

Investimenti a favore della crescita e
dell'occupazione FESR 2014-2020

Investitionen in Wachstum und Beschäftigung
EFRE 2014-2020

FESR LEGNATIVO

REPORT Milestone 5.2 Linee guida per l'ottimizzazione del processo produttivo

Partner | Projektpartner

eurac
research

 **Fraunhofer**
ITALIA

ATRIUM

Contatto | Kontakte: Riccardo Pinotti || riccardo.pinotti@eurac.edu

Contatto | Kontakte: Roberto Lollini || roberto.lollini@eurac.edu

LINEE GUIDA OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO

LINEE GUIDA OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO

Ilaria Di Blasio, Gabriele Pasetti Monizza

Fraunhofer Italia Research – Innovation Engineering Center
Bolzano, Alto Adige

Indice

1	Introduzione.....	5
2	Analisi dello stato dell'arte	6
2.1	Lean Construction e ottimizzazione del flusso di informazioni.....	6
2.1.1	La filosofia Lean	6
2.1.2	Il contesto del settore delle costruzioni e l'industrializzazione dei processi.....	7
2.1.3	Limiti dell'applicazione della filosofia Lean al settore delle costruzioni	9
2.2	Le opportunità offerte dalla trasformazione digitale.....	10
2.2.1	La Mass Customization come nuovo approccio all'industrializzazione del settore delle costruzioni	10
2.2.2	Le tecniche di Computational Design per un'automazione efficiente del flusso informativo	11
3	Strategia di ottimizzazione per il progetto LegnAttivo	12
3.1	Il sistema tecnologico e di produzione LegnAttivo	12
3.2	Definizione delle fasi di lavorazione.....	12
3.3	Identificazione di una strategia di ottimizzazione	15
4	Il caso studio del progetto LegnAttivo	16
4.1	Protocollo di rilievo: identificazione delle informazioni rilevanti dell'esistente	16
4.2	Ottimizzazione del flusso di informazioni: strategia del processo di automazione.	17
4.2.1	Algoritmo facciata: analisi dell'input da rilievo e definizione della scomposizione di facciata	18
4.2.2	Algoritmo pannello opaco: definizione dei dati di lavorazione per gli elementi opachi di facciata	22
4.2.3	Algoritmo pannello attivo: definizione dei dati di lavorazione per gli elementi di facciata dotati di serramenti e sistemi attivi	27
5	Bibliografia	30

1 Introduzione

La presente relazione illustra sinteticamente i contenuti sviluppati nell'ambito del pacchetto di lavoro WP5 - Analisi dei costi per il ciclo di vita, modelli di business, del progetto EFRE-FESR 1117 LegnAttivo. Nello specifico, si illustrano i risultati dei contenuti sviluppati per la Milestone M5.2 – Linee guida ottimizzazione del processo produttivo. In una prima parte, a seguito di una breve sintesi dello stato dell'arte nell'ambito dell'ottimizzazione di processo secondo i metodi Lean Construction e nell'ambito dell'automazione del flusso informativo mediante l'utilizzo di tecniche di Computational Design, si descrive la strategia adottata per l'ottimizzazione del processo di produzione nel progetto LegnAttivo. In una seconda parte, si descrivono in dettaglio i risultati del caso studio elaborato per il progetto LegnAttivo.

2 Analisi dello stato dell'arte

2.1 Lean Construction e ottimizzazione del flusso di informazioni

2.1.1 La filosofia Lean

L'approccio industriale nasce con l'introduzione delle macchine a vapore nella seconda metà del '700 e mira, in generale, all'ottimizzazione di obiettivi divergenti nel rapporto tra produttore e consumatore (Erlach, 2013). Il compromesso tra questi obiettivi, soprattutto il rapporto tra variabilità e velocità, identifica il tipo di produzione dall'artigianato sino alla produzione in serie o produzione di massa (Ford, 1926).

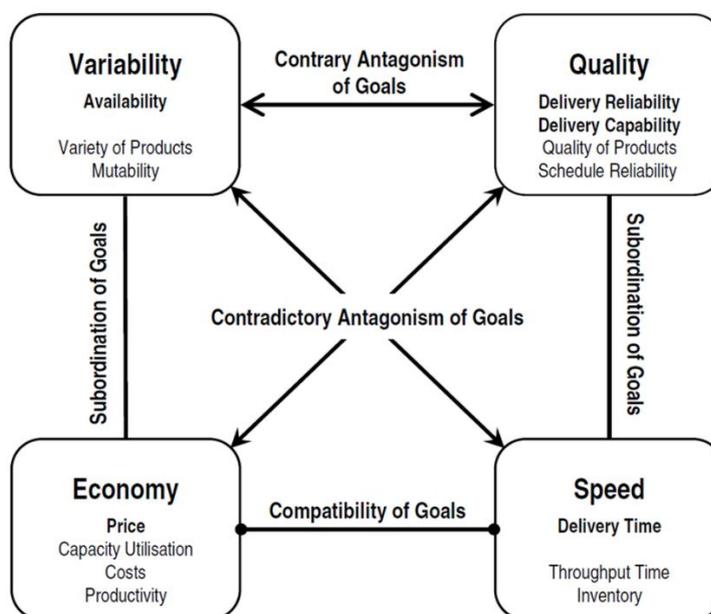


Fig. 1 - Rapporto degli obiettivi nell'approccio industriale (Fonte: Erlach)

In questo quadro di ricerca del miglior compromesso, il termine Lean Production nasce negli anni '80 (Womack et al., 1991), analizzando e confrontando le prestazioni del sistema di produzione dei principali attori del settore automotive dell'epoca con l'industria giapponese Toyota, nel tentativo di identificare le ragioni della superiorità produttiva di quest'ultima. La definizione universalmente accettata generalizza il sistema di produzione Toyota, identificando una via alternativa, che supera i limiti della produzione di massa, largamente applicata nel settore manifatturiero. Il fondamento della filosofia Lean è l'eliminazione o la riduzione di una qualsiasi forma di spreco nel sistema produttivo, identificando come spreco qualsiasi operazione che non contribuisca alla generazione di valore, ossia per la quale il consumatore non riconosce valore e per la quale non è disposto a pagare.

L'eliminazione degli sprechi si fonda su uno sforzo di miglioramento costante del processo produttivo basato su un metodo generale diviso in cinque fasi fondamentali (Womack & Jones, 2003), applicate iterativamente attraverso cicli di analisi e miglioramento:

1. Identificazione del valore
2. Mappatura del processo
3. Creazione di un flusso di valore

4. Introduzione di un sistema “pull” (ossia di richiesta di prodotto)
5. Applicazione delle migliorie e monitoraggio dei risultati

Per ognuna di queste fasi sono stati introdotti diversi metodi di analisi con strumenti specifici in funzione dei risultati attesi per ciascuna fase o in funzione del settore industriale di applicazione (ad esempio: Value-Stream Mapping - VSM, Rother & Shook, 1998 o Last Planner System – LPS, Ballard & Howell, 1994).

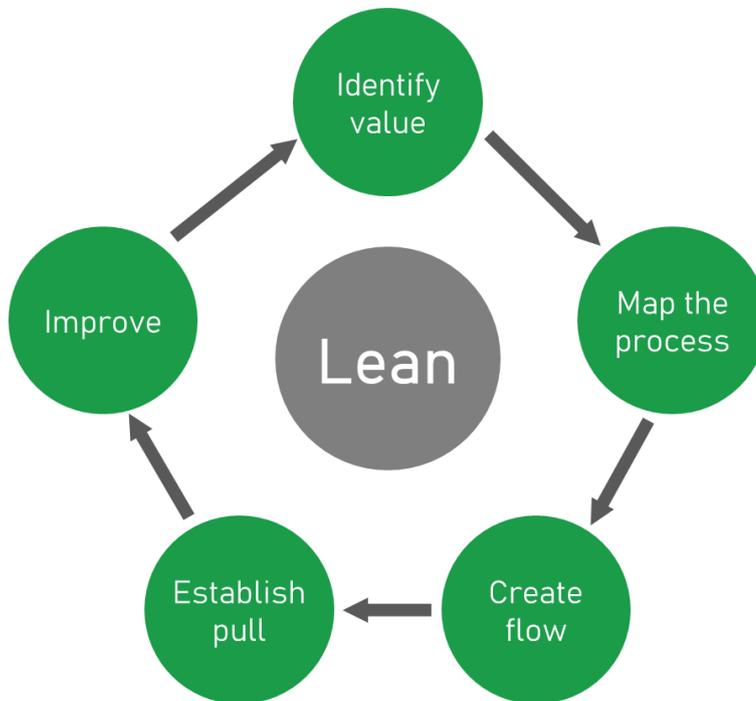


Fig. 2 - Le cinque fasi principali del metodo Lean

La filosofia Lean nasce in un contesto industriale fortemente orientato alla produzione di massa, in cui il sistema di produzione è dominato dalle operazioni di trasformazione della materia (Make to Stock - MtS, Wortmann, 1983). L'applicazione del metodo Lean porta all'introduzione della strategia Just in Time (JIT) che pone l'obiettivo di minimizzare i magazzini, sia in entrata per la materia prima o per le componenti, sia in uscita per i prodotti finali. Minimizzare i magazzini richiede che il processo di produzione adotti un sistema “pull”, ossia di richiesta di prodotto solo nel momento in cui è indispensabile alle operazioni da svolgersi nel processo. L'introduzione della strategia JIT porta l'industria progressivamente alla trasformazione del sistema di produzione verso modelli Assembly to Order (AtO) o Make to Order (MtO, Wortmann, 1983).

2.1.2 Il contesto del settore delle costruzioni e l'industrializzazione dei processi

Il settore delle costruzioni è governato da un processo produttivo che fonda le sue operazioni su lavorazioni artigianali e altamente personalizzate. La sua peculiarità si basa su progetti che sono unici (Brady et al., 2011). Ogni opera è unica, prototipale: si descrive il settore delle costruzioni come “one-of-a-kind production” (Lindhard and Wandahl, 2014). La complessità del prodotto si riflette sulla complessità del sistema produttivo, definibile come Engineer to Order (EtO, Wortmann, 1983), ed è generata da fattori intrinseci ed estrinseci al prodotto (inteso come l'opera finale). Il gruppo degli stakeholder coinvolti (committenza, progettisti, appaltatori, subappaltatori, etc.) varia singolarmente da opera ad opera, generando variabilità di requisiti ed obiettivi di prodotto, attraverso

un flusso informativo ed un sistema di comunicazione non standardizzato (Ratajczak et al., 2019). Inoltre, ogni sito di costruzione presenta condizioni al contorno diverse (Lindhard & Wandahl, 2014) e ogni progettista (architetto od ingegnere) utilizza strategie diverse per soddisfare le esigenze della committenza, rendendo impossibile una standardizzazione delle operazioni di installazione in opera (Schulmeister, 2009). Le tecniche di prefabbricazione e standardizzazione di prodotto, per interi edifici o per componenti complesse, sono state introdotte a partire dagli anni '40 nel tentativo di ridurre la complessità dovuta a progetti unici e nel tentativo di trasformare il sistema produttivo in un modello Assembly to Order (AtO) o Make to Order (MtO), riducendo le lavorazioni artigianali, in favore di lavorazioni industriali off-site. Nonostante queste tecniche possano gettare le basi per un'industrializzazione del settore delle costruzioni, i prodotti prefabbricati non hanno mai avuto un successo significativo a livello di mercato. La comunità scientifica è sempre stata scettica nei confronti delle tecniche di prefabbricazione e standardizzazione, dichiarandone più volte l'insuccesso: nonostante una grande potenzialità per ridurre l'impatto ambientale del settore delle costruzioni, le opere prefabbricate non riescono a rispondere alle esigenze del mercato, che richiede prodotti unici e con caratteristiche individuali; pertanto, un'opera prototipo, universalmente applicabile, non esiste. Opere prefabbricate, concepite per l'efficienza, possono apparire una soluzione ideale, ma peccano di personalizzazione e attenzione al dettaglio. Creando componenti off-site, invece che on-site, esiste il pericolo di una totale disconnessione tra il progettista ed il contesto dell'opera (Wronski, 2013). Inoltre, la prefabbricazione presenta limiti insormontabili nel settore delle costruzioni, limiti che portano ad un paradosso: se si ipotizzasse di poter realizzare prodotti interamente prefabbricati, si potrebbe gestire la logistica e la consegna al cliente finale così come avviene per i prodotti dell'industria manifatturiera?



Fig. 3 - Trasporto di un edificio prefabbricato (fonte: rdcnewsadvice.wpengine.com)

Le operazioni di sviluppo prodotto (inteso come progettazione ed ingegnerizzazione) appaiono quindi indispensabili per non snaturare le peculiarità del settore e per non svalutare le opere. Le strategie di industrializzazione ed ottimizzazione devono, quindi, contemplare anche queste operazioni, ponendo al centro della discussione anche il flusso informativo ed i sistemi di comunicazione, con la consapevolezza dei limiti strutturali che le tecniche di prefabbricazione e standardizzazione di prodotto portano in un sistema di produzione governato dalla complessità di prodotto.

2.1.3 Limiti dell'applicazione della filosofia Lean al settore delle costruzioni

Come precedentemente discusso, la filosofia Lean nasce in un contesto industriale fortemente orientato alla produzione di massa, in cui il sistema di produzione è dominato dalle operazioni di trasformazione della materia. Cercando di applicare al settore delle costruzioni un ciclo di analisi e miglioramento, basato sulle 5 fasi fondamentali della filosofia Lean, si incontrano alcune divergenze e difficoltà sin dalle prime due fasi: identificazione del valore e mappatura del processo.

Come dimostrano gli insuccessi delle tecniche di prefabbricazione e standardizzazione di prodotto, il concetto di valore deve essere allargato rispetto all'industria manifatturiera. Il mercato delle costruzioni richiede prodotti altamente personalizzati, progettati ed ingegnerizzati su misura per le esigenze del cliente finale. Le operazioni di sviluppo prodotto devono essere necessariamente incluse nella fase di mappatura in quanto concorrono direttamente al valore riconosciuto dal cliente.

Le tecniche e gli strumenti Lean ad oggi utilizzati per l'industria manifatturiera, come la VSM, devono essere adatti e trasformati per sistemi produttivi definibili come Eto.

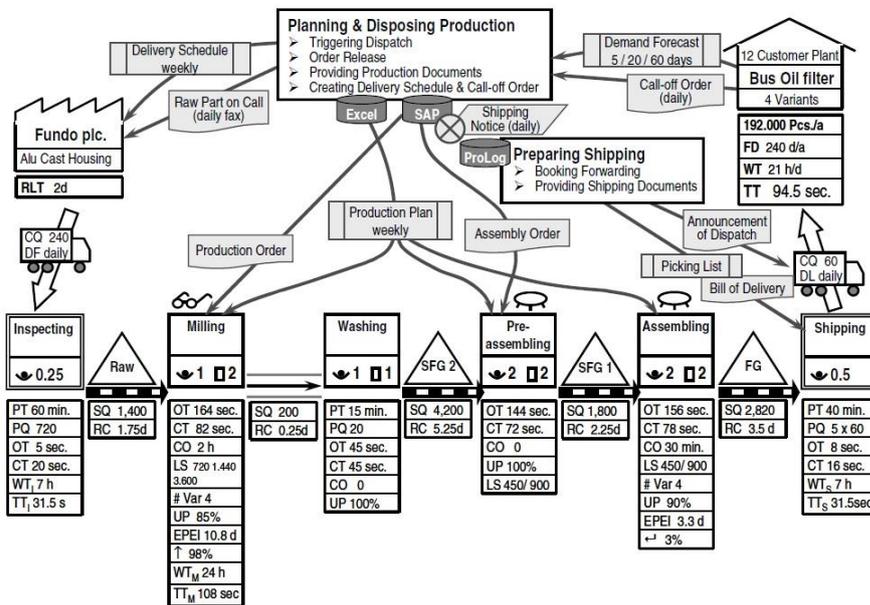


Fig. 4 - VSM di un sistema di produzione tipo (Fonte: Erlach)

Nell'industria manifatturiera, generalmente il cliente non riconosce valore alle operazioni legate al flusso informativo o ad i sistemi di comunicazione (es. operazioni ufficio vendite, ufficio acquisti, sviluppo prodotto, pianificazione della produzione, etc.). Le tecniche come la VSM non analizzano e rappresentano in modo sufficientemente rappresentativo tali operazioni, rendendo quasi impossibile un'ottimizzazione in ottica Lean del flusso informativo o dei sistemi di comunicazione.

Koskela et al. (2002), nel trasferire i principi della filosofia Lean al settore delle costruzioni, definisce la Lean Construction come: "un modo per sviluppare progetti di costruzione che minimizza gli sprechi di materiali, tempo e risorse per massimizzare il valore al cliente finale". Egli (2000) sottolinea l'importanza di 7 flussi fondamentali per la definizione del valore nel settore delle costruzioni: 1) materia, 2) persone, 3) informazioni, 4) strumenti, 5) condizioni al contorno, 6) spazio, 7) lavori progressi.

Nonostante la comunità scientifica abbia evidenziato le differenze sostanziali nella filosofia Lean tra il settore delle costruzioni e l'industria manifatturiera, in termini applicativi, la Lean Costruzione offre tecniche e strumenti principalmente legati alle operazioni di installazione in opera ovvero legate ai flussi di materia e persone (Koskela, 1992) come il Last Planner System (Ballard & Howell, 1994).

2.2 Le opportunità offerte dalla trasformazione digitale

La trasformazione digitale (conosciuta anche come digitalizzazione) sta progressivamente trasformando la società e l'economia mondiale, creando nuove opportunità di mercato per prodotti e servizi.

Il McKinsey Global Institute (MGI), analizzando lo status-quo del mercato europeo, evidenzia che solo le grandi industrie possiedono un livello adeguato di maturità digitale e che, anche a parità di dimensione di industria, alcuni settori soffrono un basso livello di digitalizzazione come il settore primario e quello delle costruzioni (MGI, 2016). La trasformazione digitale non sta portando a benefici orizzontali per l'intero mercato e per l'intero comparto industriale, nonostante l'obiettivo generale della digitalizzazione sia lo stesso: ottenere maggiore qualità, produttività, capacità dei sistemi produttivi, senza generare sprechi di risorse (Jack Hu, 2013).

Il settore delle costruzioni deve la sua arretratezza nella digitalizzazione alla complessità di prodotto e alla complessità della sua catena del valore (Jensen et al., 2018). Le stesse difficoltà che si possono riscontrare nei limiti all'industrializzazione del settore, discussi nei paragrafi precedenti. Il flusso informativo ed i sistemi di comunicazione del settore delle costruzioni appaiono frammentati e la causa dei maggiori sprechi di risorse sono da ricondurre alla mancanza di un sistema informativo universalmente accettato (BSI, 2003 - PMI, 2013).

La trasformazione digitale si sta manifestando nel settore delle costruzioni come un'opportunità per superare i limiti dovuti alla complessità di prodotto, spingendo per l'implementazione di nuovi approcci all'industrializzazione e per l'adozione di un ambiente digitale di collaborazione interdisciplinare che ponga le basi per un sistema informativo universalmente accettato.

La digitalizzazione dei sistemi di produzione permette la formalizzazione di nuovi approcci all'industrializzazione, offerti dalle smart factory (o Industria 4.0), grazie all'implementazione dei Cyber-Physical Systems (CPS), ossia l'implementazione di sistemi intelligenti connessi (Wang et al. 2017). Questi sistemi, secondo Broy (2013) possono essere definiti come "il risultato della combinazione di sistemi integrati nel cyberspazio. Supportano la comprensione del mondo reale in Internet e l'accesso a servizi e dati a livello globale".

Il Building Information Modelling (BIM), o Building Information Management, come ambiente digitale di collaborazione interdisciplinare per l'intero ciclo di vita di un'opera, si sta affermando come sistema informativo universale per il settore delle costruzioni (Direttiva EU 24/2014). Il BIM permette di organizzare le informazioni attraverso un'infrastruttura digitale che combina informazioni geometriche tridimensionali (disegni tecnici, dettagli costruttivi, etc.) con informazioni alfanumeriche (costi, tempi di assemblaggio, istruzioni di manutenzione, etc.), mirando ad offrire una piattaforma che spazia dalla pianificazione, alla progettazione, alla costruzione, all'esercizio, sino alla dismissione di un'opera (Sacks et al., 2018).

Assumendo che il BIM sia universalmente accettato come sistema informativo per il settore delle costruzioni, l'automazione del flusso informativo rappresenta la nuova frontiera nello sviluppo prodotto per un'interfaccia efficiente con smart factory e CPS. Diversi casi studio dimostrano che le tecniche di Computational Design siano le più promettenti per un'automazione efficiente del flusso informativo del settore delle costruzioni (Albayrak & Tunçer, 2011; Yuan et al., 2017; Bianconi et al., 2019).

2.2.1 La Mass Customization come nuovo approccio all'industrializzazione del settore delle costruzioni

Il concetto di Mass Customization è formalmente definito nel libro "Future Perfect" di Stanley M. Davis nel 1989. Con Mass Customization si definisce una strategia di produzione che mira alla realizzazione di un prodotto personalizzato, secondo esigenze del singolo cliente, con un costo di produzione simile a un prodotto dalla produzione in serie o produzione di massa (Kaplan & Haenlein, 2006). I sistemi di produzione orientati

alla Mass Customization dovrebbero essere in grado di produrre lotti di ridotti dimensioni attraverso un sistema flessibile e velocemente riconfigurabile (Qiao et al., 2006).

Barman e Canizares (2015) identificano un modello di business per sistemi orientati alla Mass Customization al fine di creare e di immettere nel mercato sia beni tangibili che servizi intangibili. Loro descrivono gli elementi chiave di tali sistemi, come la produttività, la flessibilità di processo e la logistica, includendo una descrizione di quattro approcci fondamentali: collaborazione, adattabilità, cura al dettaglio e trasparenza.

Secondo Bock e Linner (2010), il settore delle costruzioni fonda la sua capacità di realizzare prodotti altamente personalizzati su tecnologie di informazione e comunicazione atte a creare un flusso informativo continuo. Mohammed Refaat Mekawy (2020) e Piroozfar et al. (2019) analizzano l'utilizzo del BIM per ipotizzare un nuovo approccio che mescola industrializzazione, prefabbricazione e Mass Customization. Questi ultimi si concentrano sullo sviluppo di uno studio che sviluppi un sistema di facciata prefabbricata dalla progettazione, alla produzione, fino all'assemblaggio in opera dei singoli elementi.

La Mass Customization, nella sua definizione formale e nelle sue applicazioni, include due aspetti principali: efficienza della produzione di massa combinata con la capacità di personalizzazione estrema e riconfigurabilità dei sistemi. Questi due aspetti si fondono nella visione di poter realizzare lotti di produzione di dimensione uno.

Se la trasformazione digitale offre sistemi di produzione più flessibili e riconfigurabili all'industria manifatturiera ed offre al settore delle costruzioni sistemi informativi che possono supportare la gestione della complessità di prodotto; è possibile affermare che la Mass Customization sia una visione convergente tra l'industria manifatturiera e il settore delle costruzioni, rappresentando, di fatto, il prossimo orizzonte per l'industrializzazione del settore delle costruzioni attraverso la trasformazione digitale (Pasetti Monizza & Matt, 2021).

2.2.2 Le tecniche di Computational Design per un'automazione efficiente del flusso informativo

La Mass Customization spinge verso una complessità di prodotto universalmente applicata. Complessità che non può essere gestita unicamente da un sistema informativo basato su BIM. Il BIM permette infatti di abbattere le barriere che ostacolano la collaborazione tra le diverse figure tecniche del settore dell'edilizia, riducendo errori generati da una frammentazione dell'informazione nei sistemi di comunicazione (Sacks et al., 2018). Ma per aumentare l'efficacia e l'efficienza dei sistemi informativi nel gestire la complessità di prodotto sembra opportuno introdurre un'automazione del flusso informativo attraverso tecniche proprie del Computational Design (Pasetti Monizza et al., 2018).

La conferenza Design Methods (1962) è stata un evento pionieristico, avanzando le prime ipotesi di utilizzo di tecniche computazionali nel settore delle costruzioni. Computational Design è una definizione ampiamente adottata, nel mondo scientifico ed accademico, per raccogliere tutte le discipline che applicano metodi computazionali alle attività di sviluppo prodotto come, ad esempio: Parametric Design, Algorithmic Design, Generative Design, etc. La definizione offerta da Jabi (2013) sintetizza un ampio dibattito nel modo scientifico che parte dagli anni '40 e dagli scritti dell'architetto Luigi Moretti (Bucci et al., 2002) e dalle origini matematiche della modellazione parametrica (Davis, 2013).

Oltre le implementazioni estetiche e di composizione architettonica, come il "Parametricist Manifesto" di Patrick Schumacher (Schumacher, 2008), l'automazione del flusso informativo dato dalle tecniche di Computational Design persegue nuovi standard di efficienza, qualità e sicurezza in edifici altamente complessi (Scheurer, 2014), implementando: ottimizzazione automatica delle geometrie, computazione e calcolo automatico delle forniture, pianificazione e produzione automatica di dati per i sistemi di produzione al fine di facilitare le operazioni di produzione ed installazione in opera.

3 Strategia di ottimizzazione per il progetto LegnAttivo

In questo contesto scientifico e considerata la composizione del partenariato, il progetto EFRE-FESR 1117 LegnAttivo, si prefigge di sviluppare un caso studio applicato nel settore delle facciate prefabbricate in legno per l'ottimizzazione del flusso informativo verso un sistema di produzione ipotetico, sfruttando le potenzialità offerte dagli strumenti digitali ad oggi disponibili per il settore delle costruzioni. Il caso studio può essere una base per future iniziative applicate e studi sui benefici degli strumenti digitali per l'ottimizzazione dei processi in ottica Lean.

3.1 Il sistema tecnologico e di produzione LegnAttivo

Considerato che il partenariato del progetto EFRE-FESR 1117 LegnAttivo non include nessun produttore sistemi costruttivi a base legno, le attività per lo sviluppo di un caso studio si sono focalizzate sull'ottimizzazione del flusso digitale tra le operazioni di sviluppo prodotto e produzione degli elementi. Per la produzione degli elementi si è ipotizzato un sistema tecnologico tipo, che potesse essere prodotto in un sistema di produzione ipotetico. Tale sistema di produzione è stato definito con lavorazioni il più semplici possibili, al fine di espanderne l'applicabilità e la replicabilità in contesti produttivi più o meno complessi. Il sistema di produzione si basa su 8 lavorazioni principali: 1) taglio delle componenti di base e degli elementi di rinforzo strutturale a controllo numerico (CNC) massimo su tre assi, 2) assemblaggio delle componenti di base, 3) installazione di eventuali elementi di rinforzo strutturale, 4) installazione dei sistemi impiantisti attivi, 5) installazione del materiale isolante, 6) installazione degli infissi, 7) installazione degli elementi di fissaggio, 8) opere di finitura esterna.

Il sistema tecnologico è stato dunque ipotizzato in linea con le possibilità del sistema di produzione definito precedentemente, spingendo sull'analisi di tecniche di automazione del flusso informativo in ottica di strategie di Mass Customization. Tali strategie si rendono indispensabili per due aspetti principali:

1. superare i limiti alla personalizzazione di prodotto in sistemi prefabbricati off-site, per poter offrire un sistema tecnologico che soddisfi qualsiasi esigenza della committenza in termini di prestazioni, sistemi installati e finiture esterne;
2. offrire una flessibilità di prodotto in grado di adattarsi a diverse condizioni al contorno e alla variabilità imposta dalla struttura esistente alla quale il sistema tecnologico è destinato.

Infine, la semplicità delle lavorazioni è stata trasferita anche alle tecnologie impiegate al fine di ottimizzare aspetti paralleli, come: ottimizzazione dei costi, logistica e facilità di installazione.

3.2 Definizione delle fasi di lavorazione

Il sistema tecnologico si prefigura come un sistema a pannelli leggeri, opportunamente ritagliati e fresati. Al pannello possono essere inseriti opportuni elementi di rinforzo strutturale a supporto dell'installazione dei sistemi di fissaggio o di sistemi che incidono sul peso finale del pannello come infissi o sistemi impiantistici attivi.

Partendo da un pannello grezzo si operano i primi tagli per la definizione delle dimensioni (lunghezza ed altezza) del pannello di facciata.

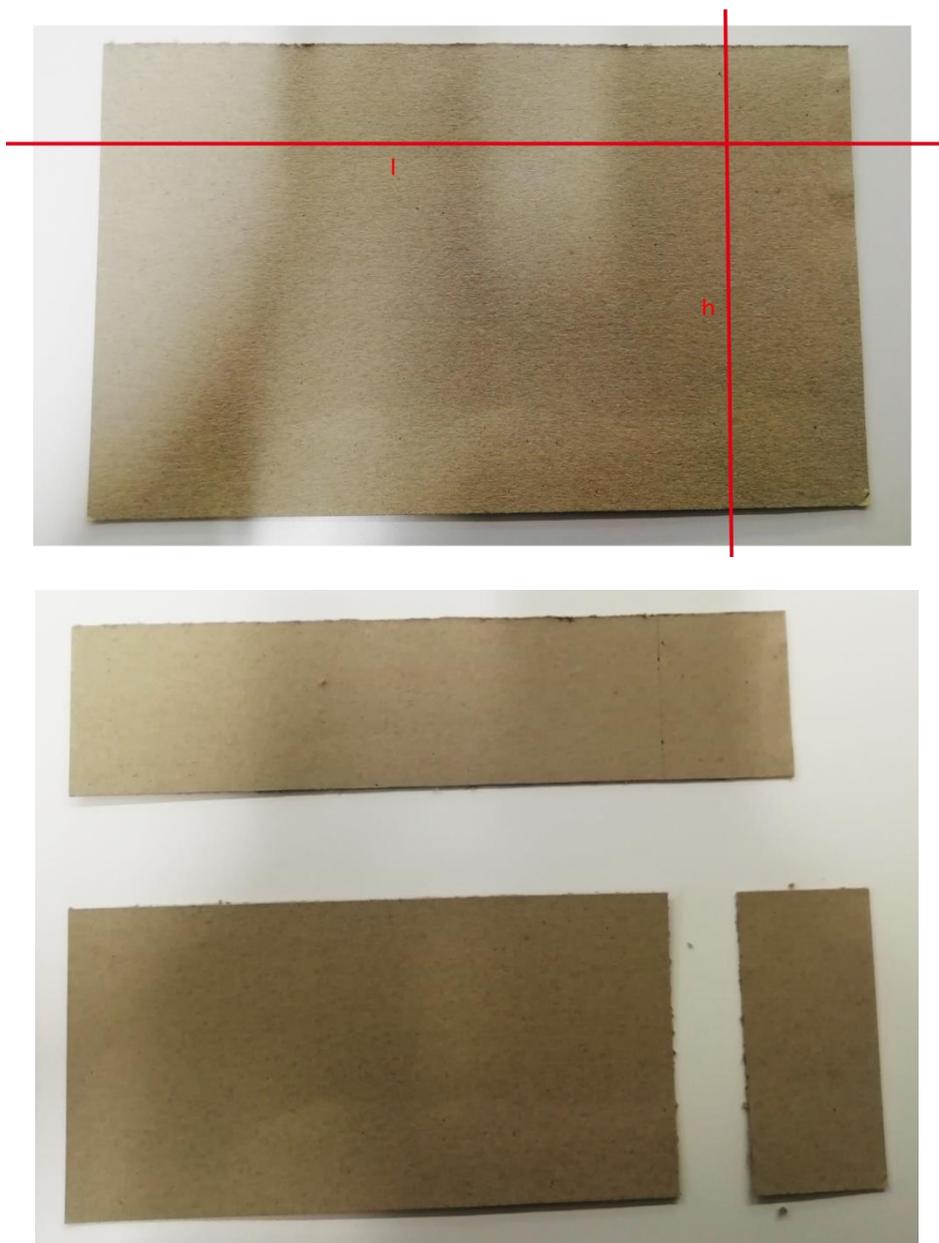


Fig. 5 - Primo taglio di pannello grezzo

Sul pannello di facciata si identifica una griglia di dimensioni pari a quelle del materiale isolante così da identificare una possibile struttura di irrigidimento (prevendo fenomeni di instabilità del pannello di facciata) ed evitare tagli e lavorazioni durante l'installazione del materiale isolante (Fig. 6).

Successivamente, si opera una fresatura di connessioni tipo Tenone-Mortasa (Fig. 7) e si lavora al taglio di elementi di irrigidimento dagli scarti del primo taglio (Fig. 8). Il taglio degli elementi di irrigidimento può avvenire secondo tracciati in forma libera. Questo permette la realizzazione di qualsiasi forma della superficie esterna, da un piano parallelo alla facciata, sino ad una superficie doppiamente curvata.

Gli elementi di irrigidimento sono connessi tra loro attraverso una connessione di carpenteria tipo mezzo-legno. In caso di superficie doppiamente curvata, gli elementi possono essere utilizzati come guide per la sagomatura dei pannelli isolanti che può avvenire attraverso sistemi meccanici come seghe a nastro o filo a caldo.

La lavorazione prosegue con la posa degli elementi di irrigidimento, eventualmente inserendo elementi di rinforzo strutturale, sul pannello di base (Fig. 9).

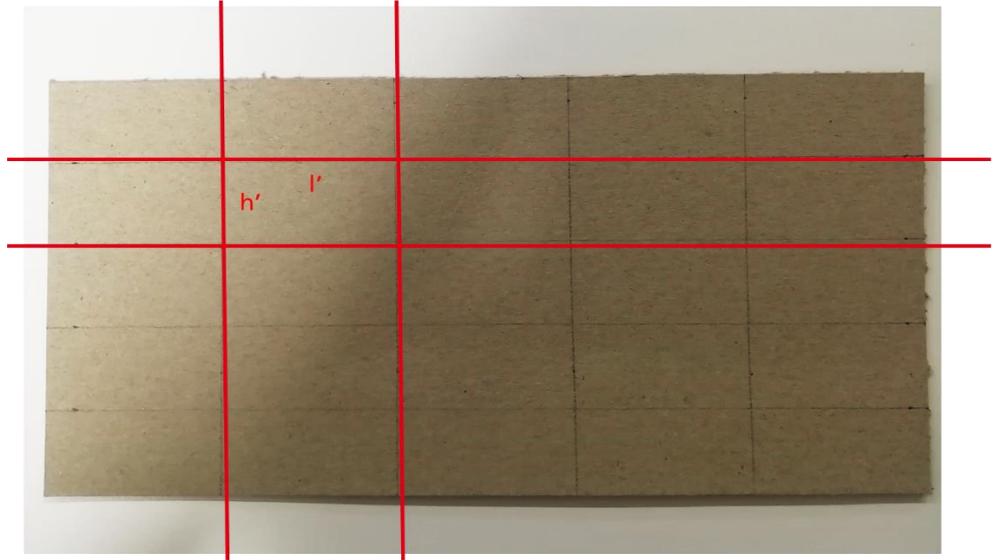


Fig. 6 - Identificazione della griglia per irrigidimento ed installazione del materiale isolante



Fig. 7 - Fresatura delle mortase sul pannello di base

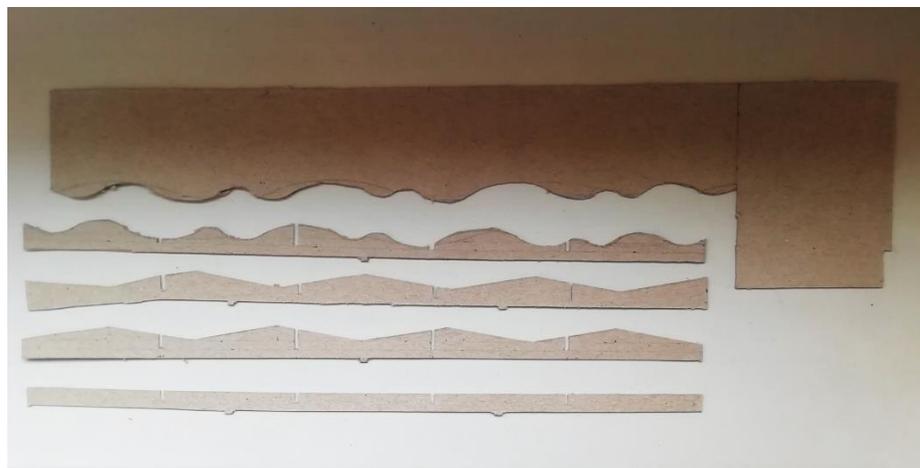


Fig. 8 - Taglio degli elementi di irrigidimento



Fig. 9 - Posa degli elementi di irrigidimento

Nel caso di pannello di facciata contenente un infisso, si opera il taglio del foro grezzo direttamente nel pannello di base e si predispose la griglia di irrigidimento per accogliere l'infisso ed i sistemi impiantistici attivi.

Per eventuali canalizzazioni o passaggio impianti da realizzarsi al di sotto del sistema isolante, si prevede una fresatura del pannello di base e una sagomatura degli elementi di irrigidimento durante le prime fasi di taglio.

Infine, il sistema di produzione prosegue con le installazioni delle componenti standard come identificato nel paragrafo precedente.

3.3 Identificazione di una strategia di ottimizzazione

Dalla definizione delle fasi di lavorazione emerge che le prime fasi di taglio delle componenti definiscono le caratteristiche del prodotto e governano le lavorazioni successive in una sequenza seriale di dipendenze, ossia, senza il taglio degli elementi, nessuna delle lavorazioni successive può essere eseguita. Inoltre, le lavorazioni successive si basano sull'installazione di componenti che, in un sistema di produzione standard, sono da considerarsi fornite da attori terzi ed esterni al sistema di produzione principale dei pannelli di facciata (es. pannelli isolanti, sistemi attivi, infissi, sistemi di fissaggio, etc.). Per tali ragioni, si è optato per l'implementazione di un caso studio che si focalizzasse principalmente sull'ottimizzazione del flusso informativo tra la fase di sviluppo prodotto e le prime fasi di taglio delle componenti. Si è sviluppata l'automazione del flusso di dati tra l'output di rilievo della facciata esistente e la definizione delle informazioni utili alle lavorazioni di taglio delle componenti. L'automazione è stata definita attraverso tecniche di Computational Design utilizzando specifici strumenti di visual scripting che rendessero più semplice ed accessibile la programmazione delle automazioni al gruppo di lavoro.

Indipendentemente dagli strumenti utilizzati, è possibile ricostruire la stessa logica definita nei paragrafi successivi con strumenti alternativi a quelli adottati, assicurando replicabilità dell'approccio adottato. Considerato il livello di dettaglio del sistema tecnologico che è stato possibile definire nell'ambito del progetto EFRE-FESR 1117 LegnAttivo, si è optato per strumenti basati sull'elaborazione di dati esclusivamente geometrici, ossia basati su sistemi tradizionali CAD invece che BIM. Questa scelta ha permesso di raggiungere i risultati attesi, senza richiedere sforzi aggiuntivi al gruppo di lavoro per ipotizzare condizioni non direttamente definibili dagli output dei pacchetti di lavoro precedenti.

Il passaggio ad un sistema informativo BIM, che faccia uso di informazioni alfanumeriche associate a contenuti geometrici, è facilmente implementabile sulla base delle automazioni a livello di informazioni geometriche sviluppato in questo progetto. Si lascia, pertanto, tale possibilità, a sviluppi futuri a seguito della chiusura delle attività di ricerca del progetto EFRE-FESR 1117 LegnAttivo.

4 Il caso studio del progetto LegnAttivo

Sulla base degli studi condotti in uno dei precedenti pacchetti di lavoro è stato individuato un edificio su cui sperimentare la strategia di ottimizzazione precedentemente identificata. L'edificio selezionato, ubicato in P.zza San Vigilio a Merano, è parte del patrimonio edilizio IPES (Istituto per l'Edilizia Sociale della provincia autonoma di Bolzano). Il prospetto, caratterizzato dalla presenza di balconi, le alberature che circondano il fabbricato, gli edifici limitrofi e la ridotta accessibilità del sito hanno reso l'edificio di P.zza San Vigilio un caso studio interessante per lo svolgimento delle attività illustrate in tale capitolo. Le attività sono state svolte attraverso l'utilizzo del software di modellazione tridimensionale CAD coadiuvato da uno strumento di programmazione visuale ad esso associato. Nonostante l'utilizzo di tali strumenti, il caso studio può essere replicato attraverso l'utilizzo di qualsiasi strumento che consenta una progettazione parametrica.

4.1 Protocollo di rilievo: identificazione delle informazioni rilevanti dell'esistente

Il rilievo dell'edificio costituisce il punto di partenza del processo di ottimizzazione sviluppato. Il modello geometrico dei prospetti è la prima fonte di informazioni sulle quali si basano gli algoritmi illustrati nei successivi paragrafi. Dunque, il primo passo è l'acquisizione dei dati necessari alla restituzione grafica del fabbricato. Il rilievo architettonico prevede distinte metodologie operative, di natura diretta o indiretta. Il rilievo indiretto è particolarmente efficace nell'acquisizione dei dati necessari alla ricostruzione dei prospetti il cui sviluppo verticale richiede l'utilizzo di strumenti in grado di rilevare punti all'interno di un sistema tridimensionale di coordinate. La stazione totale o il laser scanner 3D sono strumenti di misura ideali per individuare la posizione dei punti che definiscono la geometria dei vari elementi di facciata. Sebbene tali strumenti consentano di rilevare una quantità innumerevole di punti, nel caso studio è stato ipotizzato un rilievo semplificato per punti notevoli come mostrato in Fig. 10. Eseguite le misurazioni e trasferiti i dati nello strumento di disegno, i profili dei vari elementi architettonici sono ricostruiti collegando con delle linee i punti rilevati.



Fig. 10 – Caso studio con esempi di punti notevoli

Il funzionamento dello strumento di ottimizzazione sviluppato è legato al disegno CAD. Il disegno geometrico dei prospetti deve essere caratterizzato da un'organizzazione degli elementi architettonici che li compongono. È importante assegnare gli elementi a layer differenti al fine di garantire il funzionamento degli algoritmi di ottimizzazione come spiegato in dettaglio nei successivi paragrafi. Le geometrie sono distinte essenzialmente per tipologia di elemento che descrivono e per la funzione che ognuna delle categorie di elementi ha nel processo di calcolo. I colori ed il tipo di linea dei layer possono essere impostati liberamente mentre i nomi ed i relativi elementi contenuti devono essere:

1. Facade: insieme di polilinee che descrivono il perimetro delle facciate interessate dall'intervento di riqualificazione.
2. Window: insieme di polilinee che descrivono il perimetro degli infissi presenti nelle facciate sopradescritte.
3. Balcony: insieme di polilinee che descrivono il perimetro di elementi aggettanti quali balconi.
4. Obstacle: insieme di polilinee che descrivono il perimetro di elementi di possibile interferenza quali canalizzazioni o passaggio impianti etc.

Fig. 11 mostra come è stato impostato il disegno di prospetto del caso studio. L'immagine riportata evidenzia l'organizzazione del disegno secondo tre distinti layer in ognuno dei quali sono contenuti diversi elementi di facciata. Le finestre appartengono al layer Window di colore azzurro, il perimetro delle facciate al layer Facade di colore blu e le solette dei balconi al layer Balcony di colore rosso. Ulteriori elementi di cui è necessario tenere conto in fase di progettazione dei pannelli, ad esempio canalizzazioni o passaggio impianti, sono assegnati ad un altro layer di nome Obstacle come sopradescritto. Il rilievo di tali elementi deve essere eseguito tenendo in considerazione una tolleranza pari a metà della dimensione in lunghezza e larghezza dell'elemento.



Fig. 11 – Caso studio con distinzione degli elementi di facciata secondo layer.

4.2 Ottimizzazione del flusso di informazioni: strategia del processo di automazione

Il lavoro svolto è incentrato sullo sviluppo di una metodologia di ottimizzazione del flusso di informazioni finalizzate alla produzione del sistema tecnologico in legno per il risanamento energetico di facciata. Lo strumento sviluppato è caratterizzato da tre

algoritmi di ottimizzazione in grado di rispondere alle esigenze di un sistema di produzione nel quale collaborano molteplici figure. Infatti, ai fini dello sviluppo del processo di automazione, è stato ipotizzata una filiera informativa tipo caratterizzata da tre fasi. La prima fase, in carico allo studio di progettazione o un tecnico interno all'azienda, ha lo scopo di definire il disegno di facciata e identificare il numero e la tipologia di pannelli necessari per la realizzazione dell'intervento. La seconda fase, in carico al responsabile di produzione, genera il disegno CAD del tracciato per la produzione dei pannelli opachi. La terza fase, anch'essa in carico al responsabile di produzione, genera il disegno CAD del tracciato per la produzione dei pannelli con serramenti e sistemi attivi. È stato ipotizzato, dunque, un sistema in cui le lavorazioni per la produzione dei pannelli opachi e dei pannelli attivi sono distinte e avvengono solo al termine della prima fase. A tal fine, come mostrato in Fig. 12, le informazioni sono gestite attraverso tre algoritmi ognuno per una fase del processo sopradescritto. In particolare, gli algoritmi sono:

1. Algoritmo facciata: i dati in input sono definiti dall'utente attraverso un'interfaccia utente e derivati dal disegno di rilievo.
2. Algoritmo pannello opaco: i dati in input sono immessi dall'utente attraverso un'apposita interfaccia utente oltre che ricavati dal risultato del primo algoritmo.
3. Algoritmo pannello con serramenti: i dati in input sono immessi dall'utente attraverso un'apposita interfaccia utente oltre che ricavati dal risultato del primo algoritmo.

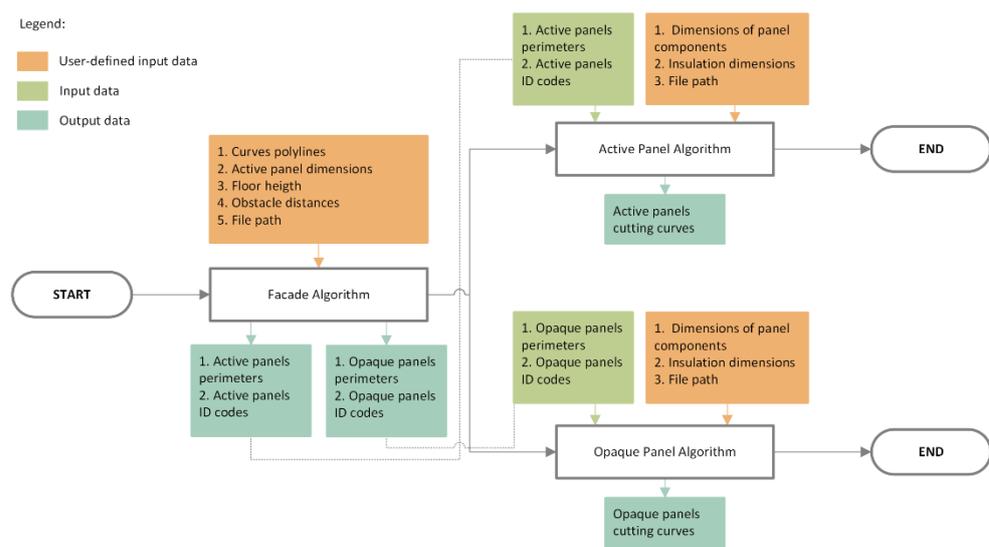


Fig. 12 – Diagramma di flusso delle informazioni

Lo scambio di informazione tra i tre algoritmi si basa sulla logica di esportazione e importazione dei dati. I risultati del primo algoritmo, infatti, sono salvati in una cartella esterna scelta dall'utente. Successivamente l'utente specifica il percorso file dei dati che sono importati nel secondo e terzo algoritmo. È necessario, dunque, avere i risultati dell'algoritmo facciata per eseguire i successivi e concludere il processo di calcolo.

4.2.1 Algoritmo facciata: analisi dell'input da rilievo e definizione della scomposizione di facciata

L'algoritmo facciata a partire dal disegno di rilievo e da parametri stabiliti dall'utente identifica il numero e la tipologia di pannelli necessari per la realizzazione dell'intervento,

definendo il nuovo disegno di prospetto dell'edificio. Le informazioni su cui si basa il calcolo sono:

1. Disegno CAD: disegno di rilievo con distinzione degli elementi secondo layer come descritto nel paragrafo 4.1 Protocollo di rilievo: identificazione delle informazioni rilevanti dell'esistente.
2. Floor height: altezza interpiano indice della dimensione massima del pannello secondo l'asse y.
3. Obstacle distance: distanza del fabbricato dagli elementi del contesto, ad esempio alberature, indice dello spazio a disposizione per la posa in opera dei pannelli.
4. Facade: facciata di cui esportare le informazioni dei pannelli opachi e dei pannelli attivi necessarie nei successivi algoritmi.
5. Windows panels settings: larghezza e lunghezza del pannello con serramenti e sistemi attivi.
6. File path: percorso file della cartella in cui salvare i risultati del primo algoritmo di calcolo.

Le informazioni sopradescritte sono acquisite in parte attraverso un'interfaccia utente ed in parte dal disegno CAD importato nel software di modellazione come mostrato in Fig. 13.

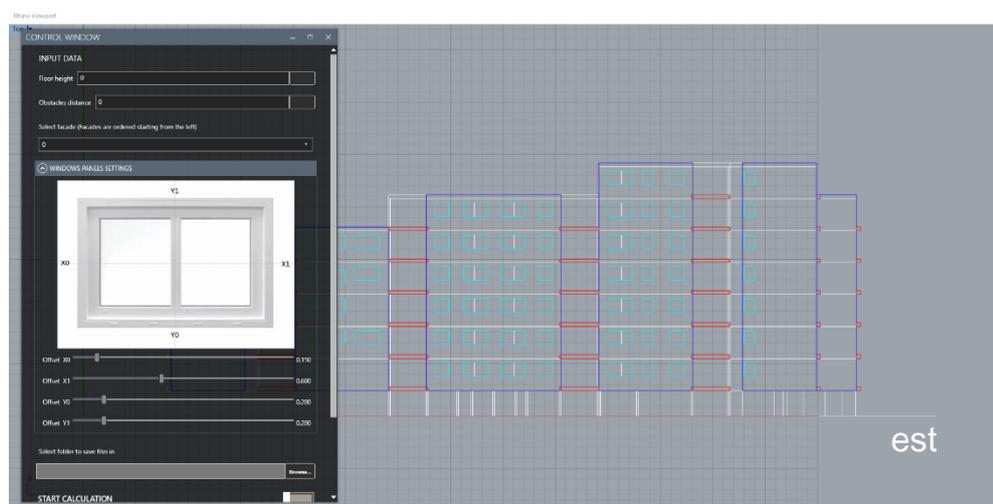


Fig. 13 – Interfaccia utente e disegno di rilievo

Definiti i dati di ingresso l'algoritmo, a partire dalle polilinee che descrivono i serramenti, definisce una griglia di punti la cui unione genera una serie di linee orizzontali e verticali. Tali linee scompongono il prospetto in sottomoduli. I sottomoduli che contengono le polilinee dei serramenti sono definiti pannelli attivi e distinte dai restanti definiti pannelli opachi. Le dimensioni dei pannelli attivi sono stabilite dall'utente, al contrario le misure dei pannelli opachi derivano da molteplici parametri. In una prima fase le dimensioni secondo l'asse x e y dei pannelli opachi sono determinate dal processo di scomposizione del prospetto secondo linee orizzontali e verticali. In una seconda fase, l'algoritmo verifica se tali dimensioni sono idonee per eseguire la posa in opera dei pannelli ed eventualmente suddivide nuovamente i sottomoduli fino ad ottenere una dimensione idonea degli elementi. La verifica è effettuata tenendo in considerazione l'altezza interpiano, la distanza del fabbricato da elementi del contesto che possono costituire un intralcio nella fase di cantiere e le dimensioni dello spazio di lavoro necessario. Le dimensioni ottenute dalla prima fase di scomposizione sono confrontate con le

dimensioni della massima sagoma trasportabile, se maggiori di quest'ultima il pannello subisce una seconda suddivisione. In seguito, se la distanza dagli ostacoli è inferiore allo spazio di lavoro necessario per fissare tali pannelli questi ultimi sono ulteriormente scomposti fino ad una dimensione minima secondo l'asse x e y di 1,50 mt definita dalle analisi condotte con i partner di progetto. Fig. 14 illustra in maniera schematica la logica alla base del funzionamento dell'algoritmo.

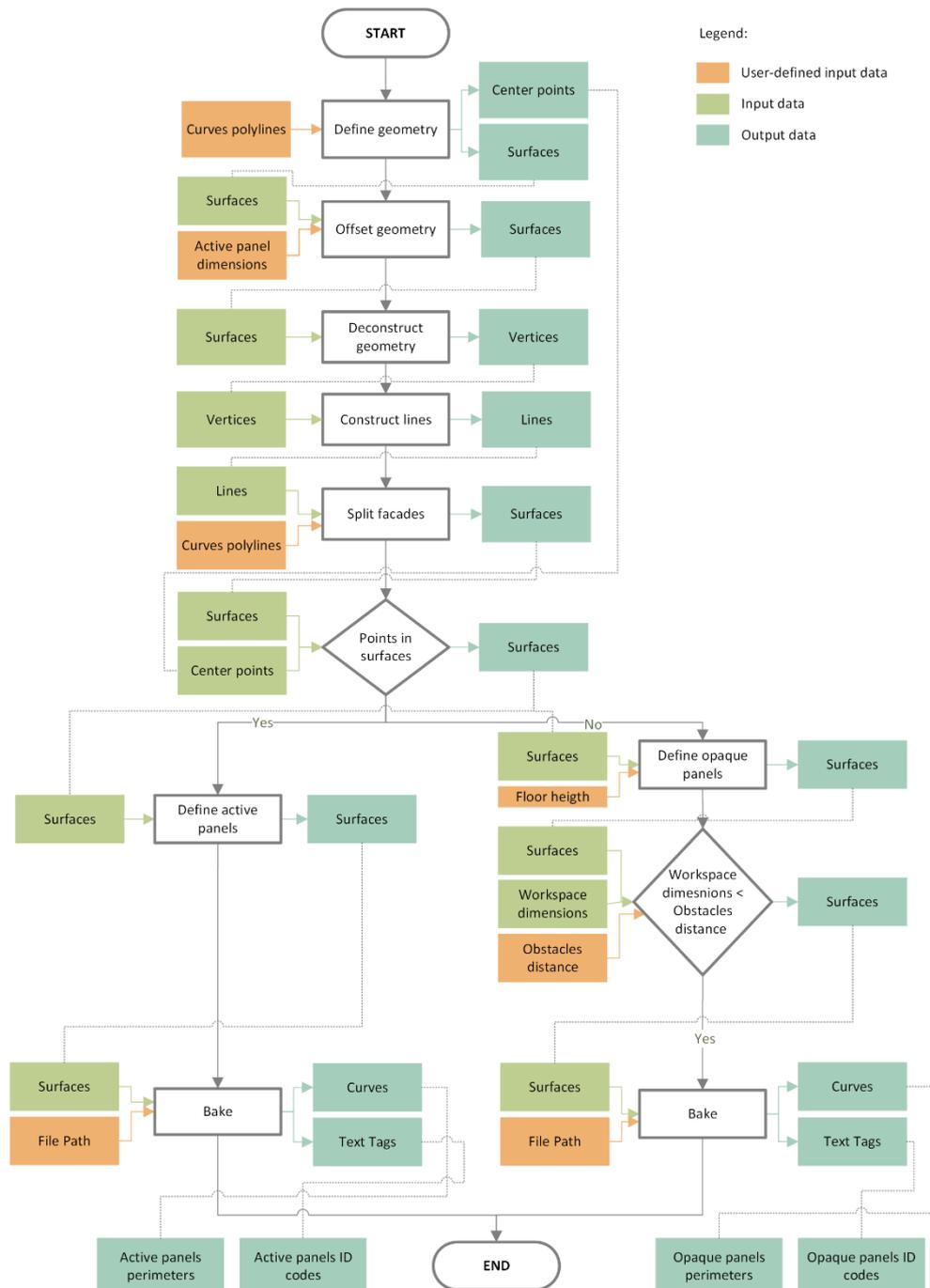


Fig. 14 – Diagramma di flusso delle informazioni dell'algoritmo facciata

Definiti i pannelli opachi da un lato ed i pannelli attivi dall'altro, l'algoritmo genera il risultato finale. Concluso il calcolo, le superfici dei pannelli ed i relativi codici identificativi

possono essere riportati come geometrie nell'ambiente di modellazione, come mostrato in Fig. 15, attraverso il tasto bake presente nell'interfaccia grafica. Tali geometrie sono associate a differenti layer a seconda che descrivono i pannelli opachi o i pannelli attivi.

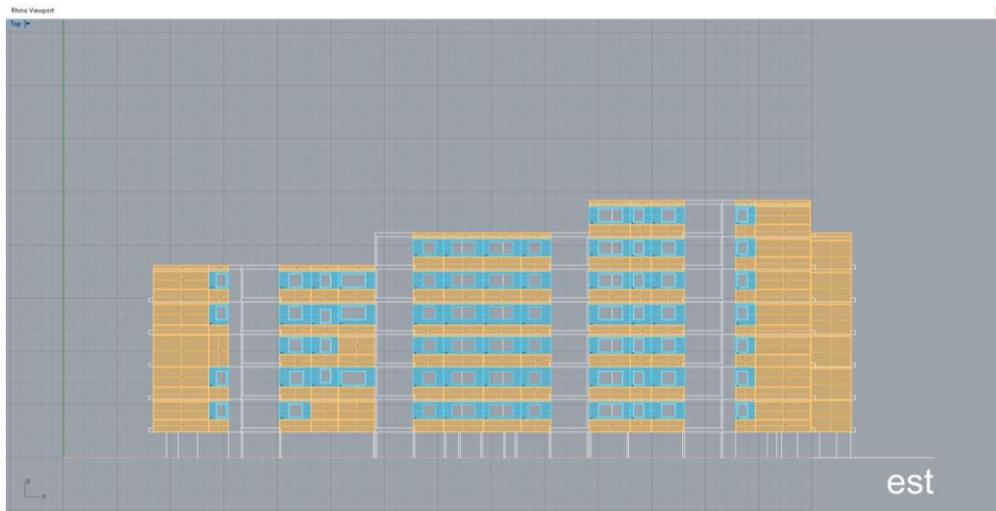


Fig. 15 – Disegno di prospetto con distinzione dei pannelli secondo layer

Ognuno dei pannelli è caratterizzato da un codice identificativo che ne definisce la facciata di appartenenza, la posizione in facciata e l'ordine di assemblaggio di modo da facilitare la posa in opera. Nel caso studio sono stati generati codici alfanumerici: F0-P0, ad esempio, indica che il pannello appartiene alla facciata 0 (le facciate sono numerate a partire da sinistra), è un pannello opaco ed è il primo della sequenza; F0-W0 indica, secondo la stessa logica, che il pannello appartiene alla facciata 0, è un pannello attivo ed è il primo della sequenza. Fig. 16 mostra in dettaglio i codici identificativi distinti in base alla tipologia di pannello.

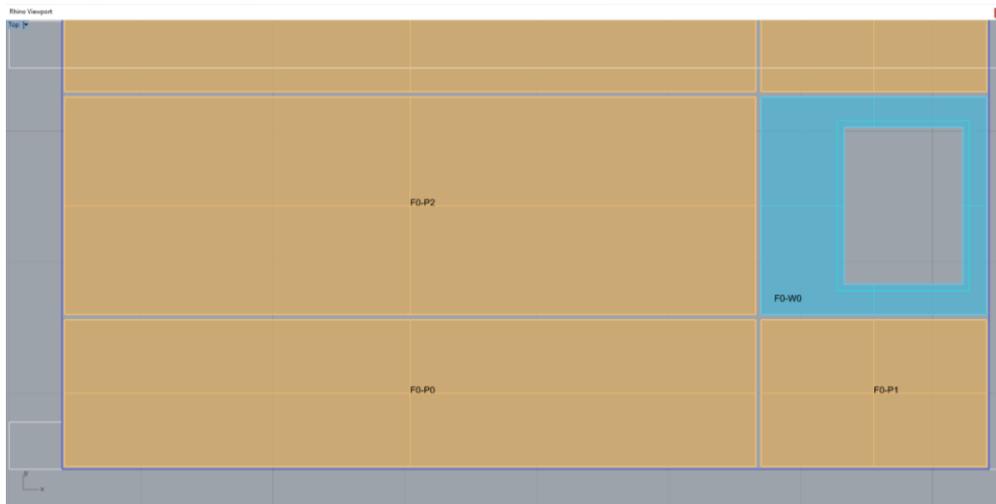


Fig. 16 – Dettaglio di pannelli con codici identificativi

I dati generati al termine del calcolo, oltre ad essere riportati nell'ambiente di modellazione, sono salvati in una cartella esterna il cui percorso file è specificato dall'utente nell'interfaccia grafica. L'utente, inoltre, specifica la facciata di cui eseguire l'esportazione dei dati se il prospetto è composto da più facciate come nel caso studio. Nel caso studio, le geometrie dei pannelli sono esportate come file Rhino 3-D Model mentre i codici identificativi sono esportati in formato XML. Allo stesso modo, sono

esportate le geometrie di balconi ed elementi di interferenza (canalizzazioni, passaggio impianti etc.). Come descritto nel paragrafo 4.1 Protocollo di rilievo: identificazione delle informazioni rilevanti dell'esistente, è importante che il rilievo di tali geometrie è eseguito tenendo in considerazione una tolleranza per ogni lato. Prima di esportare i dati, dunque, è necessario verificare che le geometrie hanno la tolleranza richiesta ed eventualmente modificarne il profilo. Inoltre, se nel progetto di riqualificazione è prevista l'aggiunta di elementi, ad esempio impianti per la VMC (Ventilazione Meccanica Controllata), è necessario integrarne le geometrie nel disegno di rilievo. Come descritto nel paragrafo 4.2 Ottimizzazione del flusso di informazioni: strategia del processo di automazione, i risultati dell'algoritmo facciata sono i dati di ingresso dei successivi algoritmi e dunque è necessario garantire un corretto passaggio di informazioni.

4.2.2 Algoritmo pannello opaco: definizione dei dati di lavorazione per gli elementi opachi di facciata

L'algoritmo pannello opaco a partire dai dati esportati dall'algoritmo facciata e da parametri stabiliti dall'utente, definisce il tracciato utile per la produzione del sistema tecnologico secondo quanto descritto nel Paragrafo 3.2 Definizione delle fasi di lavorazione. Le informazioni su cui si basa il calcolo sono:

1. Panel height: spessore del pannello grezzo.
2. Connection width: dimensione secondo l'asse y della connessione tipo Tenone-Mortasa.
3. Reinforcement dimensions: dimensioni degli elementi di rinforzo strutturale.
4. Insulation dimensions: dimensioni del materiale isolante.
5. Cutting tolerance: tolleranza di lavorazione.
6. Obstacle height: dimensione secondo l'asse z degli elementi di ingombro quali canalizzazioni, passaggio impianti etc.
7. Balcony height: dimensione secondo l'asse z di elementi aggettanti quali, ad esempio, balconi.
8. File path: percorso file della cartella in cui sono presenti il file contenente le geometrie dei pannelli e il file contenente i codici identificativi esportati dall'algoritmo facciata.

Le informazioni sopradescritte sono acquisite attraverso un'interfaccia utente come mostrato in Fig. 17.



Fig. 17 - Interfaccia utente algoritmo pannello opaco

In una prima fase, dopo aver importato le geometrie dei pannelli opachi, l'algoritmo suddivide ogni superficie secondo la dimensione del materiale isolante. La scomposizione genera una griglia di punti ognuno dei quali individua la posizione delle connessioni di carpenteria tipo mezzo-legno. Il punto medio dei segmenti adiacenti ricavati dalla griglia di punti individua, invece, la posizione delle connessioni tipo Tenone-Mortasa. In una seconda fase, l'algoritmo genera una serie di linee orizzontali e verticali collegando i punti. Le linee identificano la posizione degli assi verticali e orizzontali di irrigidimento. Determinata la posizione degli elementi di irrigidimento e delle connessioni le componenti base del sistema tecnologico sono modellate secondo le dimensioni specificate dall'utente. Al fine di garantire l'installazione di eventuali elementi di rinforzo strutturale, ipotizzati lungo il perimetro del sistema tecnologico, l'algoritmo modifica il profilo degli elementi di irrigidimento. Allo stesso modo, la sagoma del sistema tecnologico è modificata nel caso in cui sono presenti canalizzazioni, passaggio impianti o balconi in facciata che possono interferire con il sistema stesso come mostrato in Fig. 18.

Infine, l'algoritmo effettua una sezione dei modelli tridimensionali delle componenti base al fine di definire il tracciato per il taglio e la fresatura del pannello grezzo. Il tracciato è riportato nell'ambiente di modellazione attraverso il tasto bake presente nell'interfaccia utente come mostrato in Fig. 18.

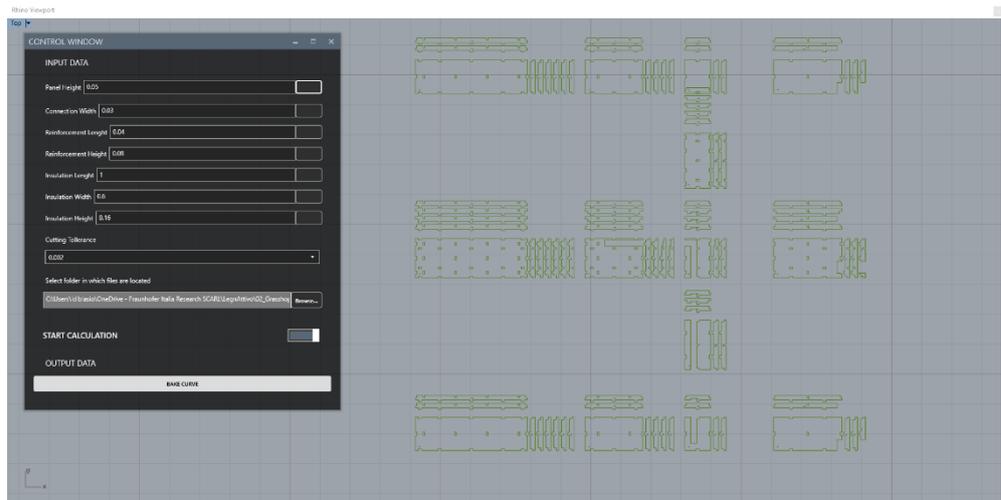


Fig. 18 - Tracciato delle componenti base

Il tracciato delle componenti base è caratterizzato da codici identificativi che definiscono la facciata di appartenenza del sistema tecnologico e la posizione in facciata. Inoltre, i codici identificativi definiscono posizione e tipologia di ogni componente base di modo da facilitare la fase di assemblaggio. Nel caso studio il codice alfanumerico che identifica il sistema tecnologico, ad esempio F3-P0, è definito dall’algoritmo facciata ed importato dall’algoritmo pannello opaco. L’algoritmo genera, invece, i codici identificativi degli elementi di irrigidimento: F3-P0T0 indica, ad esempio, che l’irrigidimento è parte del sistema tecnologico F3-P0, è un irrigidimento orizzontale ed è il primo della sequenza a partire dal basso; F3-P0M0 indica, secondo la stessa logica, che l’irrigidimento è parte del sistema tecnologico F3-P0, è un irrigidimento verticale ed è il primo della sequenza a partire da sinistra. Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21 mostrano in dettaglio i codici identificativi.

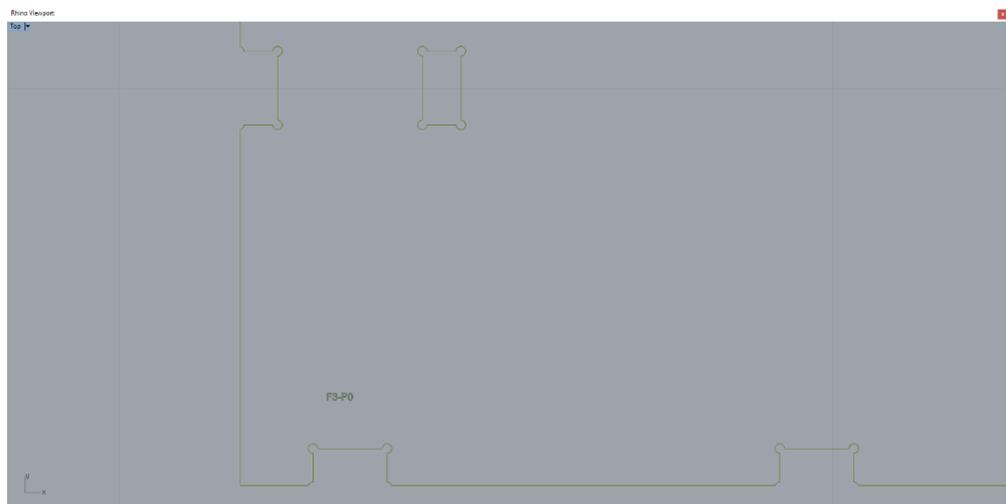


Fig. 19 – Esempio di codice identificativo del pannello base

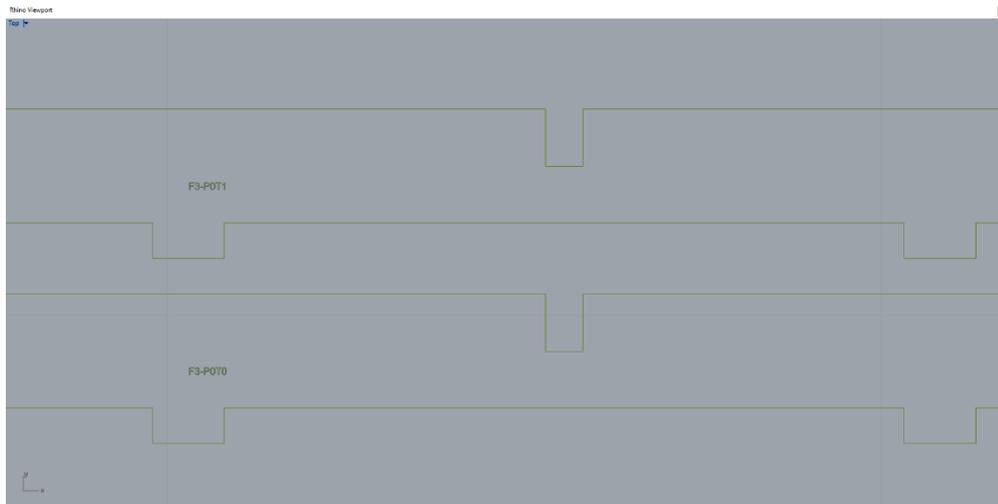


Fig. 20 – Esempio di codici identificativi degli irrigidimenti orizzontali

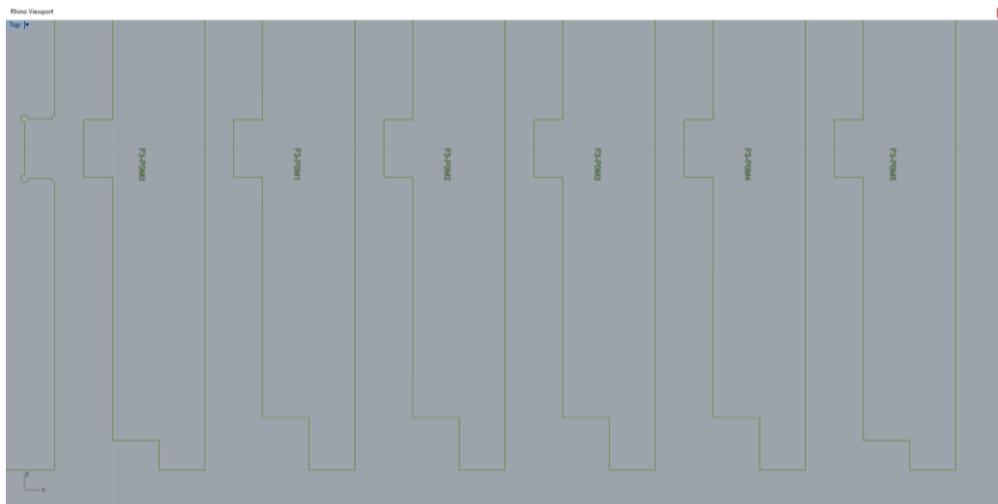


Fig. 21 – Esempio di codici identificativi degli irrigidimenti verticali

Fig. 22 illustra in maniera schematica la logica alla base del funzionamento dell'algoritmo.

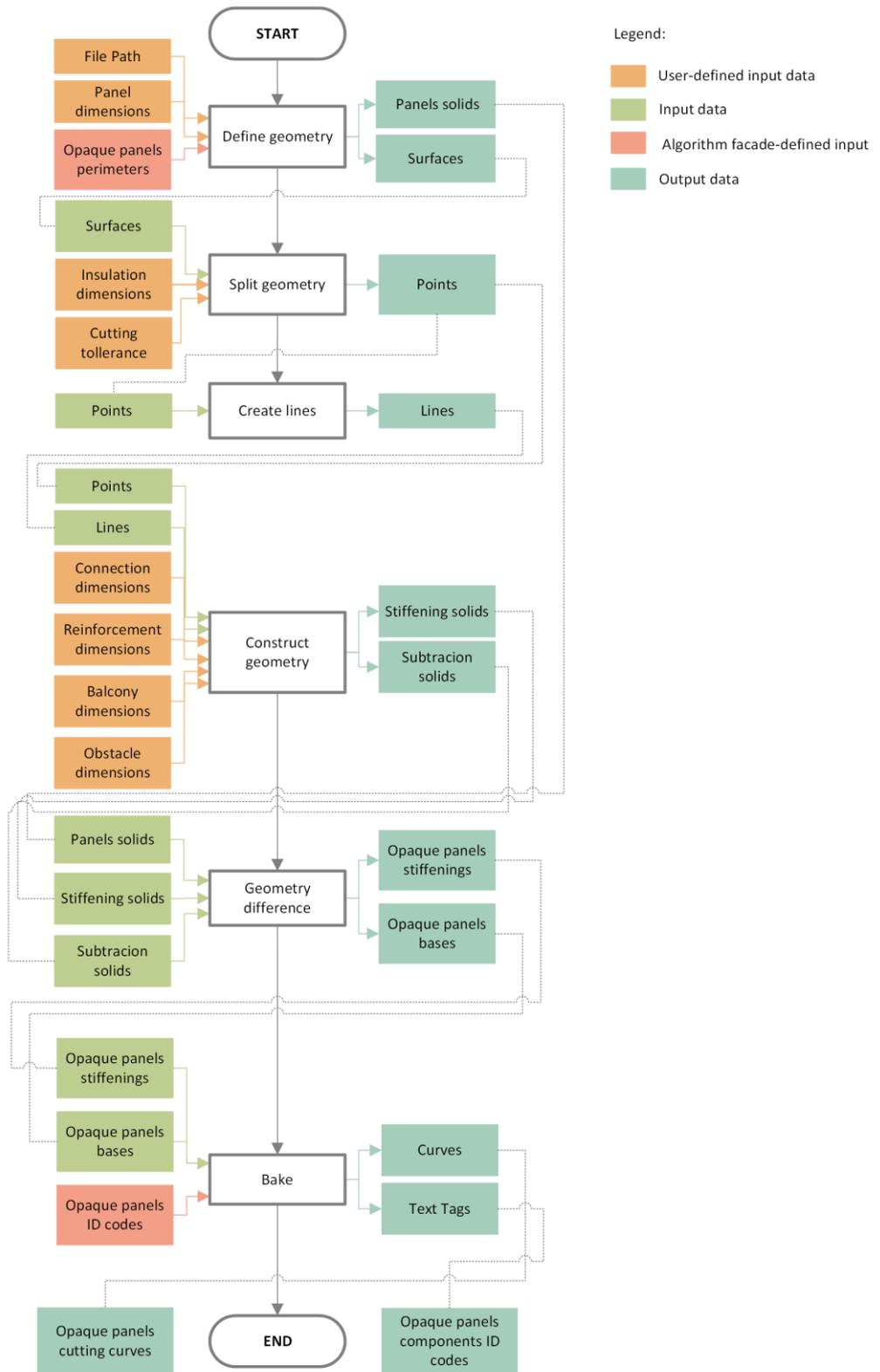


Fig. 22 – Diagramma di flusso delle informazioni dell’algoritmo pannello opaco

4.2.3 Algoritmo pannello attivo: definizione dei dati di lavorazione per gli elementi di facciata dotati di serramenti e sistemi attivi

L'algoritmo pannello attivo definisce il tracciato per la produzione dei pannelli contenenti l'infisso e i sistemi impiantistici attivi. Le informazioni e la sequenza di operazioni su cui si basa il calcolo sono le stesse descritte in 4.2.2 Algoritmo pannello opaco: definizione dei dati di lavorazione per gli elementi opachi di facciata, ad eccezione dei parametri del materiale isolante di cui è richiesta unicamente la dimensione secondo l'asse z e della prima fase di scomposizione delle superfici. Infatti, a differenza dell'algoritmo pannello opaco, la suddivisione delle superfici importate è eseguita in base alle dimensioni dell'infisso e della macchina di ventilazione. Durante le attività condotte nel progetto di ricerca EFRE-FESR 1117 LegnAttivo è stata stabilita la necessità di predisporre il sistema tecnologico ad ospitare un impianto VMC. Le dimensioni dell'infisso sono ricavate dal disegno di rilievo, invece, le dimensioni della macchina di ventilazione sono fisse e sono state ricavate dalle analisi condotte con i partner di progetto. In una prima fase, dopo aver importato le geometrie dei pannelli attivi, l'algoritmo analizza le superfici e individua la posizione della macchina di ventilazione a destra o sinistra dell'infisso. In una seconda fase, le superfici sono suddivise in una griglia di punti attraverso cui è ricavata la posizione delle connessioni e degli elementi di ingombro. Al termine della seconda fase le componenti base del sistema tecnologico sono modellate secondo le dimensioni specificate dall'utente. La sagoma del sistema tecnologico è caratterizzata da un foro e da una griglia di irrigidimento predisposti per accogliere l'infisso e la macchina di ventilazione. Allo stesso modo dell'algoritmo pannello opaco, la sagoma è modificata per consentire l'eventuale installazione di elementi di rinforzo strutturale o il passaggio di canalizzazioni. Nel caso studio è stata ipotizzata l'installazione degli elementi di rinforzo strutturale lungo il perimetro del sistema tecnologico e al fianco degli irrigidimenti verticali al fine di favorire una maggiore resistenza e stabilità dei pannelli. Infine, così come avviene nell'algoritmo pannello opaco, attraverso il tasto bake presente nell'interfaccia utente è possibile ottenere il tracciato per il taglio e la fresatura del pannello grezzo. Fig. 23 mostra i tracciati ottenuti al termine del calcolo e l'interfaccia utente attraverso cui sono gestiti i dati necessari al funzionamento dell'algoritmo.

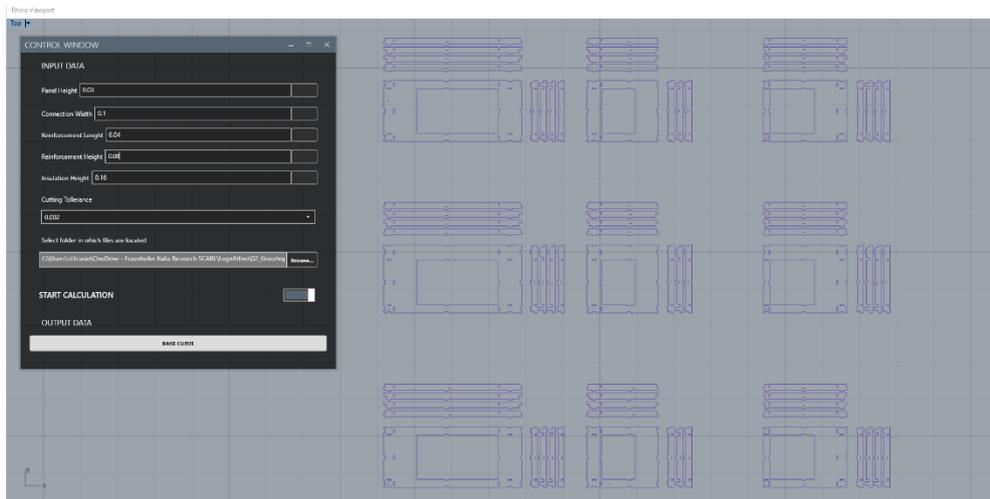


Fig. 23 - Tracciato delle componenti base

Anche il tracciato delle componenti base dei pannelli attivi è caratterizzato da codici identificativi. La logica di assegnazione ed il significato dei codici identificativi sono le stesse descritte in 4.2.2 Algoritmo pannello opaco: definizione dei dati di lavorazione per gli elementi opachi di facciata, ad eccezione della sigla W0 che classifica il sistema tecnologico come pannello attivo. Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26 mostrano in dettaglio i tracciati delle componenti base ed i relativi codici identificativi.

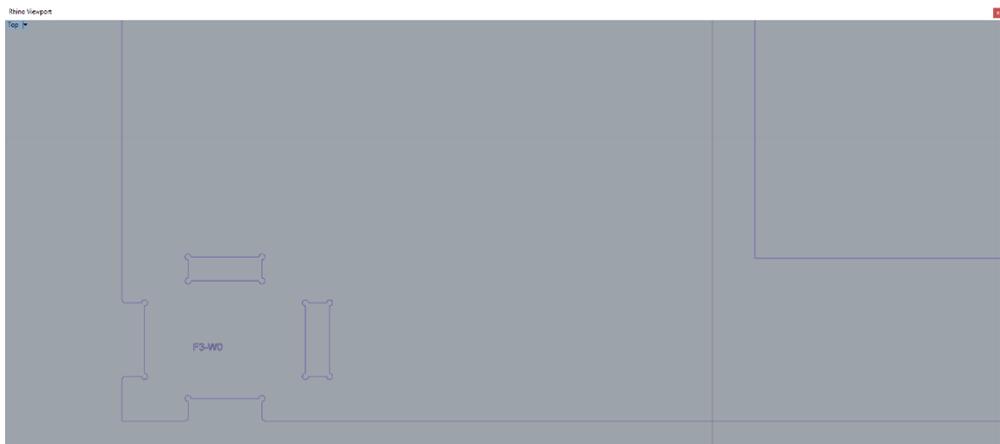


Fig. 24 – Esempio di codice identificativo del pannello base

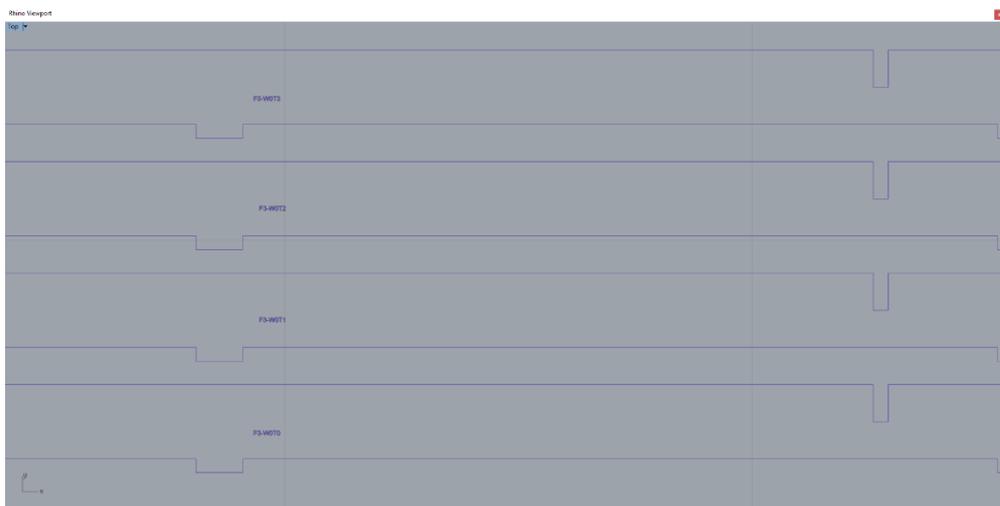


Fig. 25 – Esempio di codici identificativi degli irrigidimenti orizzontali

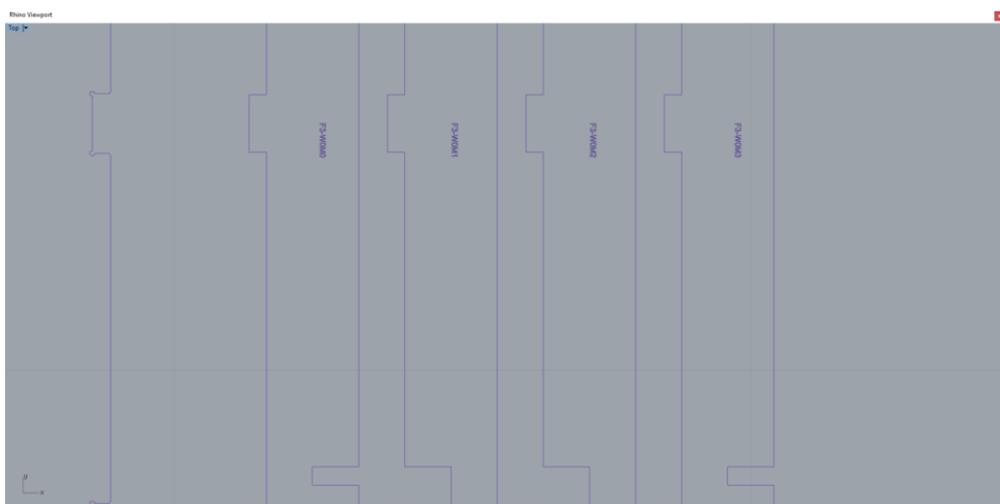


Fig. 26 – Esempio di codici identificativi degli irrigidimenti verticali

Fig. 27 illustra in maniera schematica la logica alla base del funzionamento dell'algoritmo.

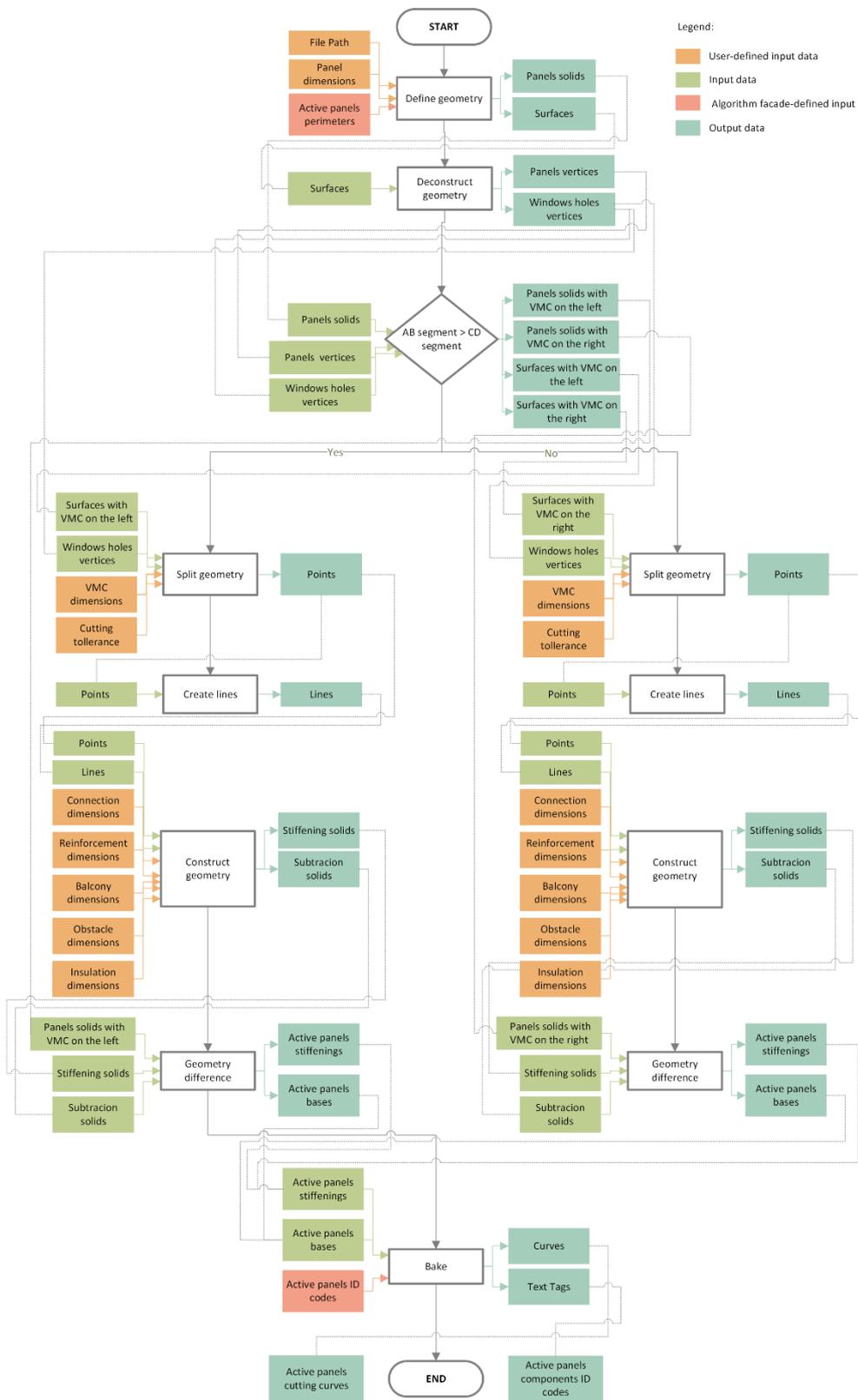


Fig. 27 – Diagramma di flusso delle informazioni dell'algorithmo pannello attivo

5 Bibliografia

- [1] Ford, H. (1926), *Today and Tomorrow*, Doubleday, Page and Company, Garden City, NY.
- [2] Womack, J. P., Jones, D. T., and Roos, D. (1991), *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production*, HarperBusiness, ISBN: 0060974176.
- [3] Erlach, K. (2013), *Value Stream Design - The Way Towards a Lean Factory*, Springer, Berlin.
- [4] Womack, J. P., Jones, D. T. (2003), *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation*. 1 ed., Free Press, New York.
- [5] Rother, M., Shook, J. (1998), *Learning to See*, Brookline: The Lean Enterprise Institute.
- [6] Ballard, G., Howell, G., (1994), Implementing lean construction: stabilizing workflow, in: Alarcon, L. (Ed.), *Proceedings of the 2nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction 1994*, IGLC 1994, Santiago de Chile, Chile. pp. 105–115.
- [7] Wortmann, J. C., (1983), *A Classification Scheme for Master Production Schedule. Efficiency of Manufacturing Systems*, Plenum Press, New York, USA. DOI: 10.1007/978-1-4684-4475-9_10.
- [8] Brady, D., Tzortopoulos, P., Rooke, J. (2011), An Examination of the Barriers To Last Planner Implementation, in: *Proceedings of the 19th Annual Conference of the International Group for Lean Construction 2011*, IGLC 2011, Lima, Peru. pp. 13–15.
- [9] Lindhard, S., Wandahl, S. (2014), Scheduling of large, complex, and constrained construction projects - an exploration of LPS application. *International Journal of Project Organisation and Management* 6, 237. DOI: 10.1504/ijpom.2014.065258.
- [10] Ratajczak, J., Marcher, C., Schimanski, C.P., Schweikopfler, A., Riedl, M., Matt, D.T. (2019), BIMbased augmented reality tool for the monitoring of construction performance and progress, in: *Proceedings of the 2019 European Conference for Computing in Construction, EC3 2019*, Chania, Greece. pp. 467–476. DOI: 10.35490/ec3.2019.202.
- [11] Schulmeister, R. (2009), *Implementing Lean Construction in Germany: a Case Study*. Master's thesis. Liverpool John Moores University. [Unpublished]
- [12] Wronski, L. (2013), *The Downfalls of Prefab Design*. archdaily. [online] Available at: <http://www.archdaily.com/336054/the-downfalls-of-prefab-design>.
- [13] Koskela, L. (2000), *An Exploration towards a Production Theory and its Application to Construction*. Ph.D. thesis. Helsinki University of Technology. Available at: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2000/P408.pdf>.
- [14] Koskela, L., Howell, G., Ballard, G., Tommelein, I.D. (2002), The foundations of lean construction, in: *Design and Construction: Building in Value*. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 211–226.
- [15] Koskela, L., 1992. Application of the new production philosophy to construction. Technical Report 72. Stanford University. Available at: <https://leanconstruction.org/uploads/wp/media/docs/Koskela-TR72.pdf>.
- [16] Jack Hu, S. (2013), *Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization*. *Procedia CIRP*, 7, pp. 3-8. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.002.
- [17] Jensen, K. N., Nielsen, K., Brunoe, T. D., Larsen, J. K., Hankammer, S., Nielsen, K., Piller, F. T., Schuh, G., Wang, N. (2018), *Productivity, Challenges, and Applying Mass Customization in the Building and Construction Industry*.

- In: Hankammer, S., Nielsen, K., Piller, F., Schuh, G., Wang, N. (eds) Customization 4.0, 551-565. DOI: 10.1007/978-3-319-77556-2_34.
- [18] BSI - British Standards Institute, (2003) Poor Communication Costing UK Construction Industry. Available at: <https://www.bsigroup.com/en-GB/about-bsi/media-centre/press-releases/2003/9/Poor-Communication-Costing-UK-Construction-Industry/>.
- [19] PMI - Project Management Institute (2013), The high cost of low performance: The essential roles of communications. Available at: <http://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/the-essential-role-of-communications.pdf>.
- [20] Wang, X., Yang, L. T., Xie, X., Jin, J., Deen, M. J. (2017), A cloud-edge computing framework for cyber-physical-social services. *IEEE Communications Magazine*, 55(11), pp. 80-85. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700360.
- [21] Broy, M. (2013), Engineering Cyber-Physical Systems: Challenges and Foundations. In: Aiguier M., Caseau Y., Krob D., Rauzy A. (eds) *Complex Systems Design & Management*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-34404-6_1.
- [22] Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., Teicholz, P. (2018), *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*, Wiley. ISBN: 978-1-119-28753-7.
- [23] Albayrak Colaço, C., Tunçer, B. (2011), Performative Architecture as a Guideline for Transformation of the Defence Line of Amsterdam, eCAADe 29 - Generative and Parametric Design Conference. Available at: https://www.researchgate.net/publication/321331184_Performative_architecture_as_a_guideline_for_transformation_Defense_Line_of_Amsterdam
- [24] Yuan, Z., Sun, C., Wang, Y. (2018), Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings, *Automation in Construction*, 88, pp. 13-22. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.021.
- [25] Bianconi, F., Filippucci, M., Buffi, A. (2019), Automated design and modeling for mass-customized housing. A web-based design space catalog for timber structures, *Automation in Construction*, 103, pp. 13-25. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.002.
- [26] Kaplan, A.M, Haenlein, M. (2006), Toward a parsimonious definition of traditional and electronic Mass-Customization. *Journal of Product Innovation Management*, 23 (2), 168-182. DOI: 10.1111/j.1540-5885.2006.00190.x.
- [27] Qiao, G., Lu, R.F., McLean, C. (2006), Flexible manufacturing systems for mass customisation manufacturing. *International Journal of Mass Customisation*, 1 (2-3), 374-393. DOI: 10.1504/IJMASSC.2006.008631.
- [28] Barman, S., Canizares, A. E. (2015.), A Survey of Mass Customization in Practice, *International Journal of Supply Chain Management*, 4 (1). ISSN: 2050-7399.
- [29] Bock, T., Linner, T. (2010), Mass-Customization in a knowledge-based Construction Industry for sustainable high-performance Building Production. CIB World Congress, Manchester/Salford, England.
- [30] Mohammed Refaat Mekawy, M. (2020), A Framework for Using BIM in Mass-Customization and Prefabrication in the AEC Industry, PhD Thesis, Technische Universität München. Available at: <https://mediatum.ub.tum.de/1545783>.
- [31] Piroozfar, P., R.P. Farr, E., Hvam, L., Robinson, D., Shafiee, S. (2019), Configuration platform for customisation of design, manufacturing and assembly processes of building façade systems: A building information modelling perspective, *Automation in Construction*, 106. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102914.
- [32] Pasetti Monizza, G. Matt, D.T. (2022), Mass customization as the convergent vision for the digital transformation of the manufacturing and the building

industry, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Rethinking Building Skins, Woodhead Publishing, p.p. 453-474, DOI: 10.1016/B978-0-12-822477-9.00006-1.

- [33] Pasetti Monizza, G., Bendetti, C., Matt, D. T. (2018), Parametric and Generative Design techniques in mass-production environments as effective enablers of Industry 4.0 approaches in the Building Industry, *Automation in Construction*, 92, p.p. 270-285, DOI: 10.1016/j.autcon.2018.02.027.
- [34] Bucci, F., Mulazzani, M. (2002), *Luigi Moretti: Works and Writings*. Princeton Architectural Press, Hudson, USA. ISBN: 1568983069.
- [35] Davis, D. (2013), *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*, PhD Thesis, RMIT University. Available at: <http://www.danieldavis.com>
- [36] Jabi, W. (2013), *Parametric Design for Architecture*. Laurence King, London, UK. ISBN: 1780673140.
- [37] Scheurer, F. (2014), *Materialising Complexity*. In *Theories of the Digital in Architecture*. Routledge, Oxon, New York, USA. ISBN: 0415469244.
- [38] Schumacher, P. (2008), *Parametricism as Style - Parametricist Manifesto*. Dark Side Club1, 11th Architecture Biennale, Venice 2008. Available at: <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.html>