

ARTICLE INFO

Received	10 March 2026
Revised	11 April 2026
Accepted	13 April 2026
Published	30 June 2026

TRASFERIMENTO TECNOLOGICO AUTOMOTIVE-AEC

Framework DfMA e sistemi di facciata complessi

AUTOMOTIVE-AEC TECHNOLOGY TRANSFER

DfMA framework and complex façade systems

Ingrid Maria Paoletti, Giuseppe Conti, Giorgio Castellano,
Federica Pradella

ABSTRACT

Nel settore AEC è sempre più urgente individuare soluzioni capaci di coniugare sostenibilità ambientale, qualità progettuale e scalabilità produttiva, in un contesto segnato da trasformazioni ambientali e tecnologiche, carenza di manodopera qualificata e stagnazione della produttività. In questo scenario il trasferimento tecnologico dal settore automotive a quello delle costruzioni rappresenta una leva strategica per governare la complessità degli involucri edilizi. Il contributo propone un framework Design for Manufacturing and Assembly di derivazione automotive, applicato a un macrocomponente di facciata realizzato in Glass-fibre Reinforced Concrete e Wire Arc Additive Manufacturing. L'integrazione tra modellazione parametrica, ottimizzazione topologica e analisi di Life Cycle Assessment consente di ridurre la massa della sottostruttura, migliorandone l'efficienza materica e orientando il progetto verso soluzioni industrializzabili, scalabili e coerenti con i principi della circolarità.

In the AEC sector, there is an urgent need for solutions that integrate environmental sustainability, design quality, and production scalability. This urgency stems from a rapidly changing context marked by environmental and technological shifts, a shortage of skilled labour, and stagnant productivity. Transferring technology from the automotive to the construction sector serves as a strategic lever for managing the growing complexity of building envelopes. This paper introduces an automotive-derived Design for Manufacturing and Assembly framework. The framework is applied to a façade macro-component fabricated from Glass-fibre Reinforced Concrete and Wire Arc Additive Manufacturing. By integrating parametric modelling, topological optimisation, and Life Cycle Assessment, the approach reduces the substructure's mass. This improves material efficiency and guides the project towards industrialisable solutions that align with circularity principles.

KEYWORDS

trasferimento tecnologico, industrializzazione della complessità, sistemi di facciata, ottimizzazione topologica, valutazione del ciclo vita

technology transfer, industrialisation of complexity, façade systems, topological optimisation, life cycle assessment

Ingrid Maria Paoletti, Full Professor of Construction Technology at the Politecnico di Milano (Italy), is the founder of the Material Balance research group, dedicated to theoretical and design experimentation, where she works on innovative technologies and materials to develop a new responsible materials culture. E-mail: ingrid.paoletti@polimi.it

Giuseppe Conti is an Architect and Executive PhD Candidate at the Politecnico di Milano (Italy), in collaboration with Pininfarina. His research focuses on integrating DfMA strategies, with a particular emphasis on transferring technology from the automotive to the architectural sector. E-mail: giuseppe1.conti@polimi.it

Giorgio Castellano is a Researcher at the Politecnico di Milano (Italy). His research focuses on innovative building systems, bio-based materials, digital fabrication and distributed production models. E-mail: giorgio.castellano@polimi.it

Federica Pradella, PhD Candidate at the Politecnico di Milano (Italy), is a member of the Material Balance research group, where she focuses on processes and technologies for innovative, distributed production and construction. E-mail: federica.pradella@polimi.it



Nel settore Architettura, Ingegneria e Costruzioni (AEC) la domanda di soluzioni capaci di bilanciare sostenibilità ambientale, qualità progettuale e scalabilità produttiva è resa urgente dalla convergenza di fattori esogeni, quali trasformazioni ambientali, tecnologiche e sociali, e di fattori endogeni, tra cui la carenza di manodopera qualificata e la persistente stagnazione della produttività (de Matos Camarinha, Goulding and Peter, 2023). In questo scenario gli obiettivi delineati dall'Agenda 2030 delle Nazioni Unite (UN, 2015), in particolare il Sustainable Development Goal (SDG) 9 su 'Industria, innovazione e infrastrutture', evidenziano la necessità di una revisione radicale dei modelli di progettazione e di produzione dell'ambiente costruito (Pallumbo et alii, 2025).

Una modalità per affrontare tale transizione è riconoscere nel trasferimento tecnologico una leva per governare la complessità, già interpretata come passaggio strategico per l'innovazione in architettura (Paoletti, 2003) e oggi riletta alla luce delle dinamiche dell'Industry 4.0 (Alkhazaleh et alii, 2022): attingendo a settori che adottano un approccio sistemico questo studio introduce strumenti, criteri decisionali e logiche di processo capaci di integrare prestazioni, vincoli industriali e l'organizzazione della filiera (de Matos Camarinha, Goulding and Peter, 2023).

L'eccessiva frammentazione, dovuta anche a una progressiva specializzazione (Höweler, 2025), è tra i principali fattori che incidono sulla produttività del settore AEC; anche laddove siano disponibili strumenti digitali avanzati, questi vengono spesso adottati come supporto a compiti specialistici accentuando le discontinuità tra concept, progettazione esecutiva, produzione e cantiere (Vibæk, 2017) e indebolendo i cicli di feedback che, in un processo realmente integrato, consentirebbero di informare le scelte nelle prime fasi progettuali (Smith, Elliot and Grosskopf, 2017). A tali considerazioni si aggiunge il contributo del paradigma di Industria 5.0, che rilegge i processi produttivi in chiave integrata orientandoli verso una maggiore efficienza e flessibilità, con una più esplicita attenzione agli obiettivi di sostenibilità (Osello et alii, 2024).

Per la sua intrinseca multidisciplinarietà la progettazione degli involucri architettonici si configura come un processo complesso che coinvolge diversi stakeholder e ambiti di competenza. È in questo quadro che il contributo estende la nozione di 'componente' oltre la dimensione fisica (Richard, 2017), concependolo come un'entità producibile, assemblabile, manutenibile e disassemblabile. Accanto ai componenti materiali di una facciata possono infatti essere considerati 'componenti immateriali' i servizi di progettazione, i protocolli di verifica, i modelli computazionali, le procedure di controllo della qualità e i piani di manutenzione. In questa prospettiva il progetto diventa un'infrastruttura collaborativa, in cui la qualità dell'esito dipende dalla continuità tra le decisioni progettuali e i vincoli produttivi lungo l'intera filiera (Vibæk, 2017).

L'ambito di applicazione di questo studio riguarda la progettazione di facciate rivestite in Glass-fibre Reinforced Concrete (GRC), con particolare attenzione ai sistemi di connessione alla struttura portante principale dell'edificio. Per gestire la progettazione di tali componenti il contributo definisce un framework metodologico di derivazione automotiva, basato sui principi del Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), idoneo a quantificare la

complessità tramite metriche misurabili. Lo studio è articolato in parti tra loro complementari: una prima parte inquadra il trasferimento tecnologico dal settore automotive all'AEC, considerando il ruolo delle logiche DfMA stage-gate nello sviluppo di una nozione estesa di componente e una seconda parte approfondisce i sistemi di facciata in GRC, evidenziando la gerarchia tra involucro, sottostruttura e connessioni, nonché i limiti dei telai metallici standardizzati applicati a geometrie complesse. Viene quindi introdotto il framework metodologico della ricerca, che integra GRC, modellazione parametrica, ottimizzazione topologica, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) e Life Cycle Assessment (LCA).

Segue una parte applicativa dedicata alla definizione geometrica del modello digitale, alla simulazione strutturale preliminare e alla verifica del potenziale di riduzione della massa e dell'impatto ambientale della sottostruttura. Il contributo si conclude con una discussione critica dei risultati, dei limiti e degli sviluppi futuri, evidenziando il valore del framework come strumento per una progressiva ingegnerizzazione del componente. L'interesse scientifico della ricerca risiede nella formalizzazione di un protocollo trasferibile che integra, in un'unica struttura decisionale, il progetto, la produzione e la valutazione ambientale.

Stato dell'arte | Nel settore AEC la complessità non deriva soltanto dalla molteplicità dei componenti, ma anche dalla rete di relazioni che costituisce il sistema-progetto. In questa prospettiva le potenzialità del DfMA sono oggi ampiamente riconosciute; basti pensare al ruolo che Waqar et alii (2025) riconoscono ai Modern Methods of Construction (MMC), alla crescente attenzione del RIBA Plan of Work per l'integrazione tra fasi progettuali e costruttive (RIBA, 2020), nonché al concetto di piattaforma elaborato da Bryden Wood (2021), che propone una standardizzazione basata su interfacce, regole e processi. Ciò nonostante la diffusione più estesa di tali strategie resta limitata da alcuni ostacoli strutturali: l'isolamento dei sistemi, la frammentazione delle competenze e, soprattutto, la carenza di processi standardizzati in grado di mettere in relazione design e produzione in modo continuo e verificabile.

In questo scenario il settore automotive viene individuato come fonte di trasferimento tecnologico, in quanto industria caratterizzata da elevati livelli di complessità sistemica (Morbideucci, Polverino and Battaglia, 2023). In particolare la gestione della complessità è guidata da logiche di sviluppo del prodotto strutturate da strumenti di validazione progressiva (fasi e punti di controllo ben definiti) e da metodi orientati alla fabbricazione e all'assemblaggio, capaci di integrare requisiti prestazionali, vincoli produttivi e obiettivi ambientali. L'interesse per questo tipo di know-how non risiede nella trasposizione di tolleranze o di volumi produttivi dell'industria automobilistica, bensì nella possibilità di trasferire metodologie e strategie capaci di strutturare e gestire il passaggio alla scala industriale di componenti (Giovanardi et alii, 2024).

Se la facciata viene interpretata come un sistema integrato la sua industrializzazione deve basarsi su una standardizzazione di 'secondo livello', incentrata su logiche di processo: interfacce, sequenze di assemblaggio, criteri di verifica e scenari di fine vita. Tra i principi derivati da una gestione industriale rientrano inoltre la riduzione del numero di

componenti e la configurazione in macrocomponenti più facilmente assemblabili. Come per gli edifici l'architettura di un'automobile prevede infatti componenti strutturali che costituiscono lo scheletro ed elementi non strutturali che hanno funzione estetica e di protezione dagli agenti esterni (Samad and George, 2022).

A valle di questa distinzione l'integrazione tra struttura e involucro segue la logica del Body-in-White (BIW): l'insieme della scocca portante (Fig. 1) e delle sue principali sottostrutture è concepito come riferimento geometrico e prestazionale per tutte le parti successive (Onat, 2025). Questa logica costituisce un riferimento concettuale utile per ridurre la frammentazione, facilitare l'assemblabilità e controllare la convergenza tra i requisiti prestazionali e la dimensione identitaria dell'involucro (Manni and Valzano, 2023).

Operativamente, nell'industria automotive lo sviluppo di nuovi prodotti è governato da un processo articolato in più fasi che integra progettazione e ingegnerizzazione. Il processo stage-gate è un modello ricorrente suddiviso in fasi distinte, ciascuna conclusa da un punto di controllo in cui si prendono decisioni critiche di avanzamento sulla base di criteri verificabili (Ettlie and Elsenbach, 2007). La trasposizione critica di logiche con fasi e punti di controllo ben definiti e di metodi orientati al DfMA consente di anticipare le valutazioni di fattibilità e di ridurre le variazioni. I sistemi di facciata in GRC si rivelano particolarmente adatti a questo metodo, poiché pongono la questione progettuale tra complessità geometrica, standardizzazione dei componenti e necessità di integrazione tra progetto e produzione.

Il GRC è un composito cementizio rinforzato con fibre di vetro alcali-resistenti, impiegato in architettura per realizzare elementi sottili e relativamente leggeri rispetto al calcestruzzo tradizionale, con buona qualità superficiale e ampia libertà formale (Ahmad et alii, 2022). La sua diffusione nell'involucro edilizio è legata soprattutto alla possibilità di produrre pannelli a spessore ridotto, adatti a funzioni di rivestimento e protezione, con finiture controllate e variabilità estetica (Bentur and Mindeess, 2006).

Nella pratica contemporanea il GRC trova applicazione in diverse tipologie di sistema: a) pannelli di rivestimento non portanti per facciate ventilate, in cui il pannello costituisce la 'pelle' esterna e lavora in combinazione con una sottostruttura metallica e con strati funzionali retrostanti; b) pannelli isolati prefabbricati (sandwich o compositi), nei quali il GRC integra o coopera con uno strato isolante e, talvolta, con un secondo paramento o con una struttura di supporto, al fine di combinare finitura, protezione e prestazioni termo-igrometriche; c) sistemi a parete integrale o semi-integrale, in cui il GRC non è solo un rivestimento ma partecipa, con diversi gradi, alla composizione di un elemento di chiusura più complesso, includendo dispositivi di connessione, irrigidimenti, predisposizioni e dettagli per aperture, giunti e bordi.

Come riportato in Figura 2 è possibile distinguere in prima approssimazione una progressione che va da pannelli planari a pannelli a curvatura semplice, fino a pannelli a doppia curvatura e geometrie libere (Henriksen, Lo and Knaack, 2015). La complessità aumenta, tuttavia, soprattutto quando la geometria incorpora caratteristiche locali che trasformano il pannello in un dispositivo di interfaccia



Fig. 1 | BIW design and monocoque structure (credit: Kutz, 2011).

cia tridimensionale (Bishop and Wilson, 2011). In tali condizioni il pannello non è più un mero elemento di rivestimento, definito soltanto dalla configurazione della superficie esterna, ma un componente che deve coordinare simultaneamente i requisiti estetici e prestazionali con i vincoli della produzione (strategie di stampo, sformatura, tolleranze), della movimentazione e del montaggio (punti di presa, posizionamento, regolazione e sequenza di assemblaggio).

La ricerca assume come riferimento un sistema di pannello GRC del tipo 'stud frame' (Fig. 3), composto da una pelle monolitica di GRC accoppiata a un telaio metallico prefabbricato, che costituisce la sottostruttura portante e rappresenta l'interfaccia tra l'involucro e la struttura principale dell'edificio (Purslow, 1990). La gerarchia dei componenti può essere descritta come: a) pelle in GRC, priva di nervature interne e irrigidita soprattutto tramite un risvolto perimetrale utile anche per la tenuta dei giunti; b) telaio metallico costituito da montanti e correnti, spesso in profili a sezione cava; c) sistema di connessione pelle-telaio basato su due famiglie di ancoraggi, flessibili a 'L' e portanti.

Nel sistema a telaio la pelle in GRC funge da rivestimento, mentre la rigidità globale e il controllo geometrico sono affidati al telaio retrostante, costituito da profili metallici standard (montanti e correnti a griglia, spesso con passo regolare). Questa configurazione risulta efficace quando l'obiettivo è produrre e installare grandi superfici piane con un'interfaccia chiara con la struttura primaria. Tuttavia, in caso di curvature, il modello a telaio retrostante presenta un limite intrinseco: per seguire una geometria non planare il telaio deve essere adattato. L'impiego di elementi standardizzati, pur offrendo vantaggi in termini di scalabilità, comporta un sovradimensionamento materico del sistema, poiché la sottostruttura richiede una quantità di materiale non pienamente ottimizzata; da qui la necessità di esplorare una metodologia in grado di ridurre la massa, mantenendo invariati i punti di interfaccia e la logica di assemblaggio.

Nel contesto delle interfacce strutturali tra i pannelli di facciata in GRC e la struttura primaria dell'edificio l'impiego di tecnologie di Directed Energy Deposition (DED), in particolare di Wire Arc Addi-

tive Manufacturing (WAAM), consente di produrre componenti metallici con una libertà geometrica non vincolata dai limiti dei profili laminati. Diversi studi hanno dimostrato la fattibilità di realizzare elementi strutturali di grande scala mediante WAAM, come nel caso del ponte MX3D ad Amsterdam (Laghi et alii, 2023), nonché l'efficacia di approcci ibridi che combinano parti additivamente prodotte con elementi realizzati mediante tecnologie tradizionali (Raspall et alii, 2025). In particolare, Laghi, Savino e Gasparini (2025) propongono un approccio di 'ottimizzazione strutturale integrata' (Fig. 4) che integra l'ottimizzazione topologica, i vincoli di produzione per il WAAM e la verifica numerica.

Dal punto di vista dell'impatto ambientale il confronto tra travi in acciaio laminato a caldo e componenti WAAM ha evidenziato una riduzione delle emissioni di CO₂, a condizione che si ottenga un risparmio di massa pari almeno al 50% mediante l'impiego di tecniche di ottimizzazione topologica (Laghi, Savino and Gasparini, 2025).

Metodologia della ricerca e definizione del framework | Nello sviluppo del framework la ricerca individua quattro piani di approfondimento, selezionati per la loro pertinenza rispetto ad altrettanti temi: gestione della complessità geometrica, definizione dell'interfaccia tra pelle e struttura, applicazione di logiche DfMA, integrazione tra ottimizzazione, fabbricazione e valutazione ambientale. Il settore automotive, e in particolare la logica BIW, rappresenta la prima area semantica da cui trasferire strategie di interfaccia, pur in presenza di materiali, tempi e livelli di unicità profondamente differenti rispetto a quelli del settore AEC.

Il campo dei sistemi di facciata in GRC mostra invece come il materiale sia in grado di supportare elevate complessità geometriche, ma evidenzia anche che il principale nodo critico non riguarda la pelle in sé, bensì la sottostruttura e la risoluzione dell'interfaccia con la struttura portante. Ed è nell'interfaccia che si colloca la tecnologia WAAM, dove la complessità si concentra maggiormente e dove una fabbricazione additiva mirata può risultare metodologicamente ed economicamente più efficiente rispetto a un'applicazione estensiva. Infine gli studi che integrano l'ottimizzazione topologica,

la simulazione strutturale e l'efficienza materica, come l'approccio ibrido (Laghi et alii, 2023), forniscono un riferimento metodologico importante per collegare riduzione di massa, producibilità e impatto ambientale.

Il framework proposto in Tabella 1 è concepito come strumento trasferibile oltre gli obiettivi del presente studio: pur facendo riferimento a soluzioni tecniche specifiche, si fonda su una struttura di lavoro adattabile a diversi sistemi costruttivi, con le opportune modifiche. È possibile modulare i contenuti e gli strumenti di ciascuna fase in funzione del contesto, mantenendo invariata l'architettura decisionale e garantendo una progressiva integrazione della componente ingegneristica, supportata da punti di controllo che regolano il passaggio tra le fasi. Il framework viene utilizzato per gestire le diverse componenti del macrocomponente di facciata: pelle esterna, sottostruttura, sistema di connessioni, giunti e stratigrafie funzionali, nonché la logistica, la posa e gli scenari di manutenzione e di fine vita; all'interno di questa cornice metodologica il contributo specifico del presente studio si concentra sulla riduzione della massa e sulla valutazione LCA.

Nella fase iniziale di 'Concept Evaluation' il framework prevede la definizione degli obiettivi progettuali e la formalizzazione della complessità geometrica del pannello e delle interfacce strutturali. Vengono definiti il dominio di progetto, i requisiti architettonici e funzionali e i primi Indicatori Chiave di Prestazione (KPI) di producibilità e di assemblaggio. La fase di 'Concept Definition and Feasibility' introduce un modello di riferimento parametrico costituito da un pannello GRC e da un telaio, entrambi caratterizzati da un elevato grado di complessità geometrica, rispetto al quale si prevede l'integrazione selettiva della tecnologia WAAM. In questa fase sono previste analisi preliminari degli elementi finiti, si definiscono i vincoli per l'ottimizzazione topologica e si imposta il sistema di valutazione ambientale (LCA), includendo unità funzionali, confini del sistema e indicatori.

La validazione della fattibilità tecnica, produttiva e ambientale costituisce il criterio di accesso alle fasi successive. La fase di 'Development' comprende il nucleo ingegneristico del framework. Qui

si consolida il modello digitale, si applicano strategie di ottimizzazione topologica alla sottostruttura e si definisce l'architettura ibrida che integra WAAM ed elementi standardizzati. Le prestazioni della soluzione ottimizzata vengono confrontate con quelle della configurazione di riferimento in termini strutturali, materiali e ambientali, integrando strategie di Design for Disassembly (DfD). La validazione avviene tramite prototipazione, verificando la riduzione di massa, il comportamento strutturale e il miglioramento degli indicatori LCA. Superata la fase di sviluppo il processo entra nella fase di industrializzazione.

La fase di 'Tooling and Process Validation' verifica la ripetibilità del workflow produttivo attraverso il controllo dei tempi di ciclo, delle tolleranze dimensionali e dei consumi energetici. Contestualmente l'analisi LCA viene aggiornata sulla base di dati reali di processo per validare le ipotesi ambientali formulate nelle fasi precedenti. Segue la fase di 'Pre-Series' in cui si produce e si testa

una piccola serie di pannelli in condizioni operative, valutando l'installazione, il disassemblaggio, i danneggiamenti e la separabilità dei materiali. Questa fase consente di validare la robustezza del sistema e di consolidare le strategie DfD. Infine la fase di 'Ramp-Up' è orientata alla stabilizzazione dei KPI produttivi e ambientali, alla definizione degli standard finali delle interfacce e alla verifica della scalabilità del sistema. L'attenzione si sposta dalla singola configurazione ottimizzata alla capacità del processo di replicarsi su geometrie diverse, mantenendo costanti la qualità e le prestazioni, nonché il controllo del processo.

Un elemento caratterizzante del framework risiede nell'assumere lo sviluppo del componente come parte di una linea produttiva controllata, e non come esito isolato di una sequenza discontinua di operazioni. Ciò consente di considerare fin dalle fasi iniziali non solo la configurazione geometrica e strutturale del componente, ma anche l'ottimizzazione degli spostamenti, la prefabbricazione

ne, il trasporto e la posa in opera, riducendo così la frammentazione tipica della filiera AEC.

Applicazione del framework al caso studio | Negli ultimi due decenni l'ottimizzazione topologica si è affermata come uno degli strumenti computazionali più potenti per la progettazione strutturale avanzata, consentendo la distribuzione ottimale del materiale all'interno di un dominio progettuale in funzione di specifici vincoli prestazionali, quali la minimizzazione della cedevolezza strutturale o la limitazione della frazione volumetrica (Takezawa, Nishiwaki and Kitamura, 2010).

L'interesse per la progettazione 'leggera' si colloca oggi in un più ampio quadro di sostenibilità ambientale: la riduzione della massa strutturale comporta infatti una diminuzione del consumo di materiali primari e un abbattimento dei carichi energetici durante le fasi di produzione e d'uso. La maggior parte degli studi si è focalizzata sull'ottimizzazione monomateriale relativa a travi strutturali

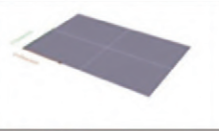
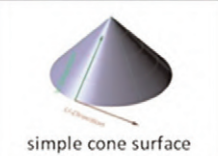
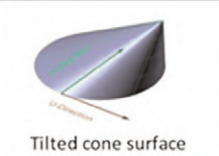
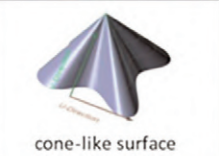
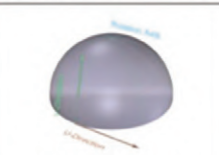
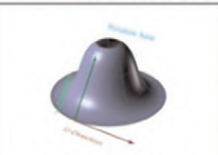
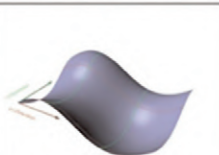
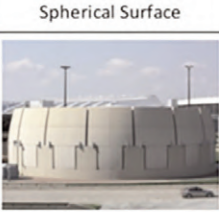
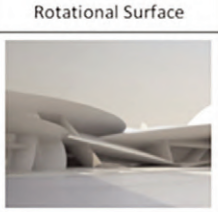
Flat surface				
				
Single curved surface	 Single Curved Surface	 simple cone surface	 Tilted cone surface	 cone-like surface
				
Double curved surface	 Spherical Surface	 Rotational Surface	 Translational Surface	
				
Freeform surface	 Truly Freeform Surfaces			
				

Fig. 2 | GRC panel complexity (source: Henriksen, Lo and Knaack, 2015).

(Damtsas et alii, 2025). Nel contesto della manifattura additiva metallica e, in particolare, del WAAM, questa relazione tra ottimizzazione topologica e sostenibilità ha assunto una rilevanza crescente.

Lo studio propone l'integrazione di tecniche di ottimizzazione topologica e di processi WAAM all'interno del framework descritto, con l'obiettivo di sviluppare componenti strutturali ibridi GRC-WAAM in grado di ridurre in modo significativo la massa rispetto ai telai metallici standardizzati, migliorando l'efficienza materica dell'interfaccia e ottimizzando la distribuzione delle sollecitazioni lungo le traiettorie di carico. Tale riduzione di massa si inserisce in un approccio il cui beneficio ambientale è misurabile in termini di riduzione delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita del componente.

L'applicazione del framework prende avvio da un modello base, inteso come configurazione strutturale tecnicamente realizzabile secondo le tecniche costruttive correnti e coerente con la logica costruttiva del sistema. La sezione mostrata in Figura 5 illustra una configurazione tipica in cui la facciata si innesta su una soletta in calcestruzzo e su un cordolo perimetrale. In questo tipo di sistemi la geometria della sezione può variare in funzione delle scelte architettoniche e delle condizioni di progetto: per gestire tale variabilità geometrica è stato sviluppato, tramite Grasshopper, un modello parametrico (Figg. 6, 7) per controllare i parametri morfologici dell'interfaccia di facciata, quali curvatura, inclinazione e continuità superficiale, mantenendo invariata la gerarchia dei componenti del sistema.

L'involucro in GRC riferito al macrocomponente studiato presenta una superficie complessiva di circa 6 m² e uno spessore nominale di 24 mm, per un volume di circa 0,14 m³. Assumendo una densità media di 2.400 kg/m³, la massa del pannello è compresa tra 336 e 346 kg, corrispondente a un peso proprio di circa 3,3-3,4 kN; tale valore rappresenta il carico principale trasferito dalla pelle esterna alla sottostruttura metallica. A partire dal modello parametrico è stata quindi condotta un'analisi di simulazione strutturale utilizzando l'ambiente di calcolo Intact Simulation, integrato nello stesso workflow parametrico.

Il dominio strutturale è stato discretizzato mediante una rappresentazione voxel, adeguata a una fase preliminare di concept e finalizzata all'identificazione dei principali percorsi di trasferimento del-

le azioni all'interno del sistema. Nel modello sono stati applicati due carichi equivalenti: un carico gravitazionale verticale pari a 3,3 kN, rappresentativo del peso proprio del pannello in GRC, e un carico orizzontale pari a 4,7 kN, derivato da una pressione del vento semplificata applicata alla superficie del macrocomponente. L'analisi ha consentito di calcolare diversi campi tensionali e deformativi; tra questi, la densità di energia di deformazione (Fig. 8) è stata utilizzata come parametro principale per l'interpretazione del comportamento strutturale del sistema. La sensibilità topologica (Fig. 9) mostra invece le regioni di maggiore rilevanza strutturale, informazione che costituisce la base per la fase di ottimizzazione topologica.

Risultati e confronto tra modello base e configurazione ottimizzata | Dal punto di vista quantitativo il volume strutturale iniziale pari a 0,1716 m³ è stato ridotto a 0,137 m³, corrispondente a una riduzione complessiva di materiale pari a circa il 20% (Figg. 10, 11).

La Tabella 2 sintetizza i principali parametri fisici del confronto tra il modello di riferimento e la configurazione ottimizzata, evidenziando gli effetti della riduzione di massa sulla sottostruttura metallica. Studi precedenti indicano che valori compresi tra il 30% e il 50% consentono generalmente di ottenere configurazioni strutturali realistiche mantenendo la continuità dei percorsi di carico (Bendsoe and Sigmund, 2004). Nel presente studio è stata adottata una riduzione del volume inferiore rispetto a quella generalmente riportata in letteratura. Questa scelta conservativa non deriva da una calibrazione strutturale definitiva e, per questo motivo, è stata introdotta a titolo esplorativo nella fase preliminare del framework metodologico proposto, con l'obiettivo di indagare il potenziale di riduzione di massa del sistema e di individuare i principali percorsi di trasferimento delle azioni.

È stata condotta una valutazione ambientale preliminare mediante analisi LCA per confrontare l'impatto climatico incorporato nella sottostruttura metallica di interfaccia in due configurazioni del medesimo macrocomponente: 1) una configurazione di riferimento, corrispondente al componente non ottimizzato; 2) una configurazione derivata da un'ottimizzazione topologica, ritenuta producibile tramite WAAM. Il rivestimento in GRC è considerato invariato tra le alternative (336 kg in entrambi i casi) e

pertanto escluso dal confronto principale sulla sottostruttura, poiché non discriminante rispetto all'obiettivo nella fase iniziale dello studio. L'analisi è impostata secondo i principi e i requisiti delle norme ISO 14040 e ISO 14044 (ISO 2006a; 2006b) ed è riportata come studio cradle-to-gate, coerente con l'impostazione modulare A1-A3 di EN 15804 (CEN, 2019) e con il quadro metodologico di EN 15978 (CEN, 2011).

Il modello è implementato in SimaPro Faculty 10 utilizzando il database ecoinvent 3, con il cut-off system e il metodo LCIA ReCiPe 2016 Midpoint (H). L'indicatore considerato è esclusivamente il Global Warming Potential (GWP, in kgCO₂eq). L'Unità Funzionale (FU) è definita come un macrocomponente di interfaccia per pannello, con dimensioni di 2,4 m × 1 m. Il confronto assume l'equivalenza funzionale tra le due alternative sebbene la configurazione ottimizzata non sia stata sottoposta a una validazione strutturale completa. In questa fase l'LCA è utilizzata come strumento di analisi per verificare la plausibilità del compromesso tra la riduzione della massa e l'incremento dell'energia di processo.

L'inventario utilizzato si limita ai contributori dominanti del GWP: per la configurazione di riferimento il processo è modellato come input di 1.347 kg di acciaio a bassa lega; la configurazione ottimizzata è invece modellata con un input di 1.076 kg di acciaio a bassa lega e di 150 kWh di elettricità di processo, assunti come valori dell'energia necessaria per la deposizione WAAM. In entrambi i casi il risultato è definito come un'unità del macrocomponente. I dataset utilizzati sono: Steel, low-alloyed 'GLO | market for steel, low-alloyed | Cut-off', S per l'acciaio ed 'Electricity', medium voltage {RER}' per l'elettricità di processo. Il perimetro include quindi: a) la produzione del materiale metallico (A1-A3 per l'acciaio); b) il consumo di elettricità di processo per la deposizione WAAM. Sono invece esclusi: trasporto in cantiere e installazione (A4-A5); uso, manutenzione e sostituzione (B); fine vita (C); crediti oltre i confini del sistema (D); consumabili ausiliari non ancora quantificati in modo robusto, quali gas di protezione, utensili o post-elaborazione.

I risultati riportati in Tabella 3 mostrano che il GWP della configurazione baseline è pari a 2.783,45 kg CO₂eq/FU, mentre quello della configurazione ottimizzata, realizzabile tramite WAAM, è pari a 2.273,60 kg CO₂eq/FU, con una riduzione assoluta

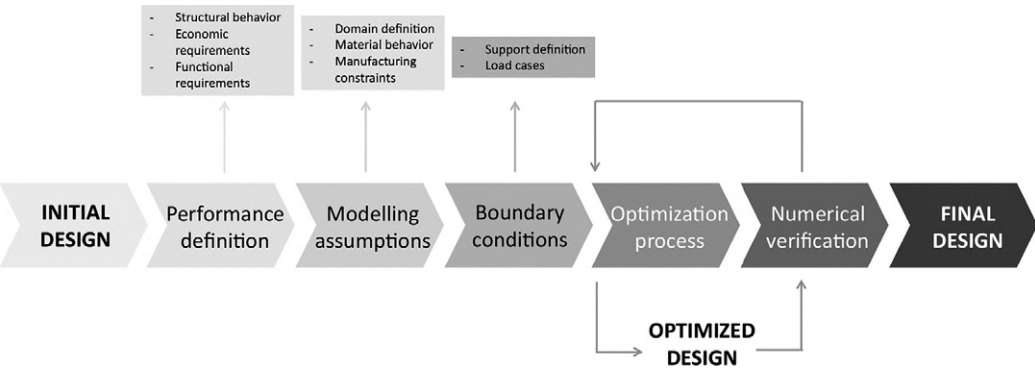
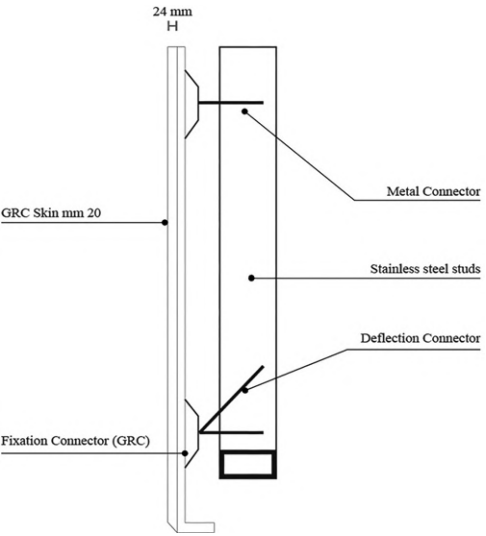


Fig. 3 | GRC: stud frame technological solution (credit: the Authors, 2024).

Fig. 4 | Conceptual flowchart of the mixed approach to structural optimisation (source: Laghi et alii, 2023).

di circa 509,85 kgCO₂eq e una riduzione relativa di circa 18,3%. In termini di massa la riduzione del frame metallico è pari a 271 kg, ossia circa il 20%.

In seconda analisi, al fine di contestualizzare l'effetto della riduzione della sottostruttura metallica rispetto all'intero macrocomponente, è stata sviluppata una stima addizionale includendo anche il rivestimento, il cui contributo è stato assunto pari a 336 kg/FU in entrambe le alternative, garantendo la neutralità del confronto rispetto a tale componente. In assenza di un dataset specifico per pannelli in GRC nel database selezionato, il rivestimento è stato modellato mediante il dataset 'fibre cement facing tile', large format {RoW} | fibre cement tile production, large format | Cut-off, S, adottato come proxy tecnologicamente coerente per gli elementi di rivestimento cementizio fibrorinforzato.

Sono stati quindi definiti due processi aggregati: 1) configurazione baseline completa, costituita da 1.347 kg di acciaio a bassa lega e 336 kg di rivestimento; 2) configurazione ottimizzata completa, costituita da 1.076 kg di acciaio a bassa lega, 336 kg di rivestimento e 150 kWh di elettricità di processo per la deposizione WAAM. I risultati mostrano che il GWP del macrocomponente completo passa da 3.259,55 kgCO₂eq/FU per la configurazione baseline a 2.749,69 kgCO₂eq/FU per la configurazione ottimizzata, corrispondendo a una riduzione assoluta di circa 509,85 kgCO₂eq e a una riduzione relativa di circa il 15,6%.

Rispetto ai risultati della sola sottostruttura l'inclusione del rivestimento determina dunque una riduzione percentuale attenuata, pur mantenendo invariato il beneficio assoluto. Rispetto al contributo della sottostruttura metallica il rivestimento contribuisce per circa 476 kgCO₂eq/FU, configurandosi come secondo fattore determinante dell'impatto complessivo. L'analisi dei contributi conferma che la produzione dell'acciaio rimane la principale fonte di GWP complessivo, con un'incidenza compresa tra l'81% e l'85%, mentre il rivestimento contribuisce per circa il 15-17%; il contributo dell'elettricità di processo associata alla WAAM risulta invece marginale su scala di macrocomponente. Trattandosi di una stima preliminare basata su un dataset rappresentativo del rivestimento in GRC, i risultati devono essere interpretati come indicativi e finalizzati soprattutto a esplicitare il peso relativo della sottostruttura rispetto al componente completo.

Studi LCA su tecnologie WAAM adottano frequentemente confini di sistema ristretti, spesso di tipo gate-to-gate, per isolare il contributo dei fattori di processo più rilevanti (Shah et alii, 2023). L'obiettivo non è la quantificazione completa del ciclo di vita del prodotto, bensì la comprensione dei compromessi tra l'uso efficiente del materiale e il fabbisogno energetico del processo. Rispetto a tale impostazione il presente studio adotta un perimetro leggermente più ampio, includendo non soltanto l'elettricità di processo, ma anche la produzione di acciaio. Tale scelta è coerente con il fatto che il confronto non riguarda due sole varianti di deposizione, bensì due configurazioni dello stesso componente con masse metalliche diverse; in questo caso, infatti, la variabile più importante non è il processo additivo in sé, ma la relazione tra la riduzione di massa e il carico energetico di deposizione.

La letteratura su WAAM evidenzia inoltre che la modellazione dei beni strumentali e delle infrastrutture di processo è spesso esclusa o trattata in modo semplificato, poiché l'allocazione degli im-

patti sulla vita utile, sulla produttività e sui tassi di utilizzo delle attrezzature introduce un elevato grado d'incertezza (Spreafico, Kokare and Godina, 2026). Analogamente, per componenti ancora in fase di sviluppo, alcune fasi quali trasporto, installazione, uso e fine vita vengono demandate a sviluppi futuri, quando le geometrie, le prestazioni e gli scenari di implementazione risultano più stabilizzati. In questo senso la scelta di presentare l'analisi LCA limitata ad A1-A3 è metodologicamente coerente con la maturità attuale del caso di studio e con il posizionamento del contributo nella fase di 'Concept Definition and Feasibility'.

Per verificare la sensibilità del risultato rispetto a possibili incrementi del fabbisogno energetico della deposizione additiva sono stati definiti due scenari aggiuntivi mantenendo costante la massa di acciaio della configurazione ottimizzata (1.076 kg/FU) e variando unicamente il consumo di elettricità di processo a 225 kWh/FU e 300 kWh/FU (Tab. 4). I risultati mostrano che il GWP della sola sottostruttura ottimizzata passa da 2.273,60 kgCO₂eq/FU nello scenario nominale (150 kWh/FU) a 2.298,67 kgCO₂eq/FU nello scenario +50% energia e a 2.323,74 kgCO₂eq/FU nello scenario +100% energia.

Se il confronto viene esteso al macrocomponente completo, il GWP passa da 2.749,69 kgCO₂eq/FU nello scenario nominale a 2.774,76 kgCO₂eq/FU nello scenario +50% energia e a 2.799,83 kgCO₂eq/FU nello scenario +100% energia. Sebbene il GWP aumenti in modo coerente con l'aumentare dell'energia di processo, la configurazione ottimizzata resta ambientalmente preferibile rispetto alla baseline in tutti gli scenari analizzati: ciò conferma che il fattore principale dell'impatto climatico è la produzione di acciaio, mentre l'energia di deposizione additiva incide come parametro secondario. Il beneficio ambientale osservato risulta pertanto principalmente legato alla riduzione della massa metallica del componente. Per individuare le condizioni in cui la soluzione ottimizzata risulta ambientalmente preferibile, viene definita una semplice condizione di soglia basata sul bilancio tra massa risparmiata ed energia aggiuntiva:

$$(m_{\text{baseline}} - m_{\text{optimized}}) \times EF_{\text{steel}} > E_{\text{WAAM}} \times EF_{\text{el}}$$

dove: $m_{\text{baseline}} - m_{\text{optimized}} = 271$ kg; EF_{steel} è il fattore emissivo associato al dataset dell'acciaio; E_{WAAM} è il consumo elettrico del processo; EF_{el} è il fattore emissivo associato al dataset elettrico adottato.

Nel caso di studio analizzato i risultati mostrano che la riduzione di 271 kg di acciaio è sufficiente a mantenere la configurazione ottimizzata, preferibile dal punto di vista del GWP, anche in presenza di un raddoppio dell'elettricità di processo, passando da 150 a 300 kWh. Il risultato indica quindi che, entro i confini di sistema adottati, il vantaggio climatico della soluzione ottimizzata è robusto rispetto a variazioni plausibili del carico energetico della deposizione. La soglia non deve essere interpretata come una proprietà intrinseca della WAAM, bensì come una condizione metodologica: il processo additivo risulta ambientalmente vantaggioso solo quando consente una riduzione di massa tale da compensare l'energia aggiuntiva richiesta.

Conclusioni, limiti della ricerca e sviluppi futuri
| La ricerca ha esplorato il potenziale di trasferimen-

to tecnologico tra i settori automotive e AEC, proponendo un framework metodologico basato sui principi DfMA. In questa prospettiva la fase applicativa del contributo ha come obiettivo principale la definizione di una struttura di processo capace di integrare, in modo progressivo e verificabile, esigenze architettoniche, vincoli produttivi, criteri di assemblaggio, valutazioni ambientali e ipotesi di industrializzazione, anziché la validazione completa del componente ottimizzato.

Dal punto di vista dei limiti l'equivalenza funzionale tra la configurazione di riferimento e quella ottimizzata è assunta a livello concettuale, necessitando di verifica mediante analisi strutturali complete o prototipi fisici. La producibilità mediante WAAM è ancora legata alla letteratura e non è stata verificata rispetto a vincoli di deposizione, tolleranze, finitura, tempi di processo e requisiti di certificazione.

L'analisi LCA preliminare mostra che la configurazione ottenuta mediante ottimizzazione topologica presenta un GWP inferiore rispetto a quello della configurazione di riferimento. Tale risultato, principalmente associato alla riduzione della massa metallica del frame, deve tuttavia essere letto alla luce di alcune limitazioni: l'equivalenza funzionale tra configurazione di riferimento e ottimizzata è assunta a livello di concept e non ancora validata mediante verifiche strutturali complete; il perimetro limitato ad A1-A3 esclude contributi potenzialmente rilevanti quali trasporto, installazione, uso, manutenzione, disassemblaggio e fine vita; infine il modello non include ancora consumabili di processo, gas di protezione o eventuali post-lavorazioni.

Sul piano dell'adozione la diffusione di questo approccio orientato alla fabbricazione incontra inoltre alcune barriere strutturali del settore AEC, tra cui i costi ancora elevati delle tecnologie additive metalliche che ne ostacolano l'integrazione, la limitata standardizzazione, la necessità di procedure di controllo e certificazione ancora in evoluzione, nonché la frammentazione della catena di approvvigionamento. A tali criticità si aggiungono ostacoli di natura culturale e organizzativa, legati alla difficoltà di superare la separazione tra progettazione, simulazione e produzione, nonché ostacoli informativi dovuti alla limitata disponibilità di dati affidabili sui consumi reali di processo, sugli scenari di fine vita e sui benefici ambientali misurabili nelle prime fasi decisionali.

In termini di trasferibilità la combinazione tra modellazione parametrica, simulazione strutturale, ottimizzazione topologica e analisi LCA ha mostrato come sia possibile orientare, già nella fase di 'Concept Definition and Feasibility', le decisioni progettuali verso una maggiore efficienza materiale, collocando lo studio in coerenza con gli obiettivi dell'SDG 9. In modo complementare la ricerca intercetta l'SDG 12 attraverso la riduzione della massa del componente, l'attenzione all'efficienza materiale, l'impiego dell'analisi LCA come supporto alle decisioni e l'integrazione di logiche orientate al Design for Disassembly e alla prefabbricazione controllata. Più indirettamente lo studio dialoga con l'SDG 13, in quanto la riduzione del GWP costituisce un indicatore preliminare di beneficio climatico, e con l'SDG 11, poiché l'innovazione dei sistemi di involucro può contribuire, in modo mediato, a una maggiore qualità, manutenibilità e sostenibilità dell'ambiente costruito.

I futuri sviluppi dovranno quindi concentrarsi sulla validazione strutturale del componente otti-

Phase	Content	Deliverable	Monitored KPIs	Gate criteria (go/no-go)
1. Concept Evaluation	WP1 Definition of objectives and definition of complexity (panel curvature + interface geometry)	D1.1 Architectural / functional requirements (insulated or non-insulated cladding panel, integrated systems)	KPI panel (Manufacturing feasibility) Mold complexity (0–10) Demouldability (number of undercuts) Minimum radius and risk of critical edges (mm)	Complexity formalized into measurable constraints Geometry compatible with production / assembly principles Defined and traceable KPIs
		D1.2 Geometric “design space” (geometry, system typology, connections, and interfaces) D1.3 Initial exploratory prototypes (ABS/PLA) D1.4 Definition of complexity criteria	KPI interface (Manufacturing feasibility) Feasibility with standardized elements (go/no-go) Complexity of the load path: weight → gravity, wind → flexure (go/no-go) Variety of typological connections with the panel and primary structure (no. of typologies) KPI component (Assembly / Disassembly strategies): Parts per component (no.) Fasteners (no.) Transport compatibility (go/no-go) Share of on-site vs. off-site work (low / medium / high)	
2. Concept Definition & Feasibility	WP2 Baseline model GRC panel + stud frame + interfaces	D2.1 Geometric baseline of the component (v0): Reference dimensions Parameterization of complexity features Panel stratigraphy and thicknesses Interface and connection layout	KPI panel Mold definition (go/no-go) Maximum panel deformation (δ_{max} , mm) Estimated panel mass (kg/m ²)	Panel geometry and manufacturability (Panel readiness) Interfaces and constraint scheme Process, scalability, and sustainability
		D2.2 WAAM Integration List of functions suitable for WAAM Definition of standard elements (plates, bolting) D2.3 Preliminary engineering feasibility package: Preliminary FEA (v1) D2.4 Process hypothesis related to integration with WAAM technology General WAAM sequence (material / thickness; range / tolerances) D2.5 Preliminary samples/tests to confirm the geometric feasibility of the interfaces in WAAM D2.6 LCA setup Functional unit (e.g. 1 m ² of façade / 1 typical panel / service life) System boundaries (cradle-to-gate / cradle-to-site / cradle-to-grave) Selected indicators (e.g. GWP + primary energy + 1–2 additional indicators) Data collection plan for WAAM (energy, waste, material) and for standard GRC / steel D2.7 Definition of geometric and load constraints for topology optimisation D2.8 Risk analysis	KPI interface Layout fixed (go/no-go) Level of standardization (number of connection typologies) Topology optimization problem defined: objective + constraints + non-design regions + load conditions (go/no-go) KPI component LCA setup completed (go/no-go) Estimated on-site work (low / medium / high) Transportability verified (go/no-go + limits) DfD feasibility (low / medium / difficult)	

Tab. 1a | Conceptual framework (credit: the Authors, 2026).

Phase	Content	Deliverable	Monitored KPIs	Gate criteria (go/no-go)
3. Development	WP3.1 Consolidation of the digital model		Technical KPIs (performance)	
	WP3.2 Topology optimization of the substructure (core engineering)		Δ mass (kg/m ² and %) — frame and total component $\delta_{\max}$ (mm) — baseline vs. optimized (and $\Delta\%$)	
	WP3.3 Definition of the hybrid WAAM + standard elements architecture	D3.1 Optimized model (baseline vs top-opt.)	DfMA KPIs (assembly/scalability)	
	WP3.4 Comparative structural assessments (baseline vs optimised)	D3.2 Final engineering assessments (FEA v2) with baseline vs. optimized comparison	Δ part count (no.) and Δ fastener count (no.) Estimated assembly time (min/panel) — factory vs. site Standardization ratio (% mass or % standard parts vs. WAAM/custom)	Top-opt + hybrid architecture produce a measurable improvement: Δ mass < 0 (reduction), or a trade-off justified by LCA / performance
	WP3.5 Development of the DfMA strategy (assembly) and process update	D3.3 DfMA strategy + assembly workflow	DfD KPIs (end of life)	
	WP3.6 DfD (Design for Disassembly) strategy integrated with geometry and interfaces	D3.4 DfD (Design for Disassembly) strategy	DfD rating (low / medium / high feasibility) with explicit criteria: access, reversibility, material separation Potential separability (% recoverable metal/scenario)	Engineering performance validated Comparative LCA v1 completed
	WP3.7 Comparative LCA (baseline vs. optimized) and improvement loop	D3.5 Preliminary comparative LCA (baseline vs optimised) D3.6 Mock-up / functional prototype (defined level)	LCA KPIs (comparative)	DfD strategy defined
	WP3.8 Prototyping / mock-up and 'fit-for-assembly' validation	D3.7 Updated risk register (v1)	Δ GWP (kgCO ₂ e/m ² and %) — baseline vs. optimized Δ primary energy (MJ or kWh eq/m ² and %)	
	WP3.9 Risk register update and decision on the variant		WAAM manufacturability KPIs (capability) Validated WAAM interfaces (yes/no) — fit-up and tolerances (mock-up)	
4. Tooling & Process Validation	WP4 Production validation: WAAM workflow + GRC casting + assembly (jig, QC, repeatability)	D4.1 Process sheet	KPI Process	Repeatable and transferable process
		D4.2 Tooling	Cycle time (min/panel) for WAAM, casting, and assembly	Quality under control
		D4.3 QC control plan	Waste (%); repeatability (dimensional tolerances, mm)	Documentation ready
		D4.4 Rigging/installation plan	Pull-out / connection strength (kN, if tested)	Updated LCA consistent with real process data
		D4.5 LCA updated with real process data	Process energy (kWh/panel) Updated LCA (indicators per functional unit, e.g. 1 m ² / panel)	Readiness for pre-series
5. Pre-Series	WP5.1 Small series WP5.2 Field tests (installation, maintenance, disassembly)	D5.1 Production of n panels	KPI Pre-series	Repeatability demonstrated
		D5.2 Final mock-up	Yield (compliant parts / produced parts)	Robust installation
		D5.3 Field tests	Installation time (min/panel) and number of operators	Verifiable disassembly
		D5.4 DfD validation on sample	Disassembly time (min) + % metal / matrix separability	Remaining critical issues mapped
		D5.5 Installation / maintenance manuals	Handling damage (%) Near-final LCA with real logistics	Readiness for scaling
6. Ramp-Up	WP6 Scalability and stabilization (KPIs, stakeholder feedback, lessons learned)	D6.1 Testing under real conditions	KPI Production	Smooth transition to full-scale; stable KPIs
		D6.2 Production KPIs; client / manufacturer Feedback	Stabilized KPIs: quality (defects/100), time, waste estimated cost (€/m ² or €/panel, if available)	Documented and implementable system
		D6.3 Final interface standards	in-service performance (inspections) final LCA	Framework transferable to other cases with standard interfaces
		D6.4 Final LCA + recommendations	EoL scenarios; stakeholder feedback score	

Tab. 1b | Conceptual framework (credit: the Authors, 2026).

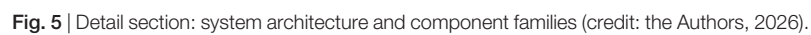




Fig. 6 | Macrocomponent (credit: the Authors, 2026).

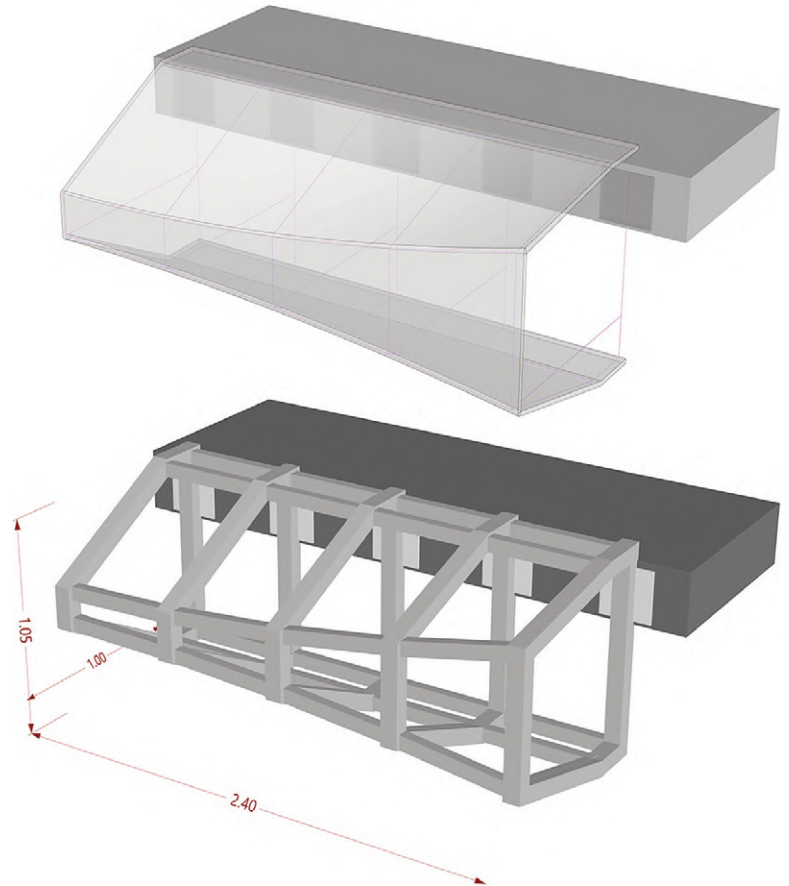


Fig. 7 | Macrocomponent: type module with a length of 2,40 m and a maximum depth of 1,00 m (credit: the Authors, 2026).

mizzato, sulla verifica della sua producibilità reale mediante WAAM e sull'estensione dell'analisi ambientale a ulteriori contributi di inventario e alle fasi A4–A5, B e C. Nel complesso, la ricerca evidenzia che il potenziale ambientale della soluzione ottimizzata non dipende dalla sola adozione della tecnologia additiva, bensì dalla sua capacità di rendere producibili configurazioni a maggiore efficienza materica. Più che affermare la superiorità di una tecnologia, lo studio propone una linea metodologica basata su un approccio sistemico, in cui il DfMA consente di mantenere centrale il ruolo del progetto e di affrontare la complessità del componente su più livelli: geometrico, tecnologico, produttivo e ambientale.

In the Architecture, Engineering and Construction (AEC) sector, the demand for solutions capable of balancing environmental sustainability, design quality and production scalability is made urgent by the convergence of exogenous factors, such as environmental, technological and social transformations, and endogenous factors, including the shortage of skilled labour and persistent productivity stagnation (de Matos Camarinha, Goulding and Peter, 2023). Against this backdrop, the goals outlined in the United Nations' 2030 Agenda (UN, 2015), in particular Sustainable Development Goal (SDG) 9 on 'Industry, Innovation and Infrastructure', highlight the need for a radical overhaul of the design and production models of the built environment (Palumbo et alii, 2025). One way to deal with this transition is to recognise technology transfer as a lever to govern complexity, already interpreted as a strategic step for innovation in architecture (Paoletti, 2003) and today reinterpreted in the light

of Industry 4.0 dynamics (Alkhazaleh et alii, 2022): by drawing on sectors that adopt a systemic approach, this study introduces tools, decision-making criteria and process logics capable of integrating performance, industrial constraints and the organisation of the supply chain (de Matos Camarinha, Goulding and Peter, 2023).

Excessive fragmentation, also due to progressive specialisation (Höweler, 2025), is among the main factors affecting productivity in the AEC sector. Even where advanced digital tools are available, these are often adopted as support for specialised tasks, accentuating discontinuities between concept, executive design, production and construction site (Vibæk, 2017) and weakening the feedback loops that, in a truly integrated process, would enable choices to be informed in the early stages of design (Smith, Elliot and Grosskopf, 2017). Added to these considerations is the contribution of the Industry 5.0 paradigm, which reinterprets production processes from an integrated perspective, orienting them towards greater efficiency and flexibility, with a more explicit focus on sustainability objectives (Osello et alii, 2024).

Due to its inherently multidisciplinary nature, the design of architectural envelopes is a complex process that involves multiple stakeholders and areas of expertise. It is within this framework that the contribution extends the notion of 'component' beyond the physical dimension (Richard, 2017), conceiving it as an entity that can be produced, assembled, maintained and disassembled. Alongside the material components of a façade, design services, verification protocols, computational models, quality control procedures, and maintenance plans can, in fact, be considered 'immaterial components'. In this perspective, the project becomes a collaborative infrastructure, in which the quality

of the outcome depends on the continuity between design decisions and production constraints throughout the entire supply chain (Vibæk, 2017).

The scope of this study concerns the design of façades clad in Glass-fibre Reinforced Concrete (GRC), with a focus on the connection systems to the building's main load-bearing structure. To manage the design of such components, the contribution defines an automotive-derived methodological framework based on the principles of Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), to quantify complexity through measurable metrics.

The study is divided into complementary parts. A first part frames the technology transfer from automotive to AEC, considering the role of DfMA stage-gate logics in the development of an extended notion of component. A second part explores façade systems in GRC, highlighting the hierarchy between envelope, substructure and connections, as well as the limitations of standardised metal frames applied to complex geometries. The research's methodological framework is then introduced, integrating GRC, parametric modelling, topological optimisation, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), and Life Cycle Assessment (LCA).

This is followed by an application section dedicated to the geometric definition of the digital model, preliminary structural simulation, and verification of the substructure's mass-reduction potential and environmental impact. The contribution concludes with a critical discussion of the results, limitations and future developments, highlighting the value of the framework as a tool for progressive component engineering. The scientific interest of the research lies in formalising a transferable protocol that integrates design, production, and environmental assessment within a single decision-making structure.

State of the art | In the AEC sector, complexity does not only derive from the multiplicity of components, but also from the network of relationships that constitutes the project-system. From this perspective, the potential of DfMA is now widely recognised; one only has to think of the role that Waqar et alii (2025) recognise for Modern Methods of Construction (MMC), the increasing focus of the RIBA Plan of Work on the integration of design and construction phases (RIBA, 2020), as well as the platform concept developed by Bryden Wood (2021), which proposes standardisation based on interfaces, rules and processes. Nevertheless, the wider dissemination of such strategies remains limited by several structural obstacles: the isolation of systems, the fragmentation of competences and, above all, the lack of standardised processes that link design and production in a continuous and verifiable manner.

In this scenario, the automotive sector is identified as a source of technology transfer, as an industry characterised by high levels of systemic complexity (Morbiducci, Polverino and Battaglia, 2023). In particular, complexity management is driven by structured product development logic, pro-

gressive validation tools (with well-defined phases and checkpoints) and manufacturing- and assembly-oriented methods that integrate performance requirements, production constraints and environmental objectives. The interest in this type of know-how does not lie in the transposition of tolerances or production volumes from the automotive industry, but rather in the possibility of transferring methodologies and strategies capable of structuring and managing the transition to the industrial scale of components (Giovanardi et alii, 2024).

If the façade is interpreted as an integrated system, its industrialisation must be based on a 'second-level' standardisation, focusing on process logics: interfaces, assembly sequences, testing criteria and end-of-life scenarios. Principles derived from industrial management also include reducing the number of components and configuring them into more easily assembled macro-components. As with buildings, the architecture of a car includes structural components that constitute the skeleton and non-structural elements that serve aesthetic and protective functions (Samad and George, 2022). Following this distinction, the integration of structure and envelope follows the logic of Body-

in-White (BIW): the whole of the load-bearing body (Fig. 1) and its main substructures are conceived as a geometric and performance reference for all subsequent parts (Onat, 2025). This logic constitutes a useful conceptual reference to reduce fragmentation, facilitate assemblability and control convergence between performance requirements and the identity dimension of the envelope (Manni and Valzano, 2023).

Operationally, new product development in the automotive industry is governed by a multi-stage process that integrates design and engineering. The stage-gate process is a recurring model divided into distinct phases, each culminating in a control point at which critical progress decisions are made on the basis of verifiable criteria (Ettlie and Elsenbach, 2007). The critical transposition of logics with well-defined phases and checkpoints along with DfMA-oriented methods, enables feasibility assessments to be anticipated and variations to be reduced. GRC façade systems are particularly suited to this method, as they pose the design question between geometric complexity, component standardisation and the need for integration between design and production.

GRC is an alkali-resistant glass-fibre-reinforced cement composite used in architecture to create thin, relatively light elements compared to traditional concrete, with good surface quality and wide formal freedom (Ahmad et alii, 2022). Its widespread use in the building envelope is mainly linked to the possibility of producing panels with reduced thickness, suitable for cladding and protection functions, with controlled finishes and aesthetic variability (Bentur and Mindess, 2006).

In contemporary practice, GRC finds application in different types of systems: (a) non-load-bearing cladding panels for ventilated façades, in which the panel forms the external 'skin' and works in combination with a metal substructure and functional layers behind; (b) prefabricated insulated panels (sandwich or composite), in which the GRC integrates or cooperates with an insulating layer and, sometimes, with a second facing or support structure, in order to combine finish, protection and thermo-hygrometric performance; (c) integral or semi-integral wall systems, in which the GRC is not just a cladding but participates, to varying de-

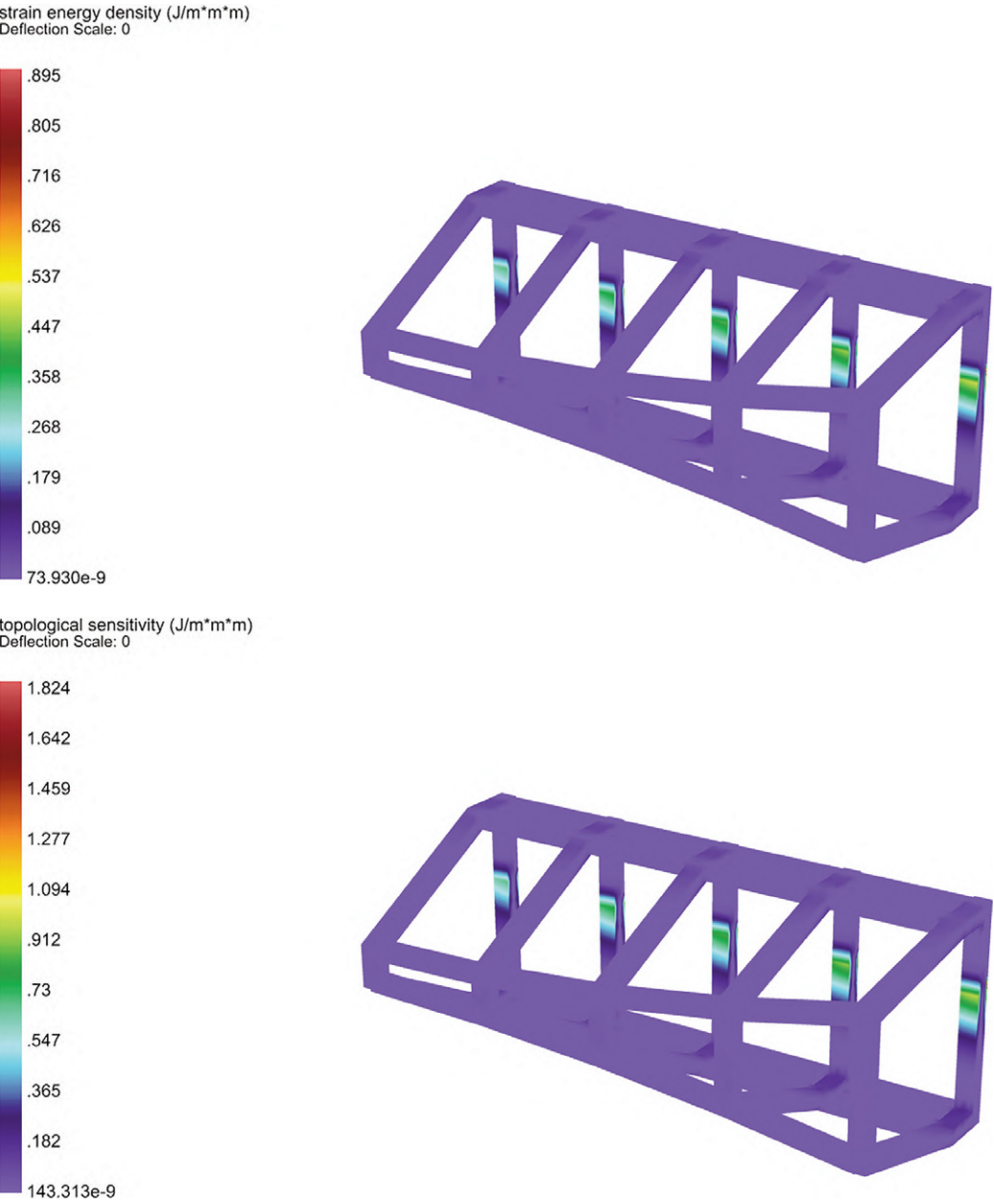


Fig. 8 | Strain Energy Density Map (credit: the Authors, 2026).
Fig. 9 | Topological Sensitivity (credit: the Authors, 2026).

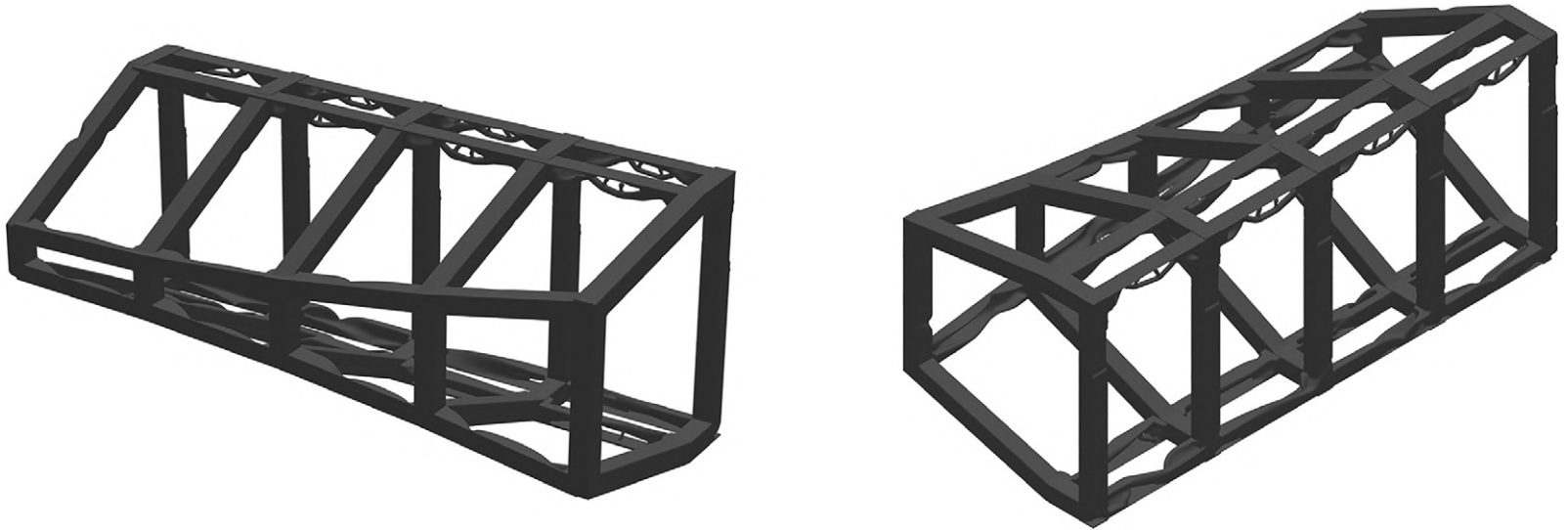


Fig. 10 | Topology optimisation (credit: the Authors, 2026).

grees, in the composition of a more complex closure element, including connection devices, stiffeners, arrangements and details for openings, joints and edges. As shown in Figure 2, it is possible, to a first approximation, to distinguish a progression from planar panels to simple curved panels to double-curved panels and free geometries (Henriksen, Lo and Knaack, 2015). The complexity increases, however, especially when the geometry incorporates local features that transform the panel into a three-dimensional interface device (Bishop and Wilson, 2011). In such conditions, the panel is no longer a mere cladding element, defined only by the configuration of the outer surface, but a component that must simultaneously coordinate aesthetic and performance requirements with the constraints of production (moulding strategies, demoulding, tolerances), handling and assembly (gripping points, positioning, adjustment and assembly sequence).

The research takes as its reference a GRC panel system of the 'stud frame' type (Fig. 3), composed of a monolithic GRC skin coupled with a prefabricated metal frame, which constitutes the load-bearing substructure and represents the interface between the envelope and the main structure of the building (Purslow, 1990). The hierarchy of the components can be described as: (a) GRC skin, without internal ribs and stiffened above all by means of a perimeter flap which is also useful for sealing the joints; (b) back metal frame made up of uprights and beams (often in hollow section profiles); (c) skin-frame connection system based on two families of anchorages, flexible 'L'-shaped and load-bearing.

In the frame system, the GRC skin serves as the cladding, while overall rigidity and geometric control are entrusted to the back frame, which consists of standard metal profiles (mullions and beams in a grid, often with a regular pitch). This configuration is effective when the objective is to produce and install large flat surfaces with a clear interface with the primary structure. However, in the case of curvatures, the back-frame model has an inherent limitation: to follow a non-planar geometry, the frame must be adapted. The use of standardised elements, while offering advantages in terms of scalability, entails a significant material oversizing

of the system, as the substructure requires a material quantity that is not fully optimised. Hence, there is a need to explore a methodology that reduces mass while keeping the interface points and assembly logic unchanged.

In the context of structural interfaces between GRC façade panels and the building's primary structure, the use of Directed Energy Deposition (DED) technologies, in particular Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), allows the production of metal components with a geometric freedom not constrained by the limits of rolled profiles. Several studies have demonstrated the feasibility of fabricating large-scale structural elements by means of WAAM, such as in the case of the MX3D bridge in Amsterdam (Laghi et alii, 2023), as well as the effectiveness of hybrid approaches that combine additively manufactured parts with elements made using traditional technologies (Raspall et alii, 2025). In particular, Laghi, Savino and Gasparini (2025) propose an 'integrated structural optimisation' approach (Fig. 4) that integrates topological optimisation, WAAM production constraints and numerical verification. From an environmental impact perspective, the comparison between hot-rolled steel beams and WAAM components showed a reduction in CO₂ emissions, provided that a mass saving of at least 50% is achieved through the use of topological optimisation techniques (Laghi, Savino and Gasparini, 2025).

Research methodology and definition of the framework

In developing the framework, the research identifies four in-depth plans, selected for their relevance to the following themes: management of geometric complexity, definition of the interface between skin and structure, application of DfMA logics, and integration between optimisation, manufacturing and environmental assessment. The automotive sector, and in particular the BIW logic, represents the first semantic area from which to transfer interface strategies, albeit in the presence of profoundly different materials, timeframes and levels of uniqueness from those of the AEC sector. The field of GRC façade systems, on the other hand, shows that the material can support high geometric complexity and also highlights that the critical node is not the skin itself, but rather the

substructure and the resolution of the interface with the supporting structure. And it is at the interface where WAAM technology is located, where complexity is most concentrated and where targeted additive manufacturing can be methodologically and economically more efficient than extensive application. Finally, studies that integrate topological optimisation, structural simulation and material efficiency, such as the hybrid approach (Laghi et alii, 2023), provide an important methodological reference for linking mass reduction, manufacturability and environmental impact.

The framework proposed in Table 1 is conceived as a transferable tool beyond the objectives of this study: although it refers to specific technical solutions, it is based on a working structure that can be adapted to different building systems, with the appropriate modifications. It is possible to modulate the content and tools of each phase according to the context, while keeping the decision-making architecture unchanged and ensuring a progressive integration of the engineering component, supported by checkpoints that regulate transitions between phases. The framework is used to manage the different components of the façade macro-component: external skin, substructure, connection system, joints and functional stratigraphy, as well as logistics, installation, maintenance and end-of-life scenarios. Within this methodological framework, the specific contribution of this study focuses on mass reduction and LCA evaluation.

In the initial 'Concept Evaluation' phase, the framework involves defining the design objectives and formalising the geometric complexity of the panel and structural interfaces. The design domain, architectural and functional requirements and the first Key Performance Indicators (KPIs) of manufacturability and assembly are defined. The 'Concept Definition and Feasibility' phase introduces a parametric reference model consisting of a GRC panel and a frame, both characterised by a high degree of geometric complexity, against which the selective integration of WAAM technology is envisaged. In this phase, preliminary finite element analyses are performed, constraints for topological optimisation are defined, and the environmental assessment system (LCA) is set up, including functional units, system boundaries and indicators.

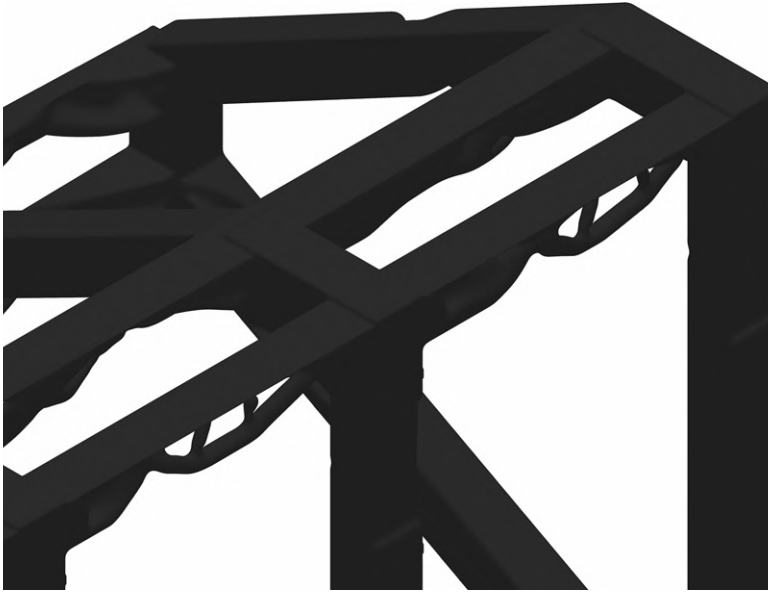


Fig. 11 | Topology optimisation detail (credit: the Authors, 2026).

The validation of technical, production and environmental feasibility is the criterion for access to the subsequent phases. The ‘Development’ phase comprises the framework’s engineering core. Here, the digital model is consolidated, topological optimisation strategies are applied to the substructure and the hybrid architecture integrating WAAM and standardised elements is defined. The performance of the optimised solution is compared with that of the reference configuration in structural, material and environmental terms by integrating Design for Disassembly (DfD) strategies. Validation takes place through prototyping, verification of mass reduction, structural behaviour, and improvement of LCA indicators. After the development phase, the process enters the industrialisation phase.

The ‘Tooling and Process Validation’ phase verifies the repeatability of the production workflow by checking cycle times, dimensional tolerances and energy consumption. At the same time, the LCA analysis is updated using real process data to validate the environmental assumptions made in the previous phases. This is followed by the ‘Pre-Series’ phase, in which a small series of panels is produced and tested under operating conditions, to evaluate installation, disassembly, damage and material separability. This phase allows the system’s robustness to be validated and DfD strategies to be consolidated.

Finally, the ‘Ramp-Up’ phase is geared towards stabilising production and environmental KPIs, defining final interface standards and verifying system scalability. The focus shifts from the single optimised configuration to the process’s ability to replicate itself across different geometries, maintaining constant quality and performance, and ensuring process control.

A distinguishing feature of the framework is treating component development as part of a controlled production line rather than as an isolated outcome of a discontinuous sequence of operations. This allows not only the geometric and structural configuration of the component to be considered from the initial stages, but also the optimisation of movement, prefabrication, transport and installation, thus reducing the fragmentation typical of the AEC supply chain.

Application of the framework to the case study

Over the past two decades, topological optimisation has established itself as one of the most powerful computational tools for advanced structural design, enabling the optimal distribution of material within a design domain according to specific performance constraints, such as minimising structural yielding or limiting the volume fraction (Takezawa, Nishiwaki and Kitamura, 2010).

The interest in ‘lightweight’ design is now placed within a broader framework of environmental sustainability: the reduction of structural mass leads to decreased consumption of primary materials and reduced energy loads during the production and use phases. Most studies have focused on single-material optimisation of structural beams. Most studies have focused on single-material optimisation of structural beams (Damtsas et alii, 2025). In the context of metal additive manufacturing, particularly WAAM, this relationship between topological optimisation and sustainability has become increasingly relevant. This study proposes integrating topological optimisation techniques and WAAM processes within the described framework, aiming to develop GRC-WAAM hybrid structural components that significantly reduce mass compared to standardised metal frames, improve the material efficiency of the interface, and optimise stress distribution along load paths. This mass reduction is part of an approach whose environmental benefits can be measured by reduced emissions throughout the component’s life cycle.

The application of the framework starts with a basic model, understood as a structural configuration that is technically feasible using current construction techniques and consistent with the system’s construction logic. The section shown in Figure 5 illustrates a typical configuration in which the façade engages a concrete slab and a perimeter kerb. In this type of system, the geometry of the section may vary according to architectural choices and design conditions: to manage this geometric variability, a parametric model (Fig. 6, 7) was developed using Grasshopper to control the morphological parameters of the façade interface, such as curvature, inclination and surface continuity, while keeping the hierarchy of the system’s components unchanged.

The GRC envelope for the macro-component studied has a total surface area of approximately 6 m² and a nominal thickness of 24 mm, for a volume of approximately 0.14 m³. Assuming an average density of 2,400 kg/m³, the mass of the panel is between 336 and 346 kg, corresponding to a self-weight of approximately 3.3-3.4 kN. This value represents the main load transferred from the outer skin to the metal substructure. Based on the parametric model, a structural simulation analysis was then conducted using the Intact Simulation calculation environment, which is integrated into the same parametric workflow.

The structural domain was discretised using a voxel representation, suitable for a preliminary concept phase and intended to identify the main action transfer paths within the system. Two equivalent loads were applied in the model: a vertical gravitational load of 3.3 kN, representative of the panel’s own weight in GRC, and a horizontal load of 4.7 kN, derived from a simplified wind pressure applied to the surface of the macro-component.

The analysis enabled calculation of various tension and deformation fields; among these, the deformation energy density (Fig. 8) was used as the primary parameter for interpreting the system’s structural behaviour. The topological sensitivity (Fig. 9), on the other hand, shows the regions of greatest structural significance. This information forms the basis for the topological optimisation phase.

Results and comparison between basic model and optimised configuration

From a quantitative point of view, the initial structural volume of 0.1716 m³ was reduced to 0.137 m³, corresponding to an overall material reduction of approximately 20% (Fig. 10, 11).

Table 2 summarises the main physical parameters of the comparison between the reference model and the optimised configuration, highlighting the effects of the mass reduction on the metal substructure. Previous studies indicate that values between 30% and 50% generally allow for realistic structural configurations while maintaining load-path continuity (Bendsøe and Sigmund, 2004). In the present study, a lower volume reduction than generally reported in the literature was adopted. This conservative choice does not derive from a

definitive structural calibration and, for this reason, was introduced as an exploratory step in the preliminary phase of the proposed methodological framework, with the aim of investigating the system's mass-reduction potential and identifying the main action transfer paths.

A preliminary environmental assessment was conducted by means of LCA analysis to compare the embedded climate impact of the metal interface substructure in two configurations of the same macro-component: (1) a reference configuration, corresponding to the non-optimised component; (2) a configuration derived from a topological optimisation, considered producible through WAAM. The GRC cladding is considered unchanged between the alternatives (336 kg in both cases) and therefore excluded from the main comparison on the substructure, as it does not discriminate against the target in the initial phase of the study. The analysis is set up according to the principles and requirements of ISO 14040 and ISO 14044 (ISO 2006a; 2006b) and is reported as a cradle-to-gate study, consistent with the modular A1–A3 approach of EN 15804 (CEN, 2019) and the methodological framework of EN 15978 (CEN, 2011).

The model is implemented in SimaPro Faculty 10 using the ecoinvent 3 database, with the cut-off system and the LCIA ReCiPe 2016 Midpoint (H) method. The indicator considered is exclusively the Global Warming Potential (GWP, in kgCO₂eq). The Functional Unit (FU) is defined as an interface macro-component per panel, measuring 2.4 m × 1 m. The comparison assumes functional equivalence between the two alternatives, although the optimised configuration has not undergone full structural validation. At this stage, LCA is used as an analysis tool to verify the plausibility of the trade-off between reducing mass and increasing process energy. The inventory used is limited to the

dominant GWP contributors. For the reference configuration, the process is modelled as an input of 1,347 kg of low-alloy steel. In contrast, the optimised configuration is modelled with an input of 1,076 kg of low-alloy steel and 150 kWh of process electricity, assumed to be the energy required for WAAM deposition. In both cases, the result is defined as one unit of the macro-component.

The datasets used are: Steel, low-alloyed 'GLO | market for steel, low-alloyed | Cut-off', S for steel and 'Electricity', medium voltage {RER} for process electricity. The perimeter, therefore, includes: (a) the production of the metal material (A1–A3 for steel); (b) the consumption of process electricity for WAAM deposition. Excluded are: site transport and installation (A4–A5); use, maintenance, and replacement (B); end-of-life (C); and credits beyond the system boundaries (D); and auxiliary consumables not yet robustly quantified, such as protective gas, tools, or post-processing.

The results shown in Table 3 indicate that the GWP of the baseline configuration is 2,783.45 kgCO₂eq/FU, while that of the optimised configuration, achievable through WAAM, is 2,273.60 kgCO₂eq/FU, with an absolute reduction of about 509.85 kgCO₂eq and a relative reduction of about 18.3%. In terms of mass, the metal frame reduction is 271 kg, or about 20%.

In the second analysis, in order to contextualise the effect of the reduction of the metal substructure with respect to the entire macrocomponent, an additional estimate was also developed by including the cladding, whose contribution was assumed to be 336 kg/FU in both alternatives, ensuring the neutrality of the comparison with respect to this component. In the absence of a specific dataset for GRC panels in the selected database, the cladding was modelled using the dataset 'fibre cement facing tile', large format {RoW} | fibre cement tile production, large format | Cut-off, S, adopted

as a technologically consistent proxy for fibre cement facing elements.

Two aggregate processes were then defined: 1) full baseline configuration, consisting of 1,347 kg of low-alloy steel and 336 kg of coating; 2) full optimised configuration, consisting of 1,076 kg of low-alloy steel, 336 kg of coating and 150 kWh of process electricity for WAAM deposition. The results show that the GWP of the complete macrocomponent decreases from 3,259.55 kgCO₂eq/FU for the baseline configuration to 2,749.69 kgCO₂eq/FU for the optimised configuration, corresponding to an absolute reduction of about 509.85 kgCO₂eq and a relative reduction of about 15.6%.

Compared to the results from the substructure alone, the inclusion of the cladding results in a smaller percentage reduction, while the absolute benefit remains unchanged. Compared to the metal substructure, cladding contributes around 476 kgCO₂eq/FU, making it the second-largest contributor to the overall impact. The analysis of the contributions confirms that steel production remains the main source of overall GWP, accounting for 81% to 85%, while cladding contributes about 15–17%; the contribution of process electricity associated with WAAM is instead marginal at the macro-component level. Since this is a preliminary estimate based on a representative dataset of GRC cladding, the results should be interpreted as indicative and primarily intended to make explicit the relative weight of the substructure with respect to the complete component.

LCA studies of WAAM technologies frequently adopt narrow system boundaries, often gate-to-gate, to isolate the contributions of the most relevant process factors (Shah et alii, 2023). The objective is not the complete quantification of the product life cycle, but rather the understanding of the trade-offs between efficient material use and process energy requirements. Compared to this ap-

Parameter	Baseline	Optimized
Frame mass (kg)	1,347	1,076
GRC mass (kg)	336	336
Total mass with GRC (kg)	1,683	1,412
Metal volume (m ³)	0.1716	0.1371
Volume fraction (–)	1.00	0.80

Tab. 2 | Comparison of the main physical parameters between the baseline model and the optimised configuration (credit: the Authors, 2026).

Tab. 3 | Inventory and GWP results for the metal substructure and the complete macrocomponent (credit: the Authors, 2026).

Tab. 4 | Sensitivity analysis: effect of WAAM electricity demand on GWP, steel mass set at 1,076 kg/FU (credit: the Authors, 2026).

INVENTORY				RESULTS	
Scenario	GRC cladding (kg/FU)	Low-alloyed steel (kg/FU)	WAAM electricity (kWh/FU)	GWP substructure only (kgCO ₂ eq/FU)	GWP complete component (kgCO ₂ eq/FU)
Baseline (reference substructure + cladding)	336	1,347	–	2,783.45	3,259.55
Optimized (topology-optimized substructure + WAAM + cladding)	336	1,076	150	2,273.60	2,749.69
Note: the GWP of the complete component includes the constant contribution of the GRC cladding, modelled through a fibre cement facing tile proxy dataset.					

Scenario	GRC cladding (kg/FU)	Low-alloyed steel (kg/FU)	WAAM electricity (kWh/FU)	GWP substructure only (kg CO ₂ eq/FU)	GWP complete component (kg CO ₂ eq/FU)
WAAM nominal	336	1,076	150	2,273.60	2,749.69
WAAM +50% electricity	336	1,076	225	2,298.67	2,774.76
WAAM +100% electricity	336	1,076	300	2,323.74	2,799.83

proach, the present study adopts a slightly broader scope, including the electricity process but also steel production. This choice is consistent with the fact that the comparison does not concern only two deposition variants, but two configurations of the same component with different metal masses; in this case, the most important variable is not the additive process itself, but the relationship between mass reduction and deposition energy load.

The literature on WAAM also shows that the modelling of capital equipment and process infrastructure is often excluded or simplified, as the allocation of impacts on equipment life, productivity, and utilisation rates introduces a high degree of uncertainty (Spreafico, Kokare and Godina, 2026). Similarly, for components still under development, certain phases, such as transport, installation, use, and end-of-life, are deferred to future development, when geometries, performance and deployment scenarios are more stabilised. In this sense, the choice to present the LCA analysis limited to A1–A3 is methodologically consistent with the current maturity of the case study and the positioning of the contribution in the ‘Concept Definition and Feasibility’ phase.

To verify the sensitivity of the result with respect to possible increases in the energy requirements of additive deposition, two additional scenarios were defined, keeping the steel mass of the optimised configuration constant (1,076 kg/FU) and varying only the process electricity consumption to 225 kWh/FU and 300 kWh/FU (Tab. 4). The results show that the GWP of the optimised substructure alone increases from 2,273.60 kgCO₂eq/FU in the nominal scenario (150 kWh/FU) to 2,298.67 kgCO₂eq/FU in the +50% energy scenario and to 2,323.74 kgCO₂eq/FU in the +100% energy scenario. If the comparison is extended to the full macro-component, the GWP increases from 2,749.69 kgCO₂eq/FU in the nominal scenario to 2,774.76 kgCO₂eq/FU in the +50% energy scenario and to 2,799.83 kgCO₂eq/FU in the +100% energy scenario. Although GWP increases consistently with increasing process energy, the optimised configuration remains environmentally preferable to the baseline in all scenarios analysed. This confirms that the main driver of climate impact is steel production, while additive deposition energy is a secondary parameter. The observed environmental benefit is therefore mainly due to the reduction in the component’s metal mass.

To identify the conditions under which the optimised solution is environmentally preferable, a simple threshold condition is defined based on the balance between mass saved and additional energy:

$$(m_{\text{baseline}} - m_{\text{optimized}}) \times EF_{\text{steel}} > E_{\text{WAAM}} \times EF_{\text{el}}$$

where: $m_{\text{baseline}} - m_{\text{optimized}} = 271$ kg; EF_{steel} is the emission factor associated with the steel dataset; E_{WAAM} is the process electricity consumption; EF_{el} is the emission factor associated with the adopted electricity dataset.

In the case study analysed, the results show that reducing steel by 271 kg is sufficient to maintain the GWP-preferable optimised configuration even with a doubling of process electricity from 150 to 300 kWh. The result thus indicates that, within the adopted system boundaries, the climatic advantage of the optimised solution is robust to plau-

sible variations in the deposition energy load. The threshold should not be interpreted as an intrinsic property of the WAAM, but rather as a methodological condition: the additive process is only environmentally advantageous when it enables a mass reduction that compensates for the additional energy required.

Conclusions, research limitations, and future developments

The research explored the potential for technology transfer between the automotive and AEC sectors and proposed a methodological framework based on DfMA principles. In this perspective, the application phase of the contribution has as its main objective the definition of a process structure capable of integrating, in a progressive and verifiable manner, architectural requirements, production constraints, assembly criteria, environmental assessments and industrialisation hypotheses, rather than the complete validation of the optimised component.

From the point of view of limitations, functional equivalence between the reference configuration and the optimised one is assumed at a conceptual level and requires verification through complete structural analyses or physical prototypes. The manufacturability of WAAM is still based on the literature and has not been verified with respect to deposition constraints, tolerances, finishing, process times and certification requirements.

The preliminary LCA analysis shows that the configuration obtained by topological optimisation has a lower GWP than the reference configuration. This result, mainly associated with the reduction of the metal mass of the frame, must however be read in the light of certain limitations: the functional equivalence between the reference and optimised configuration is assumed at the concept level and not yet validated through complete structural verifications; the perimeter limited to A1–A3 excludes potentially relevant contributions such as transport, installation, use, maintenance, disassembly and end-of-life; finally, the model does not yet include process consumables, protective gas or any post-processing.

In terms of adoption, the deployment of this manufacturing-oriented approach also encounters structural barriers in the AEC sector, including the still-high costs of metal additive technologies, which hinder their integration; limited standardisation; evolving testing and certification procedures; and fragmented supply chains. In addition to these critical issues, there are cultural and organisational obstacles to overcoming the separation between design, simulation and production, as well as information obstacles due to the limited availability of reliable data on actual process consumption, end-of-life scenarios, and measurable environmental benefits in the early stages of decision-making.

In terms of transferability, the combination of parametric modelling, structural simulation, topological optimisation and LCA analysis has shown how it is possible to steer design decisions towards greater material efficiency as early as the ‘Concept Definition and Feasibility’ phase, placing the study in line with the objectives of SDG 9. In a complementary way, the research intersects with SDG 12 through reductions in the component’s mass, a focus on material efficiency, the use of LCA analysis as decision support, and the integration of a logic oriented towards Design for Disassembly and

controlled prefabrication. More indirectly, the study dialogues with SDG 13, as the reduction of GWP is a preliminary indicator of climate benefits, and with SDG 11, as the innovation of envelope systems can, in a mediated way, contribute to a higher-quality, more maintainable, and more sustainable built environment.

Future developments should therefore focus on the structural validation of the optimised component, the verification of its actual manufacturability through WAAM, and the extension of the environmental analysis to further inventory contributions and steps A4–A5, B and C. Overall, the research shows that the environmental potential of the optimised solution does not depend on the adoption of additive technology alone, but rather on its ability to make more material-efficient configurations producible. Rather than asserting the superiority of a technology, the study proposes a methodological line based on a systemic approach, in which the DfMA allows the role of design to remain central and to address the complexity of the component on several levels: geometric, technological, productive and environmental.

Acknowledgements

The study is part of an ongoing research project developed at the Department of Architecture, Construction Engineering and the Built Environment (DABC) of the Politecnico di Milano (Italy), within the Material Balance research group, coordinated by Prof. I. M. Paoletti, and conducted in collaboration with Pininfarina S.p.A. The work presented corresponds to a phase of G. Conti's Executive PhD course, dedicated to the transfer of DfMA strategies from the automotive sector to the AEC sector. The contribution is the result of a shared reflection among the Authors; however, regarding the attribution of individual contributions, I. M. Paoletti provided overall scientific supervision, while G. Conti led and developed the sections related to technological transfer, the definition of the conceptual and methodological framework, parametric modelling and topological optimisation of the case study, insights into GRC technology, and the application of DfMA strategies derived from the automotive sector; G. Castellano contributed to environmental modelling and the definition of the façade system; F. Pradella contributed to DfMA strategies and digital manufacturing solutions.

References

- Ahmad, J., González-Lezcano, R. A., Majdi, A., Ben Kahla, N., Deifalla, A. F. and El-Shorbagy, M. A. (2022), "Glass fibers reinforce concrete – Overview on mechanical, durability and microstructure analysis", in *Materials*, vol. 15, issue 15, article 5111, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ma15155111 [Accessed 31 March 2026].
- Alkhazaleh, R., Mykoniatis, K. and Alahmer, A. (2022), "The success of technology transfer in the Industry 4.0 era – A systematic literature review", in *Journal of Open Innovation | Technology, Market, and Complexity*, vol. 8, issue 4, article 202, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/joitmc8040202 [Accessed 31 March 2026].
- Bendsøe, M. P. and Sigmund, O. (2004), *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*, Springer, Berlin. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6 [Accessed 31 March 2026].
- Bentur, A. and Mindess, S. (2006), *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, CRC Press, Boca Raton. [Online] Available at: doi.org/10.1201/9781482267747 [Accessed 8 April 2026].
- Bishop, E. and Wilson, J. (2011), "Concept to realisation – GRC and complex facades", in *Proceedings of the GRCA Congress 2011, Istanbul, Turkey, September 4-8, 2011*, Glass-fibre Reinforced Concrete Association, Bingley, pp. 1-15. [Online] Available at: grca.org.uk/pdf/congress-2011/21%20Concept%20to%20Realisation%20GRC%20and%20Complex%20Facades.pdf [Accessed 31 March 2026].
- Damtsas, E., Nieto Jiménez, A., Konstantatou, M., Herrmann, M. and Grigoriadis, K. (2025), "The design, fabrication, and structural and embodied carbon analysis of the world's first manufactured topologically optimised multi-metal I-beam", in *Architectural Intelligence*, vol. 4, issue 1, article 23, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s44223-025-00100-8 [Accessed 31 March 2026].
- de Matos Camarinha, R., Goulding, J. and Peter, C. (2023), "Construction sector transformation – Developing a new learning paradigm", in Gomes Correia, A., Azenha, M., Cruz, P. J. S., Novais, P. and Pereira, P. (eds), *Trends on Construction in the Digital Era – ISIC 2022 – Proceedings of ISIC 2022, Guimarães, Portugal, September 6-9, 2022*, Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 306, Springer, Cham, pp. 369-379. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-20241-4_25 [Accessed 31 March 2026].
- Ettlie, J. E. and Elsenbach, J. M. (2007), "Modified Stage-Gate® regimes in new product development", in *Journal of Product Innovation Management*, vol. 24, issue 1, pp. 20-33. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1540-5885.2006.00230.x [Accessed 31 March 2026].
- European Committee for Standardization (2019), *EN 15804 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/c98127b4-8dc2-48a4-9338-3e1366b16669/en-15804-2012a2-2019 [Accessed 31 March 2026].
- European Committee for Standardization (2011), *EN 15978 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. [Online] Available at: standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/62c22cef-5666-4719-91f9-c21cb6aa0ab3/en-15978-2011 [Accessed 31 March 2026].
- Giovanardi, M., Castellan, C., La Rosa, M., Pavlovic, A. and Pracucci, A. (2024), "Progettare BIPV – Strategie per gestire la complessità del fotovoltaico integrato in facciata | Designing BIPV – Strategies for managing complexity in the integration of photovoltaics in facades", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 186-193. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16152024 [Accessed 31 March 2026].
- Henriksen, T., Lo, S. and Knaack, U. (2015), "An innovative approach to manufacture thin-walled glass fibre reinforced concrete for tomorrow's architectural building envelopes with complex geometries", in *Journal of Building Engineering*, vol. 4, pp. 189-199. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobte.2015.09.006 [Accessed 31 March 2026].
- Höweler, E. (2025), *Design for Construction – Tectonic Imagination in Contemporary Architecture*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003434559 [Accessed 31 March 2026].
- ISO – International Organization for Standardization (2006a), *ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. [Online] Available at: iso.org/standard/37456.html [Accessed 31 March 2026].
- ISO – International Organization for Standardization (2006b), *ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. [Online] Available at: iso.org/standard/38498.html [Accessed 31 March 2026].
- Laghi, V., Palermo, M., Bruggi, M., Gasparini, G. and Trombetti, T. (2023), "Blended structural optimization for wire-and-arc additively manufactured beams", in *International Journal of Steel Structures*, vol. 8, pp. 381-392. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s40964-022-00335-1 [Accessed 31 March 2026].
- Laghi, V., Savino, E. and Gasparini, G. (2025), "Reduction of the environmental impact of complex-shaped steel joints through topology optimization and large-scale metal 3D printing", in *Results in Engineering*, vol. 27, article 105610, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105610 [Accessed 31 March 2026].
- Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), "Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14112023 [Accessed 31 March 2026].
- Morbiducci, R., Polverino, S. and Battaglia, C. (2023), "Stampa 4D per componenti costruttivi modulari – Applicazioni e principali sviluppi | 4D printing for modular construction components – Applications and main developments", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 182-193. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14152023 [Accessed 31 March 2026].
- Onat, M. (2025), "Investigation of changes in body-in-white components and their impact during the transition from internal combustion engine vehicles to electric vehicles", in *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, vol. 14, issue 2, pp. 123-141. [Online] Available at: doi.org/10.18245/ijaet.1630727 [Accessed 31 March 2026].
- Osello, A., Del Giudice, M., Donato, A. J. and Fratto, A. (2024), "Verso la Neutralità Climatica – Il ruolo chiave del Digital Twin nell'Industria 5.0 | Towards Climate Neutrality – The key role of the Digital Twin in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 276-285. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15222024 [Accessed 8 April 2026].
- Palumbo, E., Mazzei, I., Perpetua, M. and Pomponi, F. (2025), "Impatti ambientali e sociali nel ciclo vita per una progettazione a basso carbonio | Environmental and social life cycle for low-carbon design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 294-303. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18172025 [Accessed 31 March 2026].
- Paoletti, I. (2003), *Una finestra sul trasferimento – Tecnologie innovative per l'architettura*, Libreria Clup, Milano.
- Purslow, G. J. (1990), "Stud frame cladding – A technical appraisal", in *Construction and Building Materials*, vol. 4, issue 1, pp. 11-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/0950-0618(90)90013-Q [Accessed 31 March 2026].
- Raspall, F., Araya, S., Pazols, M., Valenzuela, E., Castillo, M. and Benavides, P. (2025), "Wire arc additive manufacturing for widespread architectural application – A review informed by large-scale prototypes", in *Buildings*, vol. 15, issue 6, article 906, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15060906 [Accessed 31 March 2026].
- RIBA – Royal Institute of British Architects (2020), *RIBA Plan of Work 2020 Overview*, RIBA, London. [Online] Available at: riba.org/media/syneeto/2020ribaplanofworkoverviewpdf.pdf [Accessed 8 April 2026].
- Richard, R.-B. (2017), "Industrialized building system categorization", in Smith, R. E. and Quale, J. D. (eds), *Off-site Architecture – Constructing the future*, Routledge, London, pp. 3-20. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315743332-1 [Accessed 31 March 2026].
- Samad, M. F. A. and George, K. Y. (2022), "Application of Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) method to vehicle door design", in *Defence S and T Technical Bulletin*, vol. 15, issue 1, pp. 34-41. [Online] Available at: eprints.utm.my/id/eprint/26996/ [Accessed 31 March 2026].
- Shah, I. H., Hadjipantelis, N., Walter, L., Myers, R. J. and Gardner, L. (2023), "Environmental life cycle assessment of wire arc additively manufactured steel structural components", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 389, article 136071, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136071 [Accessed 31 March 2026].
- Smith, R. E., Elliott, J. W. and Grosskopf, K. (2017), "Offsite construction in education – A survey of prefabrication in design and construction academia", in Smith, R. E. and Quale, J. D. (eds), *Offsite Architecture – Constructing the future*, Routledge, London, pp. 128-138. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315743332-8 [Accessed 31 March 2026].
- Spreafico, C., Kokare, S. and Godina, R. (2026), "Prospective life cycle assessment of future wire arc additive manufacturing deposition process for large-scale steel parts", in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 116, article 108111, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108111 [Accessed 31 March 2026].
- Takezawa, A., Nishiwaki, S. and Kitamura, M. (2010), "Shape and topology optimization based on the phase field method and sensitivity analysis", in *Journal of Computational Physics*, vol. 229, issue 7, pp. 2697-2718. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jcp.2009.12.017 [Accessed 31 March 2026].
- UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 31 March 2026].
- Vibæk, K. S. (2017), "System structures – A theory of industrialised architecture", in Smith, R. E. and Quale, J. D. (eds), *Offsite Architecture – Constructing the future*, Routledge, London, pp. 21-36. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315743332-2 [Accessed 31 March 2026].
- Waqar, A., Al Hajj, F., Danish, M., Khan, M. B. and Houda, M. (2025), "Evaluating the influence of modern construction methods on sustainable construction success", in *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 19, article 100327, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.clrc.2025.100327 [Accessed 9 April 2026].
- Wood, B. (2021), *Data Driven Infrastructure – From Digital Tools to Manufactured Components*. [Online] Available at: cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/data_driven_infrastructure_screen.pdf [Accessed 8 April 2026].