo globale di energia e delle emissioni globali di gas serra nell'anno 2022, pari all'1% in più rispetto al 2021 (IEA, 2023). Il settore edile ha compiuto numerosi sforzi negli anni per mettere a punto strategie e metodi di valutazione per mitigare gli impatti ambientali (Abdelaal and Guo, 2022); anche a livello legislativo sono diverse le proposte e le politiche globali promosse dalla Commissione Europea mirate alla decarbonizzazione delle diverse sfere dell'ambito delle costruzioni, e in particolare al contenimento dei consumi e delle emissioni nette in uso degli edifici.

In questa cornice la recente revisione della Direttiva EPBD Energy Performance of Building Directive (European Parliament and Council of the European Union, 2024), nota come Direttiva Case Green approvata nel marzo 2024 dal Parlamento Europeo, ridefinisce le modalità per misurare i consumi energetici e le relative emissioni di gas climalteranti degli edifici, estendendo l'analisi dalla sola Operational Energy e associati impatti (Operational Carbon) alla Whole Life-Cycle Performance, che implica il calcolo della Embodied Energy / Carbon. Se la definizione della Operational Energy è alquanto evidente, la identificazione della Embodied Energy / Carbon richiede una valutazione più articolata in quanto concerne la somma delle energie e degli impatti prodotti in tutte le fasi del ciclo di vita della costruzione secondo la logica 'dalla culla alla tomba', e quindi include gli impatti dovuti a produzione dei singoli materiali, trasporto in cantiere, oltre che operazioni di ripristino e manutenzione nella vita utile dell'opera, per arrivare alla sua fine vita (Sposito and Scalisi, 2020).

In effetti negli ultimi anni diversi studi e ricerche hanno evidenziato come, talora, raggiungere elevati standard energetici significhi aumentare significativamente l'energia incorporata (Palumbo and Politi, 2018; Rondinel-Oviedo and Keena, 2022), proponendo l'adozione di soluzioni tecnologiche che risultano spesso inadatte dal punto di vista della Life Cycle Energy (LCE; Birgisdottir et alii, 2017). Molti studiosi (Moazzen, Karagüler and Ashrafian, 2021) infatti concordano sulla necessità di adottare strategie progettuali seguendo un approccio Life Cycle Thinking (LCT), che contempli quindi una valutazione sulla globalità delle azioni connesse a tutta la vita utile dell'edificio, al fine di comprenderne il comportamento energetico e di conseguenza individuare le soluzioni a minor impatto ambientale.

La questione del rapporto tra Operational Energy ed Embodied Energy / Carbon diventa altresì centrale nel caso degli interventi di rigenerazione con demolizione e ricostruzione di nuovi edifici che, in linea con le strategie del Renovation Wave for Europe (European Commission, 2020a) e con le numerose e recenti altre iniziative comunitarie sulla transizione ecologica ed energetica a livello internazionale – dall'European Green Deal (Euro-

pean Commission, 2019) al Next Generation Europe Economic Development (European Commission, 2020b) – costituiscono uno dei temi maggiormente rilevanti della revisionata Direttiva EPB4 (Fetting, 2020).

È interessante notare che attualmente in quasi tutti gli Stati europei sono in atto Programmi di finanziamento che prevedono di rinnovare il patrimonio edilizio pubblico esistente attraverso azioni di 'deep renovation' o di demolizione e ricostruzione con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici e l'impatto ambientale globale. Tra gli edifici rispetto ai quali si evince l'urgenza di intervenire con azioni congiunte dal punto di vista energetico e strutturale gli edifici scolastici risultano essere quelli che presentano maggiori criticità e che, se riqualificati o edificati ex novo, possono contribuire a diffondere nuove soluzioni e processi costruttivi ispirati dai principi del Circular Design. Non a caso nell'ultimo decennio in Europa sono stati numerosi i progetti finanziati che hanno scelto le Scuole come casi studio e laboratori di sperimentazione, coinvolgendo più contesti geografici, tra cui l'Italia.

La ricerca School of the Future – Towards Zero Emission with High Performance Indoor Environment<sup>1</sup> è stata finanziata agli inizi del 2011 nell'ambito del VII Programma Quadro con l'obiettivo di sperimentare soluzioni tecnologiche di involucro e di impianto utilizzabili per ridurre i consumi energetici di tre tipologie di edifici scolastici in quattro differenti Paesi (Danimarca, Germania, Italia e Norvegia), migliorandone la vivibilità e i costi nel ciclo di vita (Erhorn-Kluttig and Erhorn, 2014). Le soluzioni di retrofit energetico vagliate dal progetto, consultabili in un database dedicato, mostrano interessanti spunti di riflessione sulla effettiva efficacia tecnico-economica degli interventi nei diversi contesti internazionali.

Un anno più tardi il progetto VERYSchool<sup>2</sup>, una delle prime ricerche europee sviluppate nell'ambito del Programma Europeo per la Competitività e l'Innovazione (CIP-ICT-PSP-2011), ha sperimentato uno strumento innovativo, chiamato VSNavigator, per la gestione efficiente e l'ottimizzazione dell'energia negli edifici scolastici. Si tratta di un web-tool user friendly che – integrando due strumenti consolidati di misurazione e controllo energetico (il Building Energy Management System e una modellazione energetica) a loro volta collegati a dispositivi interattivi (smart meter e smart control) per la regolazione impiantistica HVAC e di illuminazione – è in grado di restituire possibili azioni di ottimizzazione e stima dei benefici (Galata et alii, 2015).

Più recente è la Renew School<sup>3</sup>, finalizzata a sviluppare strategie efficaci per l'adeguamento di edifici scolastici agli standard nZEB attraverso interventi sia di riqualificazione energetica degli edifici esistenti sia di nuova costruzione, con ricadute positive anche sul comfort degli utenti: il progetto propone soluzioni tecnologiche innovative per involucri a basso impatto ambientale. Sebbene siano rilevanti per le innovazioni proposte che adottano un approccio integrato con soluzioni e strumenti intelligenti di controllo e gestione dei flussi energetici e di comfort, agendo tanto su aspetti spaziali quanto su quelli più tecnologici, tutti e tre i casi presentano il limite di trascurare gli effetti legati agli impatti 'incarnati' dei materiali e dei componenti adottati nel progetto.

Parallelamente, l'Italia, coinvolta come partner in molti di questi progetti internazionali, ha avviato una serie di azioni congiunte<sup>4</sup> – promosse dal Ministero dell'Istruzione e del Merito e dall'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE) – finalizzate a rinnovare il patrimonio edilizio scolastico nazionale costruito prevalentemente tra il 1945 e il 1980. Tale patrimonio edilizio versa in uno stato di grave degrado e pericolosità strutturale ed è inadeguato dal punto di vista spaziale alle innovazioni didattiche che nel frattempo sono state promulgate attraverso le Linee Guida<sup>5</sup> del 2013 con l'obiettivo di superare i modelli obsoleti della normativa corrente che risale al 1975.

Tale urgenza ha portato all'emanazione di una serie di concorsi banditi negli anni e all'erogazione di linee di finanziamento specifiche, come ad esempio i mutui BEI, che hanno permesso alle Amministrazioni pubbliche di avviare azioni di rigenerazione (spesso riconducibili a interventi di demolizione e ricostruzione) finalizzate alla realizzazione di nuovi edifici che, in linea con la vigente normativa Criteri Ambientali Minimi (CAM; MITE, 2022), sono stati progettati sia per raggiungere i target nZEB sia per risultare sostenibili dal punto di vista ambientale rispetto a un approccio Life Cycle Thinking (LCT) a supporto di una valutazione più ampia ed estesa spesso poco indagata.

Come nelle esperienze europee ancora una volta è significativo notare che, anche a livello nazionale, sia negli interventi di nuova costruzione che in quelli di riqualificazione le innovazioni maggiori si sono avute nella sperimentazione alla scala dell'involucro architettonico, chiamato a rendere manifesta, attraverso la sua trasformazione, l'ambizione ecologica del progetto.

Lo scenario fin qui delineato restituisce un quadro progettuale e normativo dell'ultimo decennio che si caratterizza prevalentemente per l'analisi della dimensione operativa del manufatto edilizio, attenendosi meno alle fasi rilevanti del ciclo di vita, ad esempio quelle connesse alla realizzazione dei prodotti e alle tecnologie impiegate. Inoltre l'assenza di un'armonizzazione degli strumenti di calcolo LCA, oltre alla limitata diffusione di specifiche banche dati geograficamente contestualizzate, ha frenato la messa a punto di una valutazione più olistica e con confini più estesi; al superamento di tale limite potrebbe tuttavia dare un forte impulso l'ultima revisione della Direttiva EPBD (European Parliament and Council of the European Union, 2024).

Partendo da queste riflessioni il contributo si focalizza sull'approccio metodologico sviluppato per validare il progetto di demolizione e ricostruzione della Scuola 'Cino da Pistoia' nel Comune di Pistoia, ideato per rispondere ai più moderni modelli spaziali ispirati dai concetti di didattica innovativa, per garantire consumi energetici pari allo zero (attraverso scelte di involucro e di impianto adeguate) e per raggiungere l'obiettivo di ottimizzare gli impatti globali (incorporati e operativi) del suo intero ciclo di vita, attraverso l'adozione di strategie progettuali circolari (Romano et alii, 2023).

Nello specifico la metodologia integrata proposta si struttura in tre fasi principali: 1) verifica e valutazione del comportamento energetico dell'edificio rispetto al target nZEB del comfort indoor, con un focus su diversi sistemi di involucro verticale; 2) LCA semplificata della soluzione di in-

volucro con la miglior performance energetica, rispetto alle fasi di produzione e degli scenari di fine vita, adottando robuste fonti di dati quali le Environmental Product Declaration (EPD); 3) Interpretazione dei risultati LCA rispetto alle prestazioni energetiche.

L'obiettivo è dimostrare come la rigenerazione degli edifici scolastici esistenti, mediante interventi di demolizione e ricostruzione, possa essere condotta integrando soluzioni di involucro finalizzate a migliorare le prestazioni energetiche e il comfort indoor e outdoor con valutazioni sull'impatto ambientale in tutte le fasi di vita dell'edificio, andando oltre la semplice valutazione della fase di utilizzo, ovvero partendo dall'analisi degli effetti generati dalla produzione dei materiali e dei componenti edilizi utilizzati nei sistemi di facciata, fino alla possibilità di minimizzarli, applicando principi di circolarità come il riuso e il riutilizzo post consumer.

**Il progetto della Scuola 'Cino da Pistoia' |** La Scuola secondaria di primo grado 'Cino da Pistoia' (PT) fa parte di un Complesso scolastico esistente che comprende la Scuola primaria 'G. Galilei', una palestra e una mensa scolastica e nel quale si trovava un edificio obsoleto, ormai abbandona-

nato e bisognoso di interventi urgenti a causa della presenza di amianto e di gravi carenze strutturali che lo rendevano non adeguato alle più recenti normative inerenti la sicurezza sismica, l'accessibilità e l'efficienza energetica. A causa di queste evidenti criticità, e dopo una fase di audit dettagliato, è stata presa la decisione di procedere con la demolizione e ricostruzione dell'edificio in questione con l'obiettivo di sviluppare un progetto in linea con quanto previsto dai CAM in materia di risparmio energetico e impatto ambientale.

In particolare lo sviluppo del progetto architettonico ha previsto l'adozione di un approccio di tipo esigenziale prestazionale, incentrato sulla caratterizzazione del quadro dei requisiti e dei vincoli di contesto, di carattere programmatico, tecnico e ambientale a cui rispondere attraverso adeguate scelte compositive, funzionali e tecnologiche. La quantificazione dimensionale dell'intervento, tenuto conto degli indici urbanistico-edilizi previsti dallo strumento di pianificazione vigente, ha interpretato due esigenze principali: da una parte quella di accogliere 6 cicli didattici della Scuola media esistente (18 classi in totale), dall'altra quella di disporre di aule polifunzionali, facilmente adattabili e modificabili nel tempo per rispondere al-

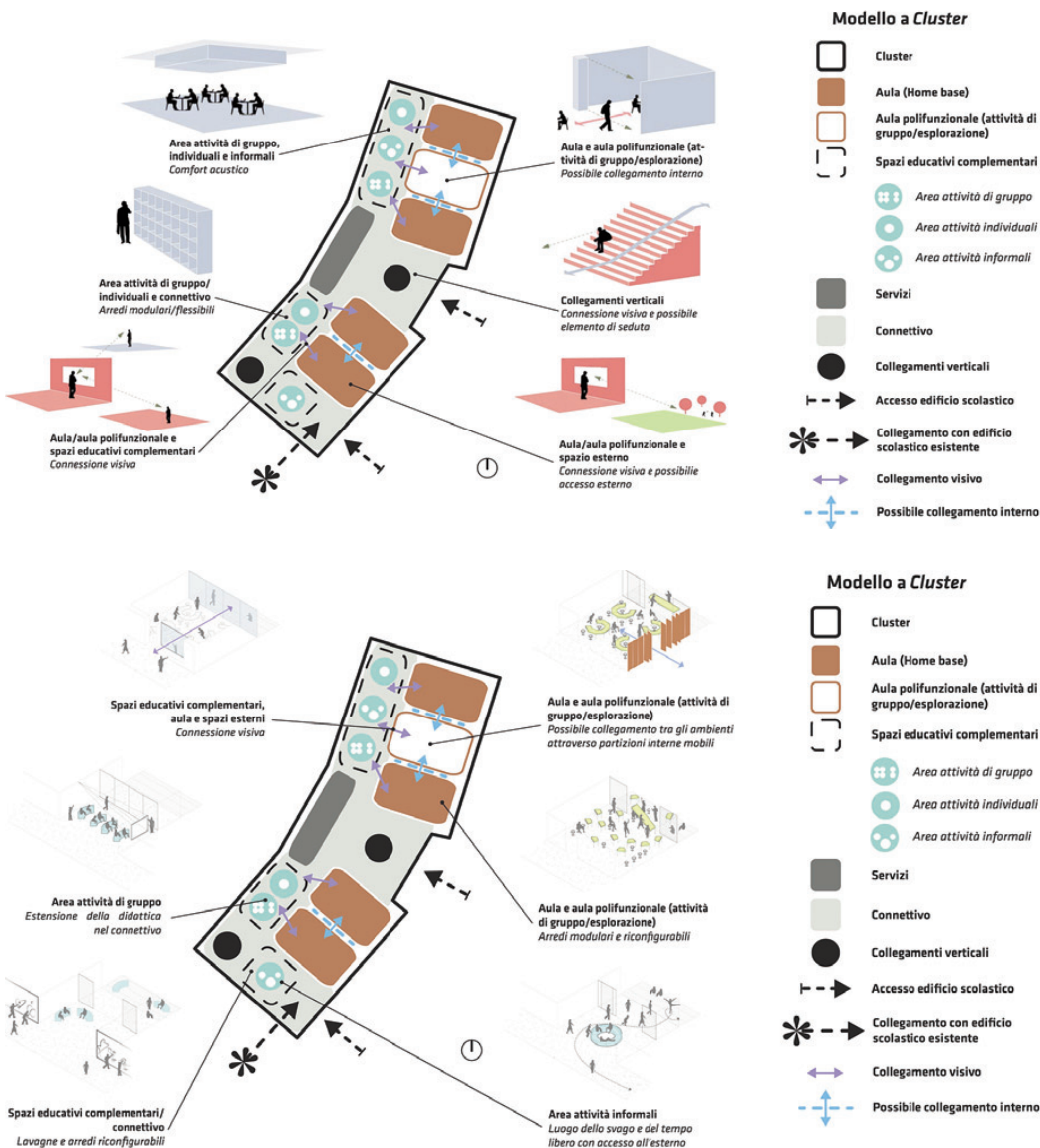
l'evoluzione delle esigenze dei modelli didattici contemporanei (Figg. 1, 2).

Lo scenario emerso dalle indagini preliminari ha permesso di prefigurare cinque macro-tematiche fondanti il nucleo di strategie propedeutiche alla successiva definizione del concept di progetto:

- Sostenibilità e riduzione dell'impatto ambientale attraverso LCA delle scelte progettuali adottate, improntate a minimizzare l'impronta antropica dell'intervento, in termini sia di consumi energetici dell'edificio in fase di utilizzo che di filiera produttiva dei materiali impiegati per la realizzazione (approccio 'dalla culla alla culla'), valutandone puntualmente le potenzialità di dismissione selettiva, riciclabilità e riutilizzabilità dei componenti;
- Efficienza energetica e integrazione di tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili (fotovoltaico e solare termico), adottando scelte progettuali indirizzate all'ottenimento di standard di efficienza che rispettano i parametri descritti per la classificazione nZEB;
- Strategie passive per il controllo ambientale integrate e declinate alle varie scale dell'intervento, dallo spazio aperto alle soluzioni tecnologico-compositive dell'involucro, allo scopo di massimizzare e potenziare gli effetti dei sistemi solari e di ventilazione passiva previsti per ridurre i consumi nella climatizzazione degli ambienti;
- Controllo delle condizioni di comfort indoor illuminotecnico, acustico e termo-igrometrico attraverso modellazioni con software dedicati, rispetto ai parametri qualitativi e quantitativi stabiliti dalla normativa per gli ambiti prestazionali sopracitati;
- Edilizia scolastica innovativa, attraverso una distribuzione planimetrica basata sull'adozione di spazi educativi articolati come cluster didattici e ambienti comuni progettati come laboratori e agorà aperti al territorio e alla società.

Le azioni intraprese nella fase progettuale definitiva per garantire l'adempimento alla normativa CAM (Fig. 3) possono essere ricondotte a tre ambiti strategici di previsione (a scala di insediamento, del singolo edificio, dei materiali e dei componenti), articolati come segue:

- Sistemazione delle aree a verde esterne, attraverso il mantenimento di gran parte delle essenze presenti nel lotto e la piantumazione di nuove alberature e arbusti autoctoni e con basso potere allergenico, non urticanti né spinose (Figg. 4, 5);
- Riduzione del consumo di suolo e mantenimento della sua permeabilità (Fig. 4), mediante l'integrazione di superficie verde (3.022 mq) e pavimentata con maglie aperte (4.730 mq) superiore al 60% della superficie di progetto (5.371 mq);
- Miglioramento della prestazione energetica, adottando soluzioni di involucro capaci di garantire elevati standard di isolamento invernale e di inerzia termica estiva (Fig. 6);
- Approvvigionamento energetico, integrando in copertura e nella schermatura della serra solare un impianto fotovoltaico di 17 kW (Fig. 7);
- Risparmio idrico, realizzando un impianto di raccolta delle acque piovane riutilizzabili per uso irriguo e per gli scarichi sanitari, impiegando dispositivi per la riduzione del flusso d'acqua e apparecchi sanitari con cassette a doppio scarico e prevedendo un sistema di monitoraggio dei consumi idrici, come strumento educativo a un consumo consapevole della risorsa acqua;
- Illuminazione naturale, garantendo un fattore me-



**Figg. 1, 2 |** Distribution diagram of innovative educational environments: ground floor; the first and second floor (credits: ABITA Centre, 2019).

dio di luce diurna uguale o superiore al 2% per tutti i locali regolarmente occupati attraverso grandi pareti finestrate orientate verso Sud-Est (Fig. 8);

- Aerazione naturale e ventilazione meccanica controllata, tramite: 1) ottimizzazione della distribuzione dei volumi edilizi, orientati rispetto all'asse Nord-Est / Sud-Ovest per favorire, attraverso l'apertura degli infissi posti su fronti opposti, un naturale effetto di ventilazione trasversale, necessario a smaltire il calore in eccesso; 2) integrazione di un recuperatore di calore al fine di minimizzare le dispersioni energetiche in regime invernale;
- Dispositivi di protezione solare, mediante l'integrazione di sistemi di schermatura e ombreggiamento opportunamente dimensionati e orientati; nello specifico in corrispondenza delle aule sono state inserite tende mobili esterne e sistemi fissi a lame verticali, mentre il nucleo centrale di collegamento è stato schermato da lamelle orizzontali realizzate con pannelli fotovoltaici DSSC;
- Disassemblabilità, tramite l'impiego di tecniche costruttive a secco per favorire a fine vita dell'edificio la smontabilità e il recupero di tutti i componenti edilizi utilizzati;
- Materia recuperata o riciclata, prestando particolare attenzione alla selezione di componenti edilizi contenenti adeguate percentuali di materia riciclata o ecocompatibile.

Dal punto di vista compositivo il nuovo edificio si articola in tre corpi di fabbrica di tre piani, per un volume complessivo di 9.025,00 mc, coerentemente con le prescrizioni degli strumenti urbanistici vigenti e con le previsioni di densità edilizia del contesto circostante; esso si caratterizza per la presenza di una grande serra centrale di ingresso pensata non solo come collegamento verticale e luogo di relazione, ma anche quale strumento per il controllo ambientale passivo (Figg. 9, 10).

Le soluzioni materiche e tecnologiche adottate per l'involucro architettonico del nuovo corpo di fabbrica assumono, infine, valenza di riconoscibilità dell'intervento e della sua funzione all'interno del contesto periurbano in cui si inserisce. Si intende in questo modo favorire la creazione di una nuova consapevolezza, negli studenti e nella comunità, sul peso che l'edilizia scolastica assume nelle strategie di sfruttamento e gestione sostenibile e innovativa dell'energia e dell'ambiente.

**Analisi energetiche a regime dinamico** | Con l'obiettivo di compiere scelte compositive e tecnologiche che permettessero di raggiungere lo standard nZEB, garantendo condizioni di comfort indoor adeguate durante tutto l'arco dell'anno e in ottemperanza ai CAM, la fase di progettazione è stata accompagnata da un fase di modellazione e simulazione energetica in regime dinamico, condotte per verificare in modo predittivo il raggiungimento dei target energetico-ambientali identificati nella fase meta-progettuale. Il modello BIM è stato sviluppato partendo dalle caratteristiche geometriche e fisiche dell'edificio e implementato rispetto alle caratteristiche materiche e termoigrometriche di ogni soluzione tecnologica adottata. Successivamente si è proceduto con la formulazione delle ipotesi inerenti ai profili di occupazione annuale, sulla base dei dati forniti dalla committenza e considerando solo le zone relative alle aule scolastiche.

I profili d'uso sono stati formulati su base oraria giornaliera, rispetto alle indicazioni relative agli

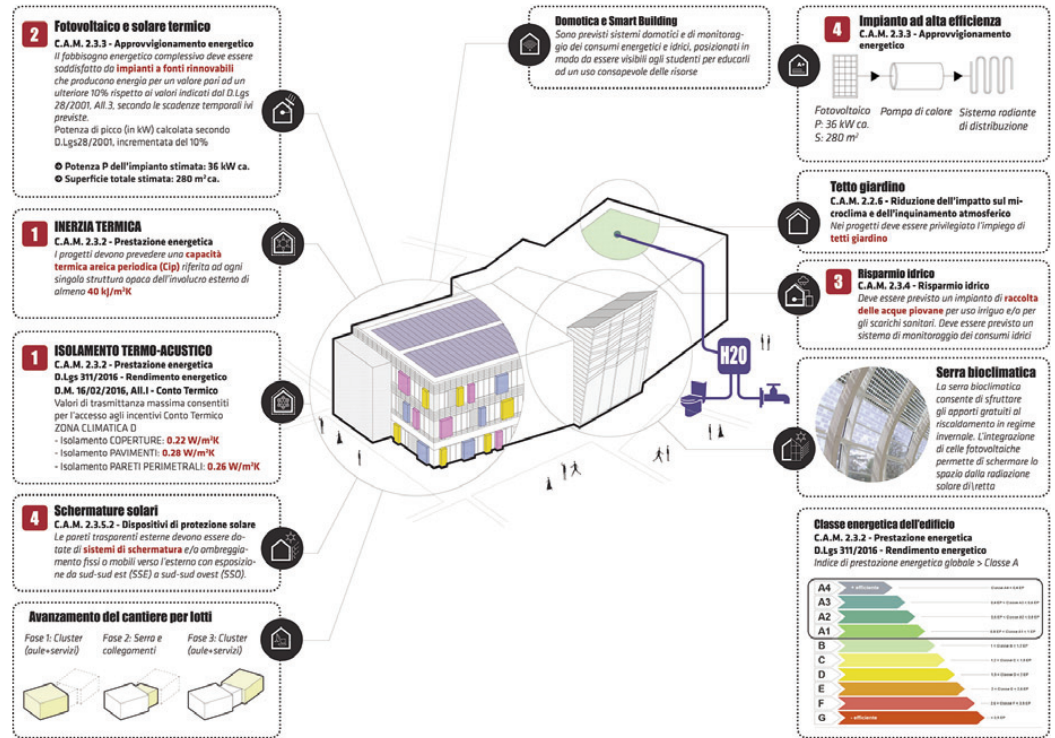


Fig. 3 | Analysis of the achievement of MEC requirements in building design (credit: Centro ABITA, 2019).

orari delle attività didattiche e del calendario scolastico regionale desunti dal portale 'scuola in chiaro' del Ministero dell'Istruzione e del Merito. L'affollamento considerato per ciascuna aula è stato considerato pari a 25 persone, comprensivo sia degli alunni che dei docenti e considerando che l'occupazione dei locali ha luogo indicativamente dal 15 settembre al 10 giugno, dal lunedì al venerdì per 6 ore giornaliere (dalle 8:00 alle 13:45).

In seguito è stato possibile individuare gli apporti energetici interni, come indicato dalla norma tecnica UNI/TS 11300-1:2014 (pari a 4 W/mq per gli apporti globali per la categoria edifici scolastici) e in riferimento ai dati di occupazione (25 persone per aula), tenendo conto in particolare del calore prodotto dagli apparecchi dell'impianto d'illuminazione (9 corpi illuminanti per aula con una potenza di 30 W ciascuno), dai dispositivi elettrici ed elettronici utilizzati per la didattica (lavagne interattive multimediali, videoproiettori e computer) e dagli occupanti stessi, in base all'attività metabolica (calore pari a 70 W/mq per attività sedentaria) e al vestiario (pari a 1 c.l.o. per il periodo invernale e a 0,7 c.l.o. per il resto dell'anno).

La stessa operazione è stata svolta relativamente alle dispersioni termiche, analizzando e quantificando la presenza di infiltrazioni d'aria parassite (pari a 0,1 ricambi d'aria per ora) e il dispendio energetico dovuto al ricambio d'aria per ventilazione naturale, dovuto alla possibile apertura delle finestre. Questi elementi sono stati inseriti nel calcolo ipotizzando in modo cautelativo i possibili comportamenti scorretti nella fase di utilizzo del fabbricato (ad es. apertura delle finestre anche nel periodo invernale).

L'ultimo elemento considerato nella modellazione a regime dinamico ha riguardato la definizione delle caratteristiche dell'impianto di riscaldamento, in modo da determinare in modo puntuale sia il fabbisogno energetico dell'edificio sia i livelli di comfort percepito dai suoi utenti. Le simulazioni

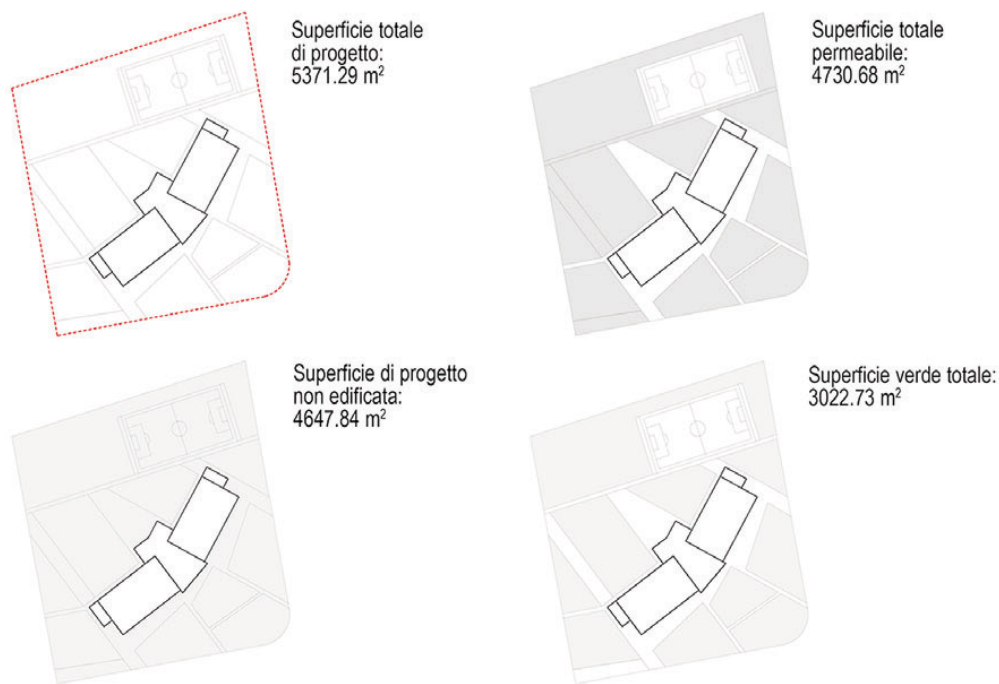
hanno confermato che le soluzioni di involucro e di impianto proposte permettevano di raggiungere gli indici di prestazione energetica globale previsti dalla normativa (Tab. 1).

Completata la modellazione energetica della nuova Scuola in ambiente BIM si è proseguito con la simulazione dinamica del fabbricato mediante il software EnergyPlus, con l'obiettivo di analizzare come potevano cambiare le prestazioni del nuovo edificio con o senza facciata ventilata. A seguito dell'analisi dei dati di output estratti da questa fase di simulazione dinamica si è proceduto a osservare i relativi grafici, estrapolati dai file .csv; tale operazione è risultata necessaria per comprendere in modo efficace le prestazioni offerte dall'involucro edilizio, sia dal punto di vista energetico che di comfort, rispetto ai principali locali del fabbricato, identificati nelle aule scolastiche.

Nel dettaglio le simulazioni sono state condotte per tre zone termiche (Z02\_Aula02; Z16\_Aula09; Z39\_Aula18), selezionate in base alla loro posizione nell'edificio in modo da valutare condizioni differenti di orientamento e di conseguenza di soleggiamento.

Le prestazioni di carattere energetico e quelle relative al comfort termo-igrometrico sono state valutate per due differenti configurazioni d'involucro (Tab. 2) e studiate attraverso l'utilizzo di quattro differenti marker: temperatura media interna delle aule, rapportata a quella esterna del sito; accumulo di energia termica delle superfici; indice di comfort PMV (voto medio previsto).

I valori simulati sono stati successivamente comparati, al fine di individuare quale tra i pacchetti analizzati fosse in grado di offrire i maggiori benefici, rispetto al caso specifico della nuova Scuola 'Cino da Pistoia'. I dati hanno permesso di evidenziare come, grazie all'inserimento della facciata ventilata, sia possibile ottenere dei vantaggi nel corso dell'ultima parte del periodo di riscaldamento della stagione invernale. Infatti osservando i dati



**C.A.M. Criteri Ambientali Minimi, D.M. 11/10/2017**

2.2.3	Riduzione del consumo di suolo e mantenimento della permeabilità dei suoli	Il progetto di nuovi edifici o gli interventi di ristrutturazione urbanistica, ferme restando le norme e i regolamenti più restrittivi, deve avere le seguenti caratteristiche: Deve prevedere una superficie territoriale permeabile non inferiore al 60% della superficie di progetto (es. superfici verdi, pavimentazioni con maglie aperte o elementi grigliati etc); Deve prevedere una superficie da destinare a verde pari ad almeno il 40% della superficie di progetto non edificata e il 30% della superficie totale del lotto; Deve prevedere una superficie da destinare a verde pari ad almeno il 30% della superficie totale del lotto;	$S_{di\ progetto}$	$S_{t\ perm.\ richiesta}$	$S_{t\ perm.\ di\ progetto}$
			5371.29 m <sup>2</sup>	3222.77 m <sup>2</sup>	4730.68 m <sup>2</sup>
			$S_{progetto\ non\ ed.}$	$S_{verde\ richiesta}$	$S_{verde\ di\ progetto}$
			4647.84 m <sup>2</sup>	1859.14 m <sup>2</sup>	3022.73 m <sup>2</sup>
			$S_{di\ progetto}$	$S_{verde\ richiesta}$	$S_{verde\ di\ progetto}$
			5371.29 m <sup>2</sup>	1611.39 m <sup>2</sup>	1611.39 m <sup>2</sup>

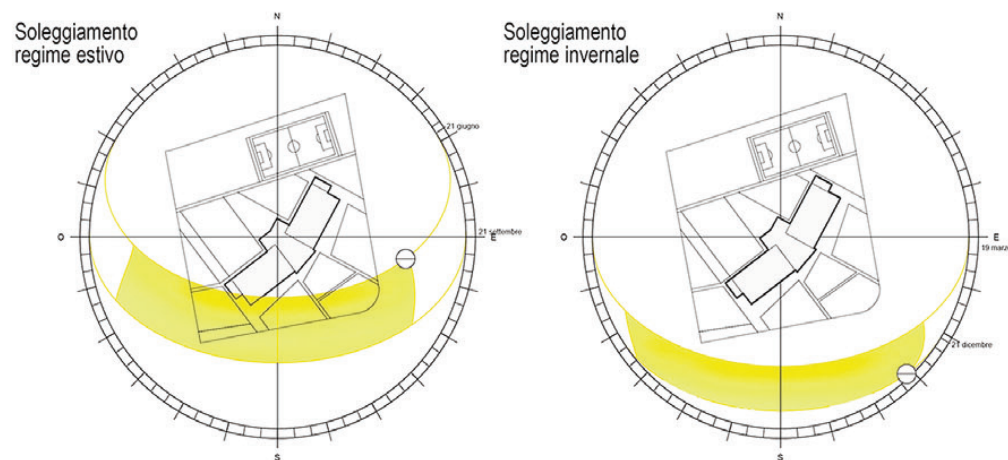


Fig. 4 | Analysis of the achievement of MEC requirements in the design of outdoor spaces (credit: Centro ABITA, 2019).

estrapolati dal software di calcolo è possibile notare che la parete ventilata determina condizioni di comfort indoor più soddisfacenti, con la conseguente diminuzione del fabbisogno di energia per la climatizzazione nei periodi intermedi (in particolare nelle ultime settimane di marzo), sia in termini di controllo della temperatura dell'aria (Fig. 11) che di indice PMV (Fig. 12).

**LCA semplificata** | La metodologia LCA è utilizzata per valutare gli impatti ambientali degli edifici sulla base dell'intero ciclo di vita, considerando sia gli impatti operativi che quelli incorporati (Birgisdottir et alii, 2017): i primi indicano gli impatti

che si determinano nella fase d'uso dell'edificio, come ad esempio quelli legati al riscaldamento e raffreddamento, i secondi sono relativi alla fase di costruzione dell'opera, che comprende l'estrazione, l'approvvigionamento e il trasporto delle materie prime, la produzione dei materiali e dei prodotti utilizzati, nonché il trasporto in cantiere e quindi la gestione dei materiali al termine della loro vita utile (End of Life – EoL), includendo la demolizione o de-costruzione, il riciclo, la discarica o il riutilizzo (Fufa et alii, 2018).

Nonostante il crescente interesse per i temi di circolarità la gran parte degli studi sulla valutazione del ciclo di vita dei sistemi di facciata non tiene

conto dell'EoL, ma è spesso orientata a un approccio del tipo 'dalla culla alla tomba', omettendo invece le fasi di utilizzo e smaltimento (Cheong et alii, 2024) che possono contribuire in modo significativo sugli impatti globali dell'edificio.

Infatti la letteratura scientifica sui principi di circolarità indica il riutilizzo dei materiali quale processo da privilegiare rispetto al riciclo e l'invio in discarica da evitare; ciò può essere perseguito attraverso una demolizione selettiva, che concerne la cernita e rimozione di quei materiali più adatti a essere riciclati e/o riutilizzati (Cheong et alii, 2024). Allo stato delle conoscenze tuttavia risulta molto complesso identificare la soluzione ottimale, in termini di benefici ambientali, tra demolizione selettiva volta al riciclo e indirizzata al riutilizzo.

Su questo tema gli studi pubblicati sono contrastanti, poiché il tema da affrontare è la quantificazione degli oneri legati al processo di separazione e di selezione dei componenti edili nel bilancio totale. Pantini e Rigamonti (2020), coerentemente con Anseh et alii (2021), dimostrano come gli impatti prodotti da una demolizione selettiva, condotta in un contesto geografico ben definito, possono essere più alti e tecnicamente impegnativi rispetto a una procedura tradizionale se il loro smontaggio non è stato previsto già in fase di progettazione, poiché dipendono fortemente dalle caratteristiche dell'edificio da demolire, dal contesto e dal mercato in cui si opera; concludendo, le valutazioni sugli impatti ambientali connessi alla demolizione selettiva devono essere vagliate caso per caso.

Sulla base di queste considerazioni l'obiettivo dello studio LCA è valutare il contributo degli impatti dovuti al riciclo a fine vita utile di almeno il 70% in peso dei componenti della facciata della Scuola 'Cino da Pistoia', considerando il sistema di chiusura con facciata ventilata che è risultato maggiormente performante a seguito delle simulazioni condotte nella fase progettuale.

**Indicatori LCA e risultati** | In linea con le opzioni semplificate di comunicazione degli indicatori LCA introdotti dal framework EU Level(s) (Dodd, Donatello and Cordella, 2021), gli impatti ambientali della facciata sono stati calcolati considerando un ciclo di vita incompleto e prendendo in particolare in esame i seguenti moduli: la fase del prodotto (A1-A3), quella dello scenario EoL (C3-C4) e i benefici o gli oneri ambientali netti derivanti dal riutilizzo di più del 70% in peso delle componenti di facciata (Tab. 3). Pertanto, sulla base delle simulazioni energetiche condotte, questa parte di analisi, ha seguito le seguenti fasi:

- definizione dello scenario di fine vita della facciata ventilata, rispetto alle indicazioni del criterio 2.4.14 dei CAM edilizia, prevedendo che almeno il 70% in peso dei materiali utilizzati nella soluzione sia sottoponibile a fine vita a disassemblaggio e demolizione selettiva per un successivo riciclo;
- scelta degli indicatori di impatto rilevanti per valutare l'impatto ambientale del sistema studiato;
- individuazione e raccolta delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) appropriate al caso studio, sulla base delle prestazioni e caratteristiche identificate nell'analisi energetica;
- identificazione delle informazioni sul disassemblaggio di ciascun componente di facciata e dei relativi dati di impatto e di scenario nelle EPD precedentemente analizzate;

- esecuzione della valutazione del ciclo di vita dell'intera facciata;
- valutazione dei risultati della LCA.

Una LCA contempla diversi indicatori e parametri per quantificare gli impatti sull'ambiente, soprattutto nelle fasi iniziali di progetto, ma per ottimizzare i tempi e l'onerosità tecnica di calcolo di una LCA completa i parametri possono essere ridotti (Hur et alii, 2005).

Alla luce di queste premesse e tenendo conto delle indicazioni che la *EeBGuide* (Gantner et alii, 2012) - considerata tra le principali linee guida operative per condurre una LCA nel presente studio - fornisce in merito alla scelta degli indicatori nell'analisi semplificata (Hollberg and Ruth, 2016), si è scelto di esaminare tre dei principali indicatori LCA dichiarati dalle EPD: 1) il potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential - GWP), che esprime le emissioni di gas serra come tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente; 2) l'uso totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (Total use of Renewable Primary Energy Resources - PERT), come somma tra l'energia primaria rinnovabile e le risorse energetiche primarie utilizzate come materie prime (GJ); 3) l'uso totale di risorse energetiche primarie (MJ) non rinnovabili (Total use of Non-Renewable Primary Energy - PENRT), che include l'energia primaria non rinnovabile e le risorse energetiche primarie utilizzate come materie prime (GJ).

Alla definizione degli obiettivi LCA e della selezione degli indicatori, è seguita la raccolta delle EPD - strumenti più idonei per informare sugli impatti ambientali dei materiali da costruzione basati su LCA (Sposito and De Giovanni, 2023) - nei principali Program Operator (PO) europei: EPD Italy, Institut Bauen und Umwelt e. V. (IBU) ed EPD International. La cernita delle Etichette Ambientali ha tenuto conto della corrispondenza con le caratteristiche prestazionali dei materiali valutati per la parte energetica e della validità del dato come scadenza e contesto geografico: solo per il rivestimento in alluminio il dato è stato tratto da una EPD, verificata da parte terza ma pubblicata dalla European Aluminium, e non nei consueti PO.

La Figura 13 indica i risultati del GWP per fase del ciclo di vita, mentre la Figura 14 riporta gli indicatori sull'uso totale di risorse primarie rinnovabili (PERT) e non rinnovabili (PENRT) per la sola fase di produzione (A1-A3). In entrambi i casi il contributo dato dall'alluminio, sia come rivestimento sia come elemento degli infissi, è preponderante nella fase di produzione (A1-A3) rispetto alle altre componenti analizzate; tale alta incidenza in fase di produzione dovrebbe comunque essere limitata dalla fase D, da valutare a parte e riguardante i benefici derivanti dal riciclo post uso, che negli studi EPD sono stati assunti con percentuali pari al 96% per il rivestimento di facciata e del 95% per gli infissi.

**Conclusioni e sviluppi futuri** | Sebbene ci sia ancora molto lavoro da fare per arrivare a un ambiente costruito con un consumo minimo di energia e di carbonio e con la massima resilienza e comfort, la recentissima revisione della EPBD rappresenta un passo importante verso la sostenibilità e la transizione energetica.

L'ampiamiento degli obiettivi di decarbonizzazione rispetto a una cornice più ampia dell'analisi, che è quella dell'intero ciclo di vita dell'opera co-

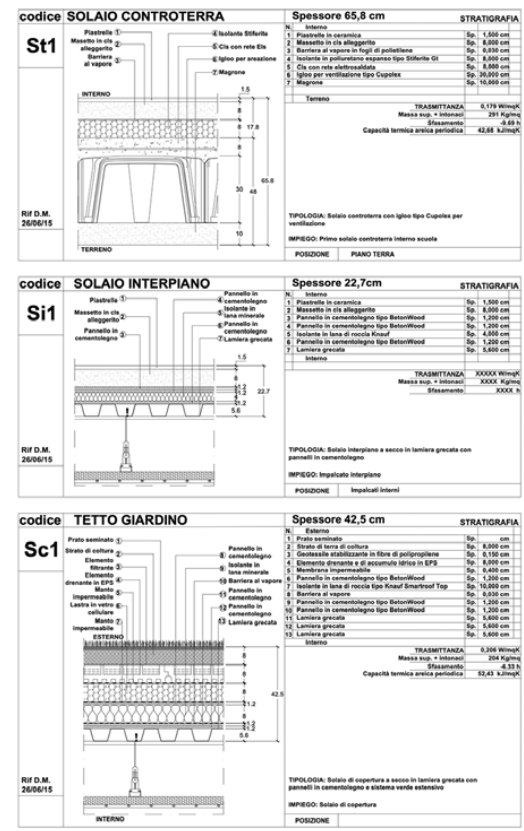
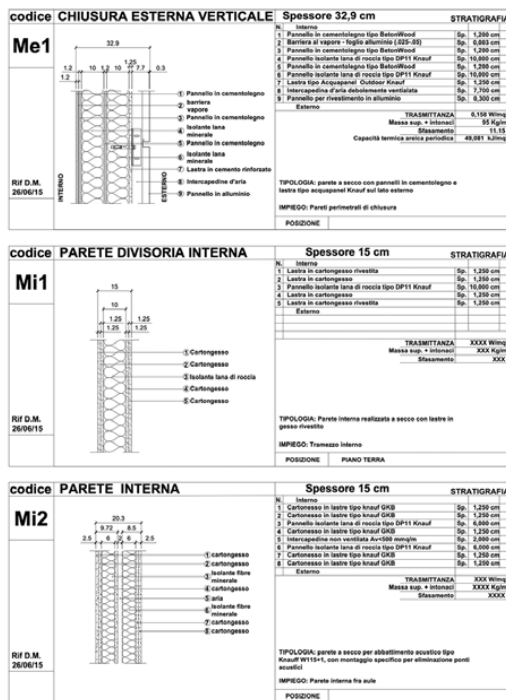
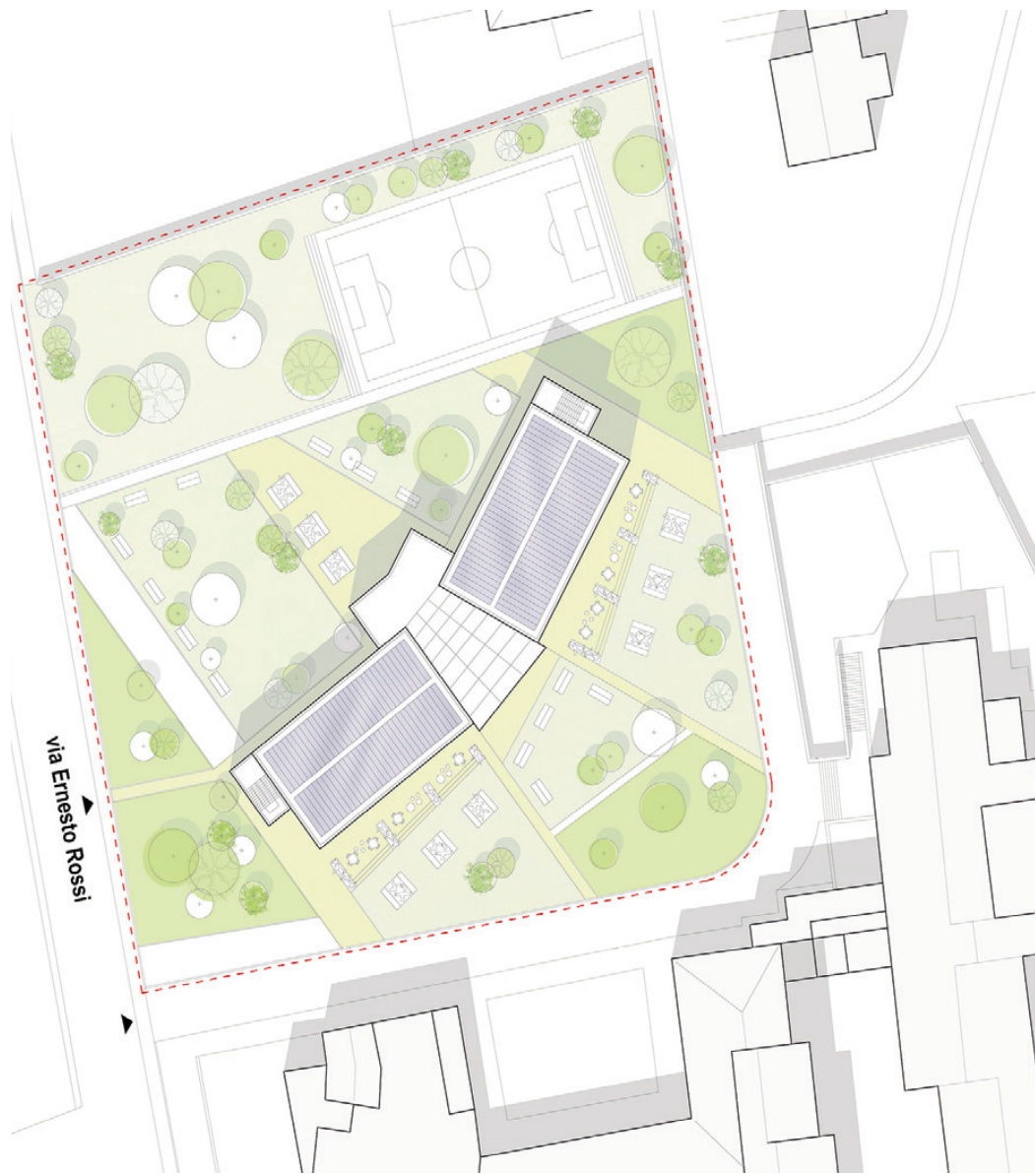
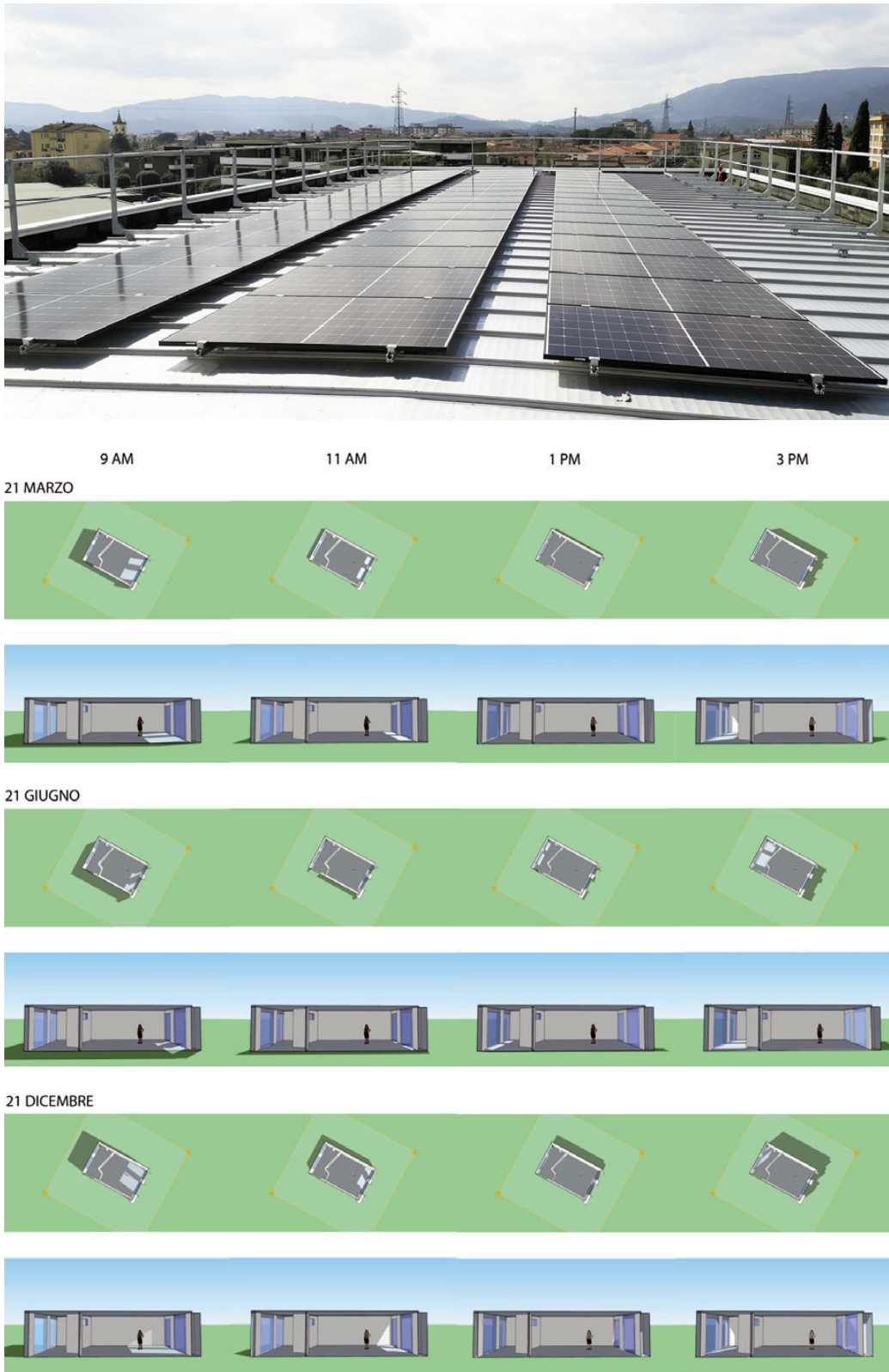


Fig. 5, 6 | Project plan with layout of outdoor spaces; Project stratigraphies (credits: ABITA Centre, 2019).



Figg. 7, 8 | Photovoltaic roof system; Sunlight analysis of classrooms (credits: ABITA Centre, 2019).

struita, rappresenta una sfida nonché una opportunità per tutti gli attori della filiera delle costruzioni, dai progettisti ai produttori fino alla stazione appaltante. Si tratta di un vero e proprio cambio di paradigma che porta ad affrontare la questione della contabilizzazione e mitigazione delle emissioni, riferite alle fasi di produzione, costruzione e fine vita, a cui si aggiunge (come modulo indipendente) la fase D 'benefici e carichi oltre il ciclo di vita', che permette di valutare i potenziali benefici e/o impatti relativi a processi circolari di riuso, recupero o ri-

ciclo (Giordano and Andreotti, 2023). L'introduzione in Italia dei CAM per l'affidamento di servizi di progettazione ha rappresentato un importante primo passo verso una riduzione degli impatti degli interventi di nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici secondo un'ottica del ciclo di vita, portando il progettista, sin dalle prime fasi di concepimento dell'opera, a ragionare e concepire il manufatto da una diversa angolazione, quella appunto del Life Cycle Thinking.

Nonostante ciò sono ancora pochi gli studi che

analizzano come l'integrazione di criteri di eco-progettazione, in ottica LCT e nel rispetto dei CAM nella riqualificazione e/o realizzazione di edifici scolastici, possa guidare il progettista alla riduzione dei consumi e degli impatti ambientali.

Per raggiungere l'obiettivo di un'ampia diffusione delle strategie finalizzate alla riduzione dell'energia incorporata e delle emissioni di gas serra nell'intero ciclo di vita è necessario lavorare su casi sperimentali che consentano di evidenziare gli esiti raggiunti, ma riescano anche a comunicare in modo chiaro e trasparente anche il processo di valutazione sottostante.

Le sperimentazioni dovrebbero riferirsi a quelle ricerche in atto in ambito internazionale che indagano sulla messa a punto di metodologie, valori soglia e target di riferimento, tutti elementi essenziali nell'ottica di una effettiva riduzione dell'uso delle risorse e della mitigazione degli impatti ambientali. In quest'ottica il presente studio intende mostrare come raggiungere il target nZEB, garantendo adeguate condizioni di comfort misurabili in termini di PMV con strumenti di simulazione adeguati, senza rinunciare a elevati standard ambientali, attraverso la scelta oculata di materiali dotati di adeguate certificazioni EPD, assemblabili a secco e valutabili in termini di reversibilità a fine ciclo vita.

L'approccio metodologico interdisciplinare adottato nel caso della realizzazione di nuovi edifici scolastici potrà essere esteso a un più ampio patrimonio edilizio, anche non pubblico, fornendo un avanzamento nella definizione di una metrica di raffronto delle prestazioni ambientali tra edifici. Se la direzione internazionale (Zimmermann, Rasmussen and Birgisdóttir, 2023) è quella di sviluppare un sistema di benchmark per la determinazione di livelli di sostenibilità basati su valori target, gli esiti del presente studio possono concorrere ad alimentare riflessioni e aprire scenari da dibattere all'interno della Comunità Scientifica. Sviluppi futuri saranno orientati alla implementazione e gestione di aspetti relativi alla progettazione integrata basata sulla modellazione BIM, anche con l'obiettivo di affrontare la dibattuta questione della influenza delle diverse LCA data-source sugli impatti totali del progetto nelle sue diverse fasi.

A zero-emission Europe by 2050 is a complex and multifaceted challenge that each member country has to address with commitment. The construction sector is one of the areas where efforts need to be intensified, as it is responsible for 37% of energy- and process-related CO<sub>2</sub> emissions and 21% of global greenhouse gas emissions (UNEP, 2023). Estimates that could increase significantly in 2035 (Falana, Osei-Kyei and Tam, 2024), especially in light of recent data on the growth of global energy consumption and global GHG emissions in the year 2022, which is 1% higher than in 2021 (IEA, 2023). The construction industry has made numerous efforts to develop strategies and assessment methods to mitigate environmental impacts (Abdelal and Guo, 2022). Also, at the legislative level, several proposals and global policies are promoted by the European Commission aimed at decarbonising the different spheres of the construction sector, particularly at the containment of consumption and net in-use emissions of buildings.

In this framework, the recent revision of the EPBD Energy Performance of Buildings Directive (European Parliament and Council of the European Union, 2024), known as the Case Green Directive, approved in March 2024 by the European Parliament, redefines the way to measure the energy consumption and related climate-changing gas emissions of buildings, extending the analysis from just Operational Energy and associated impacts (Operational Carbon) to Whole Life-Cycle Performance, which implies the calculation of Embodied Energy / Carbon. Suppose the definition of Operational Energy is quite apparent. In that case, the identification of Embodied Energy / Carbon requires a more articulated evaluation as it concerns the sum of the energies and impacts produced in all the phases of the life cycle of the construction according to the logic ‘from the cradle to the grave’, and therefore includes the impacts due to: the production of the individual materials (from the cradle to the grave), to the transport to the construction site, as well as the rehabilitation and maintenance operations in the useful life of the work, to its end of life (Sposito and Scalsi, 2020).

Indeed, in recent years, several studies and researchers have highlighted how, at times, achieving high energy standards means significantly increasing embodied energy (Palumbo and Politi, 2018; Rondinel-Oviedo and Keena, 2022), proposing the adoption of technological solutions that are often unsuitable from a Life Cycle Energy point of view (LCE; Birgisdottir et alii, 2017). Many scholars (Moazzen, Karagüler and Ashrafiyan, 2021) agree on the need to adopt design strategies following a Life Cycle Thinking (LCT) approach, thus contemplating an evaluation of the totality of the actions related to the whole life of the building in order to un-

derstand its energy behaviour and consequently identify the solutions with the lowest environmental impact.

The question of the relationship between Operational Energy and Embodied Energy / Carbon also becomes central in the case of regeneration interventions with demolition and reconstruction of new buildings, which, in line with the strategies of the Renovation Wave for Europe (European Commission, 2020a) and the numerous other recent EU initiatives on the ecological and energy transition at international level – from the European Green Deal (European Commission, 2019) to the Next Generation Europe Economic Development (European

Commission, 2020b) – constitute one of the most relevant topics of the revised EPB4 Directive (Fetting, 2020).

It is interesting to note that funding programmes in almost all European countries are currently in place to renovate the existing public building stock through ‘deep renovation’ or demolition and reconstruction actions to reduce its energy consumption and overall environmental impact. Among the buildings for which there is an urgent need to intervene with joint actions from the energy and structural point of view, school buildings are the most critical and, if redeveloped or built from scratch, can help to spread new solutions and construction process-

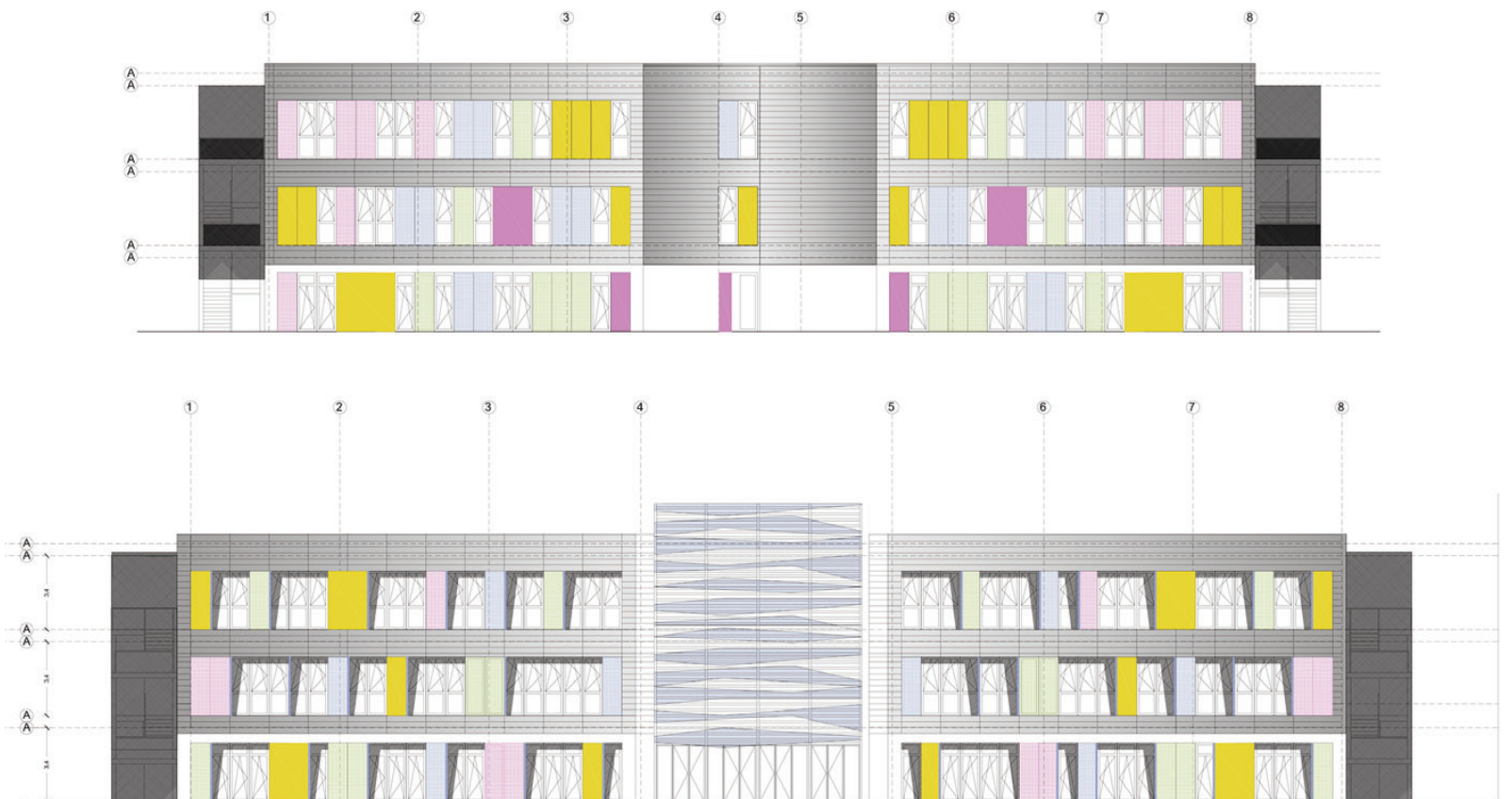


Fig. 9, 10 | The South elevation under construction; Design of exterior elevations (credits: Centro ABITA, 2019).



es inspired by Circular Design principles. It is no coincidence that in the last decade in Europe, numerous funded European projects have chosen schools as case studies and experimental laboratories involving several geographical contexts, including Italy.

The School of the Future – Towards Zero Emission with High-Performance Indoor Environment<sup>1</sup> was funded in early 2011 under the Seventh Framework Programme with the aim of testing envelope and system technology solutions that could reduce the energy consumption of three types of school buildings in four different countries (Denmark, Germany, Italy and Norway), improving their liveability and life-cycle costs (Erhom-Kluttig and Erhom, 2014). The energy retrofit solutions screened by the project, available in a dedicated database, show exciting insights into the actual technical-economic ef-

fectiveness of the interventions in different international contexts.

Approximately one year later, VERYSchool<sup>2</sup>, one of the first European research projects developed within the framework of the European Competitiveness and Innovation (CIP-ICT-PSP-2011), pioneered an innovative tool called VSNavigator for efficient energy management and optimisation in school buildings. It is a user-friendly web tool that – by integrating two consolidated energy measurement and control tools (the Building Energy Management System and an energy modelling) in turn connected to interactive devices (smart meters and smart control) for HVAC and lighting plant regulation – can return possible optimisation actions and benefit estimates (Galata et alii, 2015).

More recent is the Renew School<sup>3</sup>, aimed at developing effective strategies for the adaptation of

school buildings to nZEB standards through both energy requalification of existing buildings and new construction, with positive effects also on user comfort: the project proposes innovative technological solutions for low environmental impact envelopes. Although relevant for the proposed innovations that adopt an integrated approach with intelligent solutions and tools to control and manage energy flows and comfort, acting on both spatial and more technological aspects, all three cases have the limitation of neglecting the effects related to the ‘embodied’ impacts of the materials and components adopted in the project.

At the same time, Italy, involved as a partner in many of these international projects, has launched a series of joint actions<sup>4</sup> – promoted by the Ministry of Education and Merit and the National Institute for Documentation, Innovation and Educational Research (INDIRE) – aimed at renovating the national school building heritage mostly built between 1945 and 1980. This building stock is in a state of severe decay and structural danger. It is spatially inadequate to the educational innovations promulgated through the 2013 Guidelines<sup>5</sup> to overcome the obsolete models of the current regulations dating back to 1975.

This urgency has led to the issuing of a series of competitions over the years and to the provision of specific financing lines, such as EIB loans, which have enabled public administrations to launch regeneration actions (often involving demolition and reconstruction) aimed at the construction of new buildings that, in line with the current Minimum Environmental Criteria (MEC; MITE, 2022), have been designed both to meet nZEB targets and to be environmentally sustainable to a Life Cycle Thinking (LCT) approach to support a broader and more extensive assessment that is often under-researched.

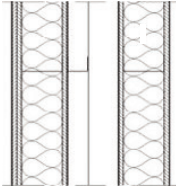
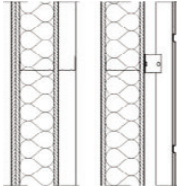
As in the European experiences once again, it is significant to note that, even at a national level, in both new construction and redevelopment projects, the most significant innovations have occurred in experimentation at the scale of the architectural envelope, called upon to manifest the ecological ambition of the project through its transformation.

The scenario outlined so far returns a design and regulatory framework of the last decade that is mainly characterised by the analysis of the operational dimension of the building, paying less attention to other relevant phases of the life cycle, such as those related to the realisation of products and the technologies used. Furthermore, the lack of harmonisation of LCA calculation tools, as well as the limited dissemination of specific geographically contextualised databases, has hindered the development of a more holistic assessment with broader boundaries; however, the latest revision of the EPBD (European Parliament and Council of the European Union, 2024) could give a solid impetus for overcoming this limitation.

The contribution focuses on the methodological approach developed to validate the demolition and reconstruction project of the ‘Cino da Pistoia’ School in the Municipality of Pistoia, designed to respond to the most modern spatial models inspired by the concepts of innovative didactics to guarantee zero energy consumption (through appropriate envelope and system choices) and to achieve the objective of optimising the global impacts (embedded and operational) of its entire life cycle through

Real building	Reference building	Verified
$H'_T$	$H'_{T,lim}$	✓
0.37 W/m <sup>2</sup> K	0.80 W/m <sup>2</sup> K	
$A_{sol,est} / A_{sup,utile}$ : 0.03	$(A_{sol,est} / A_{sup,utile})_{lim}$ : 0.04	✓
$EP_{H,nd}$	$EP_{H,nd,lim}$	✓
50.69 kWh/m <sup>2</sup>	57.50 kWh/m <sup>2</sup>	
$EP_{C,nd}$	$EP_{C,nd,lim}$	✓
15.20 kWh/m <sup>2</sup>	17.77 kWh/m <sup>2</sup>	
$EP_{gl,tot}$	$EP_{gl,tot,lim}$	✓
65.05 kWh/m <sup>2</sup>	161.69 kWh/m <sup>2</sup>	
$\eta_H$ : 2.22	$\eta_{H,lim}$ : 1.34	✓
$\eta_W$ : 0.63	$\eta_{W,lim}$ : 0.53	✓
$\eta_C$ : 1.64	$\eta_{C,lim}$ : 1.26	✓

Tab. 1 | Results of dynamic energy simulations for overall building energy requirements (credit: ABITA Centre, 2020).

Solution P1	Solution P2
	
Vertical opaque pre-assembled drywall with aquapanel finish (plaster)	Vertical opaque pre-assembled drywall with ventilated façade
Thickness: 38.5 cm	Thickness: 46.5 cm
U value: 0.17 W/mqK	U value: 0.15 W/mqK

Tab. 2 | Characteristics of the two vertical opaque envelope solutions analysed in the dynamic simulation phase (credit: Centro ABITA, 2020).

the adoption of circular design strategies (Romano et alii, 2023).

Expressly, the proposed integrated methodology consists of three main phases: 1) verification and evaluation of the building's energy performance concerning the nZEB target of indoor comfort, with a focus on different vertical envelope systems; 2) simplified LCA of the envelope solution with the best energy performance, to production phases and end-of-life scenarios, adopting robust data sources such as Environmental Product Declarations (EPDs); 3) Interpretation of LCA results for energy performance.

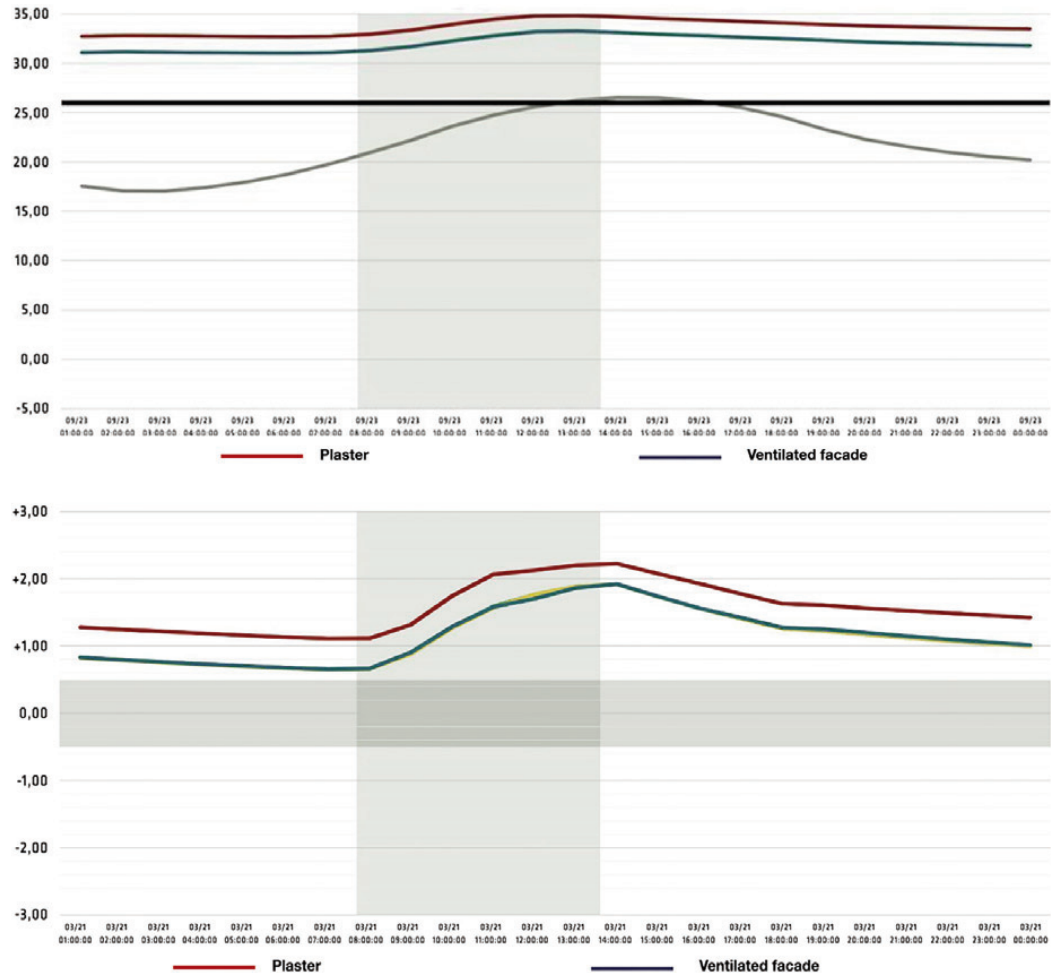
The objective is to demonstrate how the regeneration of existing school buildings, through demolition and reconstruction, can be conducted by integrating envelope solutions aimed at improving energy performance and indoor and outdoor comfort with environmental impact assessments in all phases of the building's life, going beyond the simple evaluation of the use phase, that is, starting from the analysis of the effects generated by the production of the materials and building components used in the façade systems and up to the possibility of minimising them by applying circularity principles such as reuse and post-consumer reuse.

**The 'Cino da Pistoia' School project** | The 'Cino da Pistoia' Secondary School (PT) is part of an existing school complex that includes the 'G. Galilei' Primary School, a gymnasium and a school canteen in which there was an obsolete building, now abandoned and in need of urgent work due to the presence of asbestos and severe structural deficiencies that made it inadequate to the most recent regulations concerning seismic safety, accessibility and energy efficiency. Due to these apparent criticalities, and after a detailed audit phase, we decided to proceed with the demolition and reconstruction of the building to develop a project in line with the MEC requirements on energy saving and environmental impact.

In particular, the development of the architectural project envisaged the adoption of a demanding performance approach centred on the characterisation of the framework of requirements and contextual constraints of a programmatic, technical and environmental nature to which to respond through appropriate compositional, functional and technological choices. The dimensional quantification of the intervention, taking into account the urban-building indices provided by the planning instrument in force, interpreted two main requirements: on the one hand, that of accommodating six didactic cycles of the existing middle school (18 classes in total), and on the other, that of having multifunctional classrooms, easily adaptable and modifiable over time to respond to the evolving needs of contemporary didactic models (Figg. 1, 2).

The scenario that emerged from the preliminary investigations made it possible to prefigure five macro-themes forming the core of strategies preparatory to the subsequent definition of the project concept:

- Sustainability and reduction of the environmental impact through LCA of the design choices adopted, aimed at minimising the anthropic footprint of the intervention, both in terms of energy consumption of the building in the use phase and of the production chain of the materials used for its realisation (cradle-to-cradle approach), accurately assessing



**Fig. 11** | Profile of average indoor air temperature on 21 March: Comparison of pre-assembled vertical opaque closure with aqua panel finish and with ventilated aluminium façade finish (credit Centro ABITA, 2020).

**Fig. 12** | PMV index analysis: comparison of pre-assembled opaque vertical closure with aqua panel finish and ventilated aluminium façade finish (credit Centro ABITA, 2020).

the potential for selective disposal, recyclability and reusability of the components;

- Energy efficiency and integration of technologies for energy production from renewable sources (photovoltaic and solar thermal), adopting design choices aimed at obtaining efficiency standards that meet the parameters described for nZEB classification;
- Passive strategies for environmental control integrated and declined at the various scales of the intervention, from the open space to the technological-compositional solutions of the envelope, to maximise and enhance the effects of the solar and passive ventilation systems foreseen to reduce the consumption for the air conditioning of the rooms;
- Control of the lighting, acoustic and thermo-hygrometric indoor comfort conditions through modelling with dedicated software to the qualitative and quantitative parameters established by the regulations for performance mentioned above areas;
- Innovative school buildings, through a planimetric distribution based on adopting educational spaces articulated as educational clusters and common spaces designed as laboratories and agoras open to the territory and society.

The actions taken in the final design phase to ensure compliance with the MEC regulation (Fig. 3) trace back to three strategic foresight areas (at the scale of the settlement, individual building, materials and components), articulated as follows:

- Arrangement of the outdoor green areas through the maintenance of most of the essences present in the lot and the planting of new native trees and shrubs with low allergenic power, neither stinging nor thorny (Figg. 4, 5);
- Reduction of soil consumption and maintenance of its permeability (Fig. 4) through the integration of green (3,022 sqm) and paved area with open meshes (4,730 sqm) exceeding 60% of the project area (5,371 sqm);
- Improving energy performance by adopting envelope solutions capable of ensuring high standards of winter insulation and summer thermal inertia (Fig. 6);
- Energy supply by integrating a 17 kW photovoltaic system in the roof and the solar greenhouse screen (Fig. 7);
- Saving water by implementing a rainwater harvesting system that can be reused for irrigation and sanitary drains, employing water flow reduction devices and sanitary fixtures with dual-flush cisterns, and providing a water consumption monitoring system as an educational tool for conscious water consumption;
- Natural lighting, ensuring an average daylight factor of over 2% for all regularly occupied rooms through large window walls facing south-east (Fig. 8);
- Natural ventilation and controlled mechanical ventilation, through: 1) optimisation of the distribu-

Material	Total Volume	Mass	% of Total Mass	End-of-life
	m <sup>3</sup>	kg	%	(EPD scenario)
Finish Plaster	4.4	7,118.4	10.5	100% Landfill
Cement bonded particleboard	75.1	3,755.0	5.5	100% Disposal
Rock Mineral Wall	210.9	261.5	0.4	100% Landfill
Mineral Insulation Panel	3.4	342.8	0.5	not declared
Façade system	7.4	20,073.9	29.5	4% Landfill
				96% Benefit D
Sun shade	0.7	1,954.3	2.9	4% Landfill
				96% Benefit D
Aluminium profile windows	32.8	34,501.2	50.7	Glass: 50% landfilling and 50% recycling
				No glass and metals: 5% landfilling and 95% recycling
				No glass and plastic: 5% landfilling and 95% incineration with energy recovery

**Tab. 3** | Amount of Material and End-of-Life scenario for façade aluminium cladding (credit: E. Palumbo, 2023).

tion of the building volumes, oriented concerning the North-East / South-West axis to favour, through the opening of the window frames placed on opposite fronts, a natural cross-ventilation effect, necessary to dispose of excess heat; 2) integration of a heat recovery unit in order to minimise energy dispersion in winter;

- Sun protection devices, through the integration of appropriately sized and oriental shading and shading systems; specifically, external movable blinds and fixed vertical blade systems were installed in the classrooms, while the central connecting core shields by horizontal louvres made of DSSC photovoltaic panels;
- Disassemblability, through the use of dry construction techniques to facilitate the disassembly and recovery of all the building components used at the end of the building’s life;
- Recovered or recycled material, paying particular attention to selecting building components containing adequate percentages of recycled or environmentally friendly material.

From a compositional point of view, the new building is divided into three three-storey blocks for a total volume of 9,025.00 mc, in line with the prescriptions of the town planning instruments in force and with the building density forecasts of the surrounding context; features a large central entrance greenhouse conceived not only as a vertical connection and place for relations but also as a tool for passive environmental control (Figg. 9, 10).

Lastly, the material and technological solutions adopted for the architectural envelope of the new building take on the value of recognising the intervention and its function within the peri-urban context in which we find it. It will encourage the creation of new awareness among students and the community of the importance of school buildings in sus-

tainable and innovative energy and environmental use and management strategies.

**Energy analyses in dynamic regime** | The planning phase includes dynamic energy modelling and simulation to predictively verify achieving the energy-environmental targets identified in the meta-design phase. The goal consists of making compositional and technological choices to achieve the nZEB standard, guaranteeing adequate indoor comfort conditions throughout the year and complying with MEC. The BIM model took into account the geometric and physical characteristics of the building and implemented the material and thermo-hygrometric characteristics of each technological solution adopted. Subsequently, the assumptions regarding the annual occupancy profiles were formulated based on the data provided by the client, with only the classroom areas in question counting.

Usage profiles were formulated daily and hourly according to the teaching activity timetables and the regional school calendar taken from the ‘scuola in chiaro’ portal of the Ministry of Education and Merit. The crowding for each classroom was 25 people, including pupils and teachers, considering that the premises are occupied from 15 September to 10 June, Monday to Friday, for 6 hours a day (from 8:00 to 13:45).

It was then possible to identify the internal energy inputs, as indicated by the technical standard UNI/TS 11300-1:2014 (equal to 4 W/sqm for the global inputs for the school building category) and regarding the occupancy data (25 people per classroom), taking into account, in particular, the heat produced by the lighting system fixtures (9 lighting fixtures per classroom with a power of 30 W each), by the electrical and electronic devices used for teaching (multimedia interactive whiteboards, video

projectors and computers) and by the occupants themselves, based on metabolic activity (heat equal to 70 W/sqm for sedentary activity) and clothing (equal to 1 c.l.o. for the winter period and 0.7 c.l.o. for the rest of the year).

The same operation takes place on thermal dispersion, analysing and quantifying the presence of parasitic air infiltration (equal to 0.1 air changes per hour) and the energy expenditure due to natural ventilation for the possible opening of windows. The calculation included these elements by cautiously assuming possible misbehaviour during the building’s use phase (e.g., opening windows even in winter).

The last element considered in the dynamic modelling concerned the definition of the characteristics of the heating system, which was necessary to accurately determine the building’s energy requirements and the comfort levels perceived by its users. The simulations confirmed that the proposed envelope and system solutions allowed the global energy performance indices required by the regulations to be achieved (Tab. 1).

After completing the energy modelling of the new school in the BIM environment, we proceeded with the dynamic simulation of the building using the EnergyPlus software to analyse how the performance of the new building might change with or without a ventilated façade. Following the analysis of the output data extracted from this dynamic simulation phase, the relevant graphs were observed and extrapolated from the .csv file; this operation was necessary in order to effectively understand the performance offered by the building envelope, both from an energy and comfort point of view, to the main rooms of the building, identified in the classrooms.

In detail, simulations run for three thermal zones (Z02\_Aula02; Z16\_Aula09; Z39\_Aula18), selected based on their position in the building to evaluate different conditions of orientation and consequently of sunshine.

The energy and thermo-hygrometric comfort performances were evaluated for two different envelope configurations (Tab. 2) and studied using four different markers: the average internal temperature of the classrooms compared to the external temperature of the site, the thermal energy accumulation of the surfaces, and the PMV comfort index (predicted mean rating).

The simulated values will be compared to identify which of the analysed packages offered the most significant benefits in the specific case of the new ‘Cino da Pistoia’ School. The data showed how, thanks to the inclusion of the ventilated façade, it is possible to obtain benefits during the last part of the heating period of the winter season. Observing the data extrapolated from the calculation software, it is possible to note that the ventilated wall determines more satisfactory indoor comfort conditions, with the consequent decrease in energy requirements for air-conditioning in the intermediate periods (particularly in the last weeks of March), both in terms of air temperature control (Fig. 11) and PMV index (Fig. 12).

**Simplified LCA** | The LCA methodology assesses the environmental impacts of buildings on a life-cycle basis, considering both operational and embedded impacts (Birgisdottir et alii, 2017); the former indicates impacts that occur during the use

phase of the building, such as those related to heating and cooling; the latter are related to the construction phase of the building, which includes the extraction, sourcing and transport of raw materials, the production of the materials and products used, as well as the transport to the construction site and then the management of the materials at the end of their useful life (End of Life – EoL), including demolition or de-construction, recycling, landfill or reuse (Fufa et alii, 2018).

Despite the growing interest in circularity issues, most studies on the life cycle assessment of façade systems do not consider EoL. They are often oriented towards a ‘cradle to grave’ approach, thus omitting the use and disposal phases (Cheong et alii, 2024) that can significantly impact the building’s overall impact.

The scientific literature on the circular economy points to the reuse of materials as the process to prefer over recycling and landfill avoidance; this goal is met through selective demolition, which concerns the selection and removal of the materials most suitable to be recycled and/or reused (Cheong et alii, 2024). According to the current state of knowledge, however, it is very complex to identify the optimal environmental benefits between selective demolition for recycling and demolition for reuse.

On this issue, published studies are conflicting, as it is a question of quantifying the burden of the separation and sorting process of building components in the total balance. Pantini and Rigamonti (2020), in line with Ansah et alii (2021), show how the impacts produced by a selective demolition conducted in a well-defined geographical context can be higher and technically more challenging than a traditional procedure if their demolition has not been foreseen already at the design stage, as they strongly depend on the characteristics of the building that needs dismantling, the context and the market in which it is to operate; therefore, assessments of the environmental impacts related to selective demolition needs further evaluation on a case-by-case basis.

Based on these considerations, the objective of the LCA study is to evaluate the contribution of the impacts due to the recycling of at least 70% by weight of the components of the façade of the ‘Cino da Pistoia’ School at the end of its useful life, considering the closure system with ventilated façade, which resulted to be the most performing following the simulations carried out in the design phase.

**LCA indicators and results** | In line with the simplified reporting options for LCA indicators introduced by the EU Level(s) framework (Dodd, Donatello and Cordella, 2021), the environmental impacts of the façade were calculated by considering an incomplete life cycle and taking into account the following modules: the product phase (A1-A3), the EoL scenario phase (C3-C4) and the net environmental benefits or burdens resulting from the reuse of more than 70% by weight of the façade components (Tab. 3). Therefore, based on the energy simulations conducted, this part of the analysis followed the following steps:

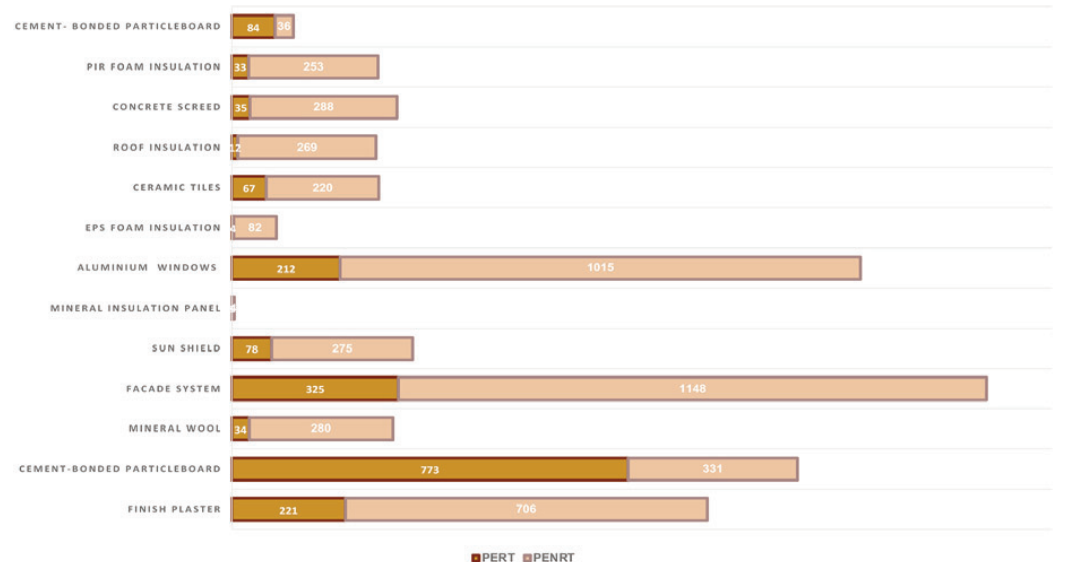
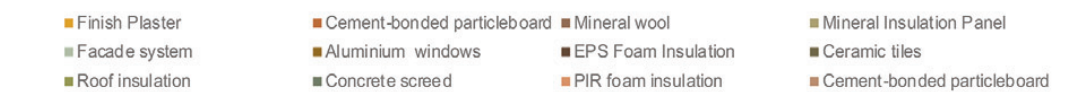
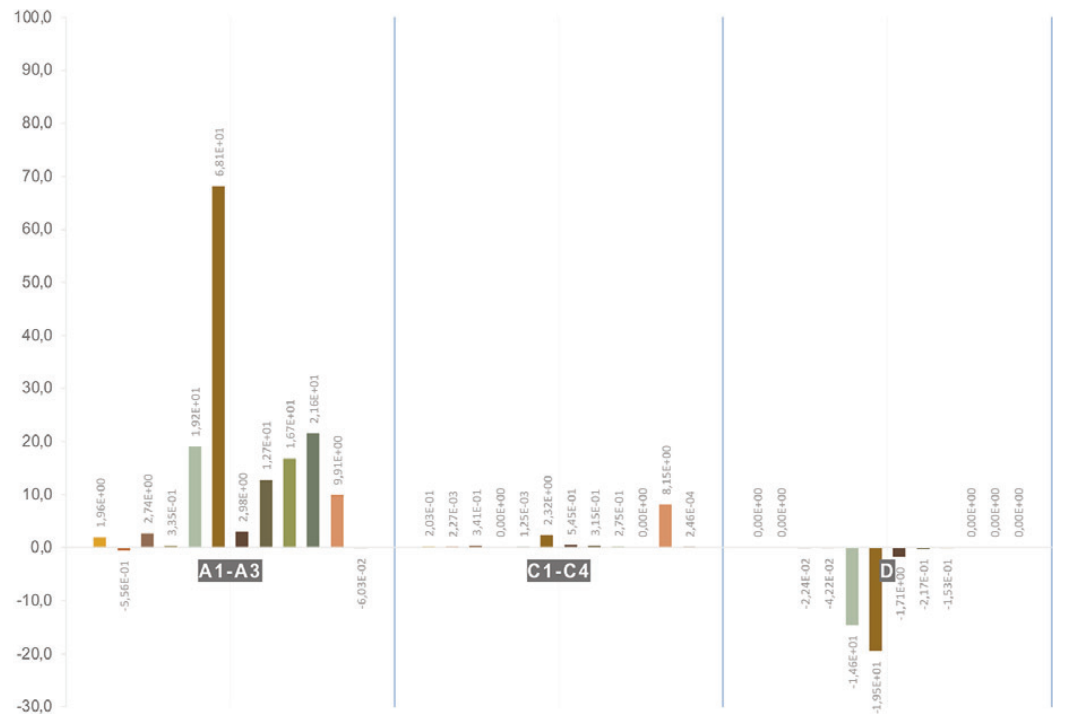
- definition of the end-of-life scenario of the ventilated façade, concerning the indications of criterion 2.4.14 of the building MEC, foreseeing that at least 70% by weight of the materials used in the solution be subject to selective disassembly and demolition

- at the end of its life and be able to be subjected to subsequent recycling;
- choice of relevant impact indicators to assess the environmental impact of the system studied;
- identification and collection of EPDs (Environmental Product Declarations) appropriate to the case study based on the performance and characteristics identified in the energy analysis;
- identification of the information on the disassembly of each façade component and related impact and scenario data in the EPDs previously analysed;
- performing life cycle assessment of the entire façade;
- evaluation of LCA results.

An LCA includes several indicators and parameters to quantify environmental impacts, especially

in the early stages of a project. However, parameters typically decrease to optimise the time and technical burden of calculating a complete LCA (Hur et alii, 2005).

In light of these premises and taking into account the indications that the EeBGuide (Gantner et alii, 2012), considered among the main operational guidelines for conducting an LCA in the present study, provides regarding the choice of indicators in the simplified analysis (Hollberg and Ruth, 2016), we chose to examine three of the leading LCA indicators declared by EPDs: 1) the Global Warming Potential (GWP), which expresses greenhouse gas emissions as tonnes of CO<sub>2</sub> equivalent; 2) the Total use of Renewable Primary Energy Resources (PERT), as the sum of renewable primary



**Fig. 13** | GWP results divided by LCA stage, ton CO<sub>2</sub>eq (credit: E. Palumbo, 2023).

**Fig. 14** | PERT and PERNT results divided by components – GJ (credit: E. Palumbo, 2023).

energy and primary energy resources used as raw materials (GJ); 3) the Total use of Non-renewable Primary Energy Resources (MJ; PENRT) includes non-renewable primary energy and primary energy resources used as raw materials (GJ).

The collection of EPDs followed the definition of LCA objectives and the selection of indicators from the leading European programme operators: EPD Italia, Institut Bauen und Umwelt, etc. V. (IBU) and EPD International. EPDs are the most suitable tools for identifying the environmental impacts of building materials based on LCA (Sposito and De Giovanni, 2023). The sorting of the Environmental Labels took into account the correspondence with the performance characteristics of the materials assessed for the energy part and the validity of the data as a deadline and geographical context. Only for the aluminium cladding did the data come from the EPD, verified by a third party, and published by European Aluminium.

Figure 13 shows the GWP results by life cycle phase. In contrast, Figure 14 shows the indicators of the total use of renewable primary resources (PERT) and non-renewable primary resources (PERNT) for the production phase only (A1-A3). In both cases, the contribution given by aluminium, both as cladding and as a window element, is preponderant in the production phase (A1-A3) to the other components analysed; this high incidence in the production phase is however, balanced by phase D, to be evaluated separately and concerning the benefits deriving from post-use recycling, which in the EPD studies were assumed to be 96% for façade cladding and 95% for window frames.

**Conclusions and future developments** | Although much work is still needed to achieve a built environment with minimal energy and carbon consumption and maximum resilience and comfort, the recent revision of the EPBD represents an important step towards sustainability and energy transition.

The broadening of decarbonisation targets to a broader framework of analysis, which is that of the entire life cycle of the built work, represents a challenge and an opportunity for all players in the construction supply chain, from designers to manufacturers to the contracting authority. It is a fundamental paradigm shift that leads to addressing the

issue of accounting and mitigation of emissions, referring to the production, construction and end-of-life phases, to which is added (as an independent module) phase D 'benefits and loads beyond the life cycle', which allows assessing the potential benefits and/or impacts related to circular processes of reuse, recovery or recycling (Giordano and Andreotti, 2023).

The introduction in Italy of MEC for the entrusting of design services represented an essential first step towards reducing the impacts of new construction, renovation, and maintenance of public buildings from a life cycle perspective. From the earliest stages of the work's conception, the designer reasoned and conceived the artefact from a different angle, that of Life Cycle Thinking.

Despite this, few studies are still analysing how integrating eco-design criteria, from an LCT perspective and in compliance with MEC in the redevelopment and construction of school buildings, can guide the designer to reduce consumption and environmental impacts.

In order to achieve the objective of wide dissemination of strategies aimed at reducing embodied energy and greenhouse gas emissions over the entire life cycle, it is necessary to work on experimental cases that can highlight the results achieved and clearly and transparently communicate the underlying evaluation process. Experiments must refer to ongoing international research investigating the development of methodologies, thresholds, and benchmarks, all essential to effectively reducing resource use and mitigating environmental impacts.

With this in mind, this study intends to show how to reach the nZEB target, guaranteeing adequate comfort conditions measurable in terms of PMV with appropriate simulation tools without sacrificing high environmental standards through the judicious choice of materials with appropriate EPD certificates that can be dry-assembled and assessed in terms of end-of-life reversibility.

The interdisciplinary methodological approach adopted in the case of the construction of new school buildings can be extended to broader building stock, including non-public buildings, providing an advancement in the definition of a metric for comparing environmental performance between build-

ings. Suppose the international direction (Zimmermann, Rasmussen and Birgisdóttir, 2023) is to develop a benchmarking system for determining sustainability levels based on target values. In this case, the results of this study can contribute to food for thought and open up scenarios for discussion within the scientific community.

Future developments will focus on implementing and managing integrated design aspects based on BIM modelling, as well as addressing the debated issue of the influence of different LCA data sources on the total impacts of the project in its different phases.

## Acknowledgements

The research presented results from the Research Agreement 2018/2022) ex-art.15 Law 07/08/1990 n. 241, between the Interuniversity Centre ABITA, the Department of Architecture and the Municipality of Pistoia, entitled 'Towards Zero Energy Buildings. Requalification of the existing building heritage: addresses and guidelines for public administrations', Scientific Responsible Prof. Paola Gallo. We thank all the participants in the Research Group and, in particular: A. Donato, L. Boganini and L. Della Rosa for collaborating in the design and energy simulation phases; A. Sore and E. Belardi for contributing to the creation of the graphic drawings accompanying the project; L. D. Cañete Riquelme for support in the preliminary phase of the LCA, i.e. for LCI data collection and EPD identification.

All the Authors contributed synergistically to the drafting of the article; however, the coordination for its drafting, the introductory paragraph, and the paragraphs 'Simplified LCA'

and 'LCA indicators and results' are to be attributed to E. Palumbo; the paragraph 'The Cino da Pistoia School project' is to be attributed to P. Gallo and R. Romano; the paragraph 'Energy analyses in dynamic regime' to R. Romano; the paragraph 'Conclusion and future development' to E. Palumbo and R. Romano.

The LCA survey and publication were financed by the Department of Department of Engineering and Applied Sciences of the University of Bergamo, through the project entitled 'Multicriteria Evaluation of Building Techniques and Systems for the Definition of Environmental Sustainability Strategies of Buildings' – Scientific Desponsible Dr. Arch. E. Palumbo.

## Notes

1) For more information, see the webpage: school-of-the-future.eu/ [Accessed 10 March 2024].

2) For more information, see the webpage: digital-strat-

egy.ec.europa.eu/en/library/veryschool-project [Accessed 10 March 2024].

3) For more information, see the webpage: renew-school.eu/en/home/ [Accessed 10 March 2024].

4) In particular, reference is made to the activities conducted within the School Architectures research aimed at analysing the broad issue of learning spaces to study the impact and effects that school environments can have on teaching and learning processes and, more generally, on the overall quality of school life. For more information, see the webpage: architetturescolastiche.indire.it [Accessed 10 March 2024].

5) In 2013, the MIUR published, while waiting for the technical specifications, the New Guidelines for School Construction to initiate paths of reflection on the relationship between space and learning and exploring new ways of using space: The novelties mainly concerned the description of the five paradigmatic spaces identified as significant models of learning environments, based on a 'performance' type of log-

ic that makes them versatile to learning objectives, provided that they use mobile, comfortable furniture, able to support differentiated teaching activities, often accompanied by the use of digital technologies. For more information, see the webpage: [indire.it/progetto/architetture-scolastiche/norme-tecniche/#:~:text=Scarica%20Linee%20guida%20MI-UR%3E%3E](http://indire.it/progetto/architetture-scolastiche/norme-tecniche/#:~:text=Scarica%20Linee%20guida%20MI-UR%3E%3E) [Accessed 10 March 2024].

## References

- Abdelaal, F. and Guo, B. H. W. (2022), "Stakeholders' perspectives on BIM and LCA for green buildings", in *Journal of Building Engineering*, vol. 48, article 103931, p. 1-11. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103931](https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103931) [Accessed 10 March 2024].
- Ansah, M. K., Chen, X., Yang, H., Lu, L. and Li, H. (2021), "Developing a tier-hybrid uncertainty analysis approach for lifecycle impact assessment of a typical high-rise residential building", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 167, article 105424, pp. 1-16. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105424](https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105424) [Accessed 10 March 2024].
- Birgisdóttir, H., Moncaster, A., Wiberg, A. H., Chae, C., Yokoyama, K., Balouktsi, M., Seo, S., Oka, T., Lützkendorf, T. and Malmqvist, T. (2017), "IEA EBC annex 57 evaluation of embodied energy and CO<sub>2</sub>eq for building construction", in *Energy and Buildings*, vol. 154, pp. 72-80. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.08.030](https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.08.030) [Accessed 10 March 2024].
- Cheong, C. Y., Brambilla, A., Gasparri, E., Kuru, A. and Sangiorgio, A. (2024), "Life cycle assessment of curtain wall facades – A screening study on end-of-life scenarios", in *Journal of Building Engineering*, vol. 84, article 108600, pp. 1-30. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.108600](https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.108600) [Accessed 10 March 2024].
- Dodd, N., Donatello, S. and Cordella, M. (2021), *Level(s) indicator 1.2 – Life cycle Global Warming Potential (GWP) – User manual – Introductory briefing, instructions and guidance (Publication version 1.1)*. [Online] Available at: [susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-01/UM3\\_Indicator\\_1.2\\_v1.1\\_37pp.pdf](https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-01/UM3_Indicator_1.2_v1.1_37pp.pdf) [Accessed 10 March 2024].
- Erhorn-Kluttig, H. and Erhorn, H. (2014), "School of the Future – Towards Zero Emission with High Performance Indoor Environment", in *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1468-1473. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.166](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.166) [Accessed 10 March 2024].
- European Commission (2020a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*, document 52020DC0662, 662 final. [Online] Available at: [eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662) [Accessed 10 March 2024].
- European Commission (2020b), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Europe's moment – Repair and Prepare for the Next Generation*, document 52020DC0456, 456 final. [Online] Available at: [eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%202020DC0456](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%202020DC0456) [Accessed 10 March 2024].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: [eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN) [Accessed 10 March 2024].
- European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652*, document 32023L2413, PE/36/2023/REV2. [Online] [eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32023L2413](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32023L2413) [Accessed 10 March 2024].
- Falana, J., Osei-Kyei, R. and Tam, V. W. Y. (2024), "Towards achieving a net zero carbon building – A review of key stakeholders and their roles in net zero carbon building whole life cycle", in *Journal of Building Engineering*, vol. 82, article 108223, pp. 1-20. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.108223](https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.108223) [Accessed 10 March 2024].
- Fetting, C. (2020), *The European Green Deal*, ESDN Report, December. [Online] Available at: [esdn.eu/fileadmin/ESDN\\_Reports/ESDN\\_Report\\_2\\_2020.pdf](https://esdn.eu/fileadmin/ESDN_Reports/ESDN_Report_2_2020.pdf) [Accessed 10 January 2024].
- Fufa, S. M., Skaar, C., Gradeci, K. and Labonnote, N. (2018), "Assessment of greenhouse gas emissions of ventilated timber wall constructions based on parametric LCA", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 197, part 1, pp. 34-46. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.006) [Accessed 10 March 2024].
- Galata, A., Brogan, M., Pedone, G., De Ferrari, A. and Roderick, Y. (2015), "The VERY School Project – Intelligent ISO 50001 Energy Management Decision Making in School Buildings", in Mahdavi, A., Martens, B. and Scherer, R. (eds), *ECPPM 2014 – eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction | Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling, Vienna Austria, 17-19 September 2014*, CRC Press, Leiden (The Netherlands), pp. 855-862. [Online] Available at: [eprints.sztaki.hu/8149/1/Galata\\_855\\_2796706\\_ny.pdf](https://eprints.sztaki.hu/8149/1/Galata_855_2796706_ny.pdf) [Accessed 09 May 2024].
- Gantner, J., Wittstock, B., Lenz, K., Fisher, M. and Sedlbauer, K. (2012), *EeBGuide Guidance Document – Part B – Buildings – Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative*. [Online] Available at: [cordis.europa.eu/project/id/285490/reporting](https://cordis.europa.eu/project/id/285490/reporting) [Accessed 10 March 2024].
- Giordano, R. and Andreotti, J. (2023), "DEC50 – Strumenti per la decarbonizzazione dei manufatti edilizi | DEC50 – Building decarbonisation tools", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 26, pp. 207-216. [Online] Available at: [doi.org/10.36253/TECHNE-14435](https://doi.org/10.36253/TECHNE-14435) [Accessed 10 March 2024].
- Hollberg, A. and Ruth, J. (2016), "LCA in architectural design – A parametric approach", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, issue 7, pp. 943-960. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/s11367-016-1065-1](https://doi.org/10.1007/s11367-016-1065-1) [Accessed 10 March 2024].
- Hur, T., Lee, J., Ryu, J. and Kwon, E. (2005), "Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system", in *Journal of Environmental Management*, vol. 75, issue 3, pp. 229-237. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.014](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.014) [Accessed 10 March 2024].
- IEA – International Energy Agency (2023), *World Energy Outlook 2023*. [Online] Available at: [iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf](https://www.iea.org/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf) [Accessed 10 March 2024].
- MITE – Ministero della Transizione Ecologica (2022), "Decreto 23 giugno 2022 – Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi (22A04307)", in *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 183 del 06/08/2022. [Online] Available at: [gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/08/06/22A04307/sg](https://gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/08/06/22A04307/sg) [Accessed 10 March 2024].
- Moazzen, N., Karagüler, M. E. and Ashrafian, T. (2021), "Comprehensive parameters for the definition of nearly zero energy and cost optimal levels considering the life cycle energy and thermal comfort of school buildings", in *Energy and Buildings*, vol. 253, article 111487, pp. 1-26. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111487](https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111487) [Accessed 10 March 2024].
- Palumbo, E. and Politi, S. (2018), "Efficientamento dell'involucro edilizio – Interazione tra energia inglobata ed energia operativa | Improving building envelope efficiency – Interaction between embedded energy and operational energy", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, pp. 247-257. [Online] Available at: [doi.org/10.13128/Techne-23039](https://doi.org/10.13128/Techne-23039) [Accessed 10 March 2024].
- Pantini, S. and Rigamonti, L. (2020), "Is selective demolition always a sustainable choice?", in *Waste Management*, vol. 103, pp. 169-176. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.12.033](https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.12.033) [Accessed 10 March 2024].
- Romano, R., Donato, A., Gallo, P. and Della Rosa, L. (2023), "Innovative design solutions for the school of the future – The case Study of the secondary school Cino da Pistoia in Italy", in Bustamante, W., Andrade, M. and Ortiz, P. E. (eds), *Will cities survive? The Future of Sustainable Buildings and Urbanism in the Age of Emergency – PLEA SATGO 2022 – Book of Proceedings Vol. 1*, PLEA, Santiago de Chile, pp. 788-793. [Online] Available at: [flore.unifi.it/retrieve/0a745a5b-d1e-4d8e-9a06-97451fb16acd/PROCEEDING-ONLINE-FINAL-MARZO%20%28trascinato%29.pdf](https://flore.unifi.it/retrieve/0a745a5b-d1e-4d8e-9a06-97451fb16acd/PROCEEDING-ONLINE-FINAL-MARZO%20%28trascinato%29.pdf) [Accessed 10 March 2024].
- Rondinel-Oviedo, D. R. and Keena, N. (2022), "Embodied Carbon – A call to the building industry", in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 1122, issue 1, article 012042, pp. 1-9. [Online] Available at: [doi.org/10.1088/1755-1315/1122/1/012042](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1122/1/012042) [Accessed 10 March 2024].
- Sposito, C. and De Giovanni G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: [doi.org/10.19229/2464-9309/1412023](https://doi.org/10.19229/2464-9309/1412023) [Accessed 10 March 2024].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2020), "Ambiente costruito e sostenibilità – Materiali riciclati e Design for Disassembly tra ricerca e buone pratiche | Built environment and sustainability – Recycled materials and Design for Disassembly between research and good practices", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 8, pp. 106-117. [Online] Available at: [doi.org/10.19229/2464-9309/8102020](https://doi.org/10.19229/2464-9309/8102020) [Accessed 10 March 2024].
- UNEP – United Nations Environment Programme (2023), *Keeping the promise*, Annual Report 2023. [Online] Available at: [wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44777/UNEP\\_Annual\\_Report\\_2023.pdf?sequence=19](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44777/UNEP_Annual_Report_2023.pdf?sequence=19) [Accessed 10 March 2024].
- UNI/TS 11300-1:2014, *Energy performance of buildings – Part 1 – Evaluation of energy need for space heating and cooling*. [Online] Available at: [store.uni.com/en/uni-ts-11300-1-2014](https://store.uni.com/en/uni-ts-11300-1-2014) [Accessed 10 March 2024].
- Zimmermann, R. K., Rasmussen, F. N. and Birgisdóttir, H. (2023), "Challenges in benchmarking whole-life GHG emissions from renovation cases – Evidence from 23 real-life cases", in *Energy and Buildings*, vol. 301, article 113639, pp. 1-11. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113639](https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113639) [Accessed 10 March 2024].