

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA*

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE A CICLO UNICO IN  
INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA*

**TESI DI LAUREA**

in

Architettura Tecnica

**MODELLI INFORMATIVI PER LA VALUTAZIONE BIM  
DEL LIVELLO DI REVERSIBILITÀ E CIRCOLARITÀ DI  
COMPONENTI EDILIZI: IL DESIGN FOR DISASSEMBLY**

CANDIDATO

Filippo Nocentini

RELATRICE:

Chiar.ma Prof.ssa Cecilia Mazzoli

CORRELATORI

Chiar.mo Prof. Simone Garagnani

Ing. Rachele Corticelli

Anno Accademico 2021/2022

Sessione III



# SOMMARIO

ACRONIMI.....	4
ABSTRACT .....	6
1 INTRODUZIONE.....	7
2 DESIGN FOR DISASSEMBLY: I CRITERI.....	9
2.1 Problemi nella progettazione corrente .....	11
2.2 Benefici del Design for Disassembly .....	11
2.3 Definizioni e principi .....	12
3 IL PROCESSO BIM.....	21
3.1 Definizione e principi.....	21
3.2 Potenzialità del BIM in relazione ai criteri del Design for Disassembly.....	22
4 METODOLOGIA.....	27
4.1 Casi applicativi di BIM e DfD.....	27
4.2 Il “Reversible Building Design”: le linee guida.....	30
4.2.1 Definizione degli aspetti progettuali più importanti per i livelli di decostruzione .....	33
4.2.2 Le conclusioni dalla teoria .....	39
4.3 Dai criteri ai parametri.....	40
4.4 Metodologie pregresse per l’individuazione di un indicatore .....	47
4.4.1 Criteri di progettazione e prestazioni ambientali dei prodotti.....	52
4.4.2 Ulteriore miglioramento della valutazione della circolarità.....	55
5 APPLICAZIONE DEL CASO STUDIO .....	58
5.1 Il processo su Revit (i parametri, le famiglie, i singoli elementi).....	60
5.2 Le soluzioni analizzate .....	67
5.2.1 ETICS .....	67
5.2.2 ALIVA DEMO .....	74
5.2.3 ALIVA DEMO 2.0 .....	81
5.2.4 ALI KL .....	85
5.3 Indice di valutazione complessivo .....	90
6 CONCLUSIONI .....	97
6.1 Utilità del processo .....	97
6.2 Accessibilità del processo .....	97
6.3 Sviluppi futuri per il miglioramento del metodo .....	98
6.4 Il livello delle soluzioni analizzate.....	99
BIBLIOGRAFIA .....	101
APPENDICE A .....	106



# ACRONIMI

---

- DfD = Design for Disassembly
- DfE = Design for Environment
- DfF = Design for Flexibility
- DfA = Design for Adaptability
- DfR = Design for Reuse/Recycle
- BIM = Building Information Modeling
- LCA = Life Cycle Assessment
- LCC = Life Cycle Cost
- EPR = Extended Producer Responsibility
- PCI = Product Circularity Indicator
- PCIp = Product Circularity indicators Products
- MCI = Material Circularity Indicators
- MCIp = Material Circularity Indicators Products
- EE = Embodied Energy
- EC = Embodied Carbon
- EBCI = Express Building Circularity Indicator
- API = Application Programming Interface
- IFC = Industry Foundation Classes
- EOL= End Of Life
- WA = Waste Analysis
- BWA = Building Waste Performance Analysis
- BWPE = Whole-life Performance Estimator
- BIM-DAS = punteggio oggettivo per la valutazione delle strategie del DfD e del grado di decostruzione di un progetto edilizio
- DNA = Disassembly Network Analysis
- NA = Network Analysis
- MCA = Multiple Correspondence Analyses
- CE = Circular Economy
- RBD = Reversible Building Design
- BWPE = Building Whole-life Performance Estimator
- CWN = Construction Waste Management
- CDW= Costruction Demolition Waste
- BAW = Construction Waste Minimisation
- SCI = System Circularity Index
- MRS = Material Reutilisation Score
- LFI = Linear Flux Index
- ECI = Element Circularity Indicators
- BCI = Building Circularity Indicators
- RPI = Resource Potential Indicators
- MRS = Material Reutilization Score
- VRE = Value Based Resource Efficiency
- EPI = Environmental Products Indicators
- KPI = Kei Performance Indicators
- EPS = Expanded Sintered Polystyrene

- ETICS = External Thermal Insulation Composite System
- MMVFs = Man Made Vitreous Fibers
- WHO = World Health Organisation

## ABSTRACT

---

Il presente lavoro di Tesi si focalizza sull'elaborazione di un metodo per valutare il livello di reversibilità e circolarità dei componenti edili.

Il concetto cardine dello studio è il Design for Disassembly (DfD), definibile come un approccio alla progettazione di organismi edilizi secondo criteri costruttivi volti a facilitare successivi cambiamenti e smantellamenti (completi o parziali) consentendone il riciclo, recupero e di sistemi, componenti e materiali, al fine di ridurre l'impatto ambientale degli interventi. Attualmente, diverse ricerche in ambito scientifico si dedicano all'approfondimento di questa tematica, correlandola ad altri concetti come il Building Information Modeling (BIM). Il BIM è una metodologia che consente di digitalizzare il processo progettuale, la sua realizzazione costruttiva e la sua gestione attraverso modelli, permettendo di raggruppare tutte le informazioni. I limiti del DfD, nella progettazione corrente, possono essere superati grazie all'implementazione del BIM: infatti, è possibile elaborare una grande quantità di dati, in poco tempo, potendo scambiare le informazioni fra gli stakeholder.

Dopo una approfondita analisi dello stato dell'arte, il lavoro è giunto alla definizione di un insieme di dieci parametri in grado di rappresentare la circolarità del componente, in termini di DfD, e idonei per essere introdotti in un modello informativo. I parametri sono stati così suddivisi: sette sono riferiti all'oggetto (accessibilità; trasportabilità; durabilità; potenzialità del fine vita; reversibilità/tipo di connessione; Contenimento formale; interdipendenza fra gli elementi) e tre sono riferiti all'insieme di più elementi (tempo di assemblaggio; semplicità di assemblaggio; accessibilità). Per ogni elemento del componente analizzato, viene assegnato un valore numerico (variabile da 0,1 a 1) ad ogni parametro. Tramite l'utilizzo di una formula elaborata nell'ambito di precedenti ricerche svolte dal Dipartimento di Architettura di UNIBO, che hanno portato alla definizione del metodo "EASY – Express methodology for the ASsessment of the circularitY level", debitamente modificata, si ottiene un indice sintetico finale, denominato "Express Building Circularity Indicators" (EBCI). Tale indice, variabile da 0,1 a 1, che corrisponde al massimo grado di circolarità, rappresenta il livello di circolarità del componente analizzato, in termini di reversibilità e dunque secondo i criteri del DfD.

Il metodo di analisi proposto come strumento a supporto del processo progettuale è stato validato tramite l'applicazione a quattro diverse soluzioni di facciata idonee per l'efficientamento energetico di un fabbricato selezionato come caso di studio italiano dal progetto Europeo Horizon2020 "DRIVE 0 – Driving decarbonization of the EU building stock by enhancing a consumer centred and locally based circular renovation process". I risultati ottenuti hanno consentito di verificare l'applicabilità del processo digitalizzato, supportato dagli strumenti BIM, la sua replicabilità per diverse soluzioni costruttive e l'affidabilità della formula utilizzata per valutare il grado di circolarità. Infine, è stato quindi condotto un confronto tra le soluzioni di facciata analizzate, che ha consentito di individuare i punti di forza e di debolezza dei singoli elementi, e di prefigurare futuri sviluppi della ricerca per affinare la formula.

# 1 INTRODUZIONE

---

La maggior parte degli edifici al giorno d'oggi non vengono pensati e costruiti per essere versatili e per un riuso degli elementi che lo compongono, nonostante gli edifici che si adattano siano quelli più facili da mantenere, trasformare e migliorare nel tempo. Spesso, per motivi socioeconomici oltre che tecnici, gli edifici e i suoi componenti sono demoliti prima che sia stata raggiunta la fine della vita utile. Conseguentemente viviamo in un periodo storico in cui si verifica un eccesso di nuova costruzione e di produzione di rifiuti da demolizioni. Secondo il rapporto ISPRA [3] sui rifiuti speciali, vengono prodotte 10,5 milioni di tonnellate in più nel 2019 rispetto all'anno precedente, in linea con la crescita del PIL. La produzione di rifiuti speciali in Italia sfiora la cifra di 154 milioni di tonnellate. Di questi il 45,5% è costituito dai rifiuti provenienti dal settore delle costruzioni e demolizioni (oltre 70 milioni di tonnellate). Con l'aumento degli interventi di ristrutturazione e riqualificazione, incoraggiati da Superbonus ed Ecobonus, questo numero è destinato a salire. Prevedere una strada alternativa per il loro riutilizzo è quindi doveroso. L'Italia si sta muovendo già piuttosto bene in questo senso: il 78% dei rifiuti edili viene recuperato. In Europa ogni anno il settore edile utilizza 4,3 giga tonnellate di materiali e produce il 25-30% di tutti i rifiuti generati nell'Unione europea. Inoltre, come riporta Elma Durmisevic [1] i Construction Demolition Waste (CDW) sono il più grande flusso di rifiuti nell'UE. La direttiva quadro sui rifiuti dell'UE mirava a riciclare il 70% di CDW entro il 2020, tuttavia il tasso attuale nella maggior parte dei paesi dell'UE è solo del 50% circa. Inoltre, il settore delle costruzioni applica attualmente processi di recupero tipicamente a basso valore: la maggior parte delle CDW è destinata al riempimento e ad altre applicazioni a basso valore (downcycling), mentre la quantità di CDW soggetta a riutilizzo e riciclaggio di alta qualità (upcycling) rimane inferiore al 3%. Il valore economico e socioculturale che è contenuto nei materiali viene perso, insieme al consumo di energia necessario per estrarli, costruire e demolire, se non si applica una politica di riutilizzo.

[4] In risposta a questo, una promettente strategia di progettazione per facilitare l'adattamento e il riuso è rappresentata dal **Design for Disassembly (DfD)**. Questo concetto nasce inizialmente nel campo dell'industria manifatturiera, come strategia per migliorare le sequenze di assemblaggio per prodotti elettronici e meccanici. Estendendo questo concetto al settore delle costruzioni, promuove la riparazione, l'adattamento e il riuso di componenti dell'edificio. Inoltre, i componenti verranno sfruttati a pieno, arrivando al termine della loro vita tecnica. Se durante la progettazione di componenti e organismi edilizi sono stati adottati i criteri del Dfd, i singoli elementi sono più facili da separare e quindi da riciclare. Questo concetto può quindi contribuire a un uso più efficiente di materiali ed energia, rendendo gli edifici più resilienti a cambiamenti futuri. Studi passati hanno dimostrato come questo concetto possa contribuire positivamente alla riduzione dell'impatto ambientale ed economico dei processi edilizi. Tuttavia, gli strumenti di analisi attualmente più diffusi utilizzati per studiare tali impatti come le analisi Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Cost (LCC) non prendono in considerazione la relazione fra gli elementi costruttivi. Come viene riportato da Cecilia Mazzoli & Al. [5] non esiste ancora una metodologia standardizzata per il funzionamento del DfD. In ogni caso, una selezione di alcuni autori che sono stati determinanti per l'approccio descritto è riportata nel capitolo della metodologia. Oggi, il processo di disassemblaggio è relativamente sottovalutato, e in architettura non è comune, ma ci si può aspettare che approcci normativi simili vengano presto estesi al settore edilizio. È quindi necessario sviluppare nuovi metodi per studiare le relazioni tra i diversi componenti e valutare il loro impatto ambientale, in termini di circolarità, in funzione del sistema di assemblaggio e disassemblaggio, del tempo necessario per compiere tali operazioni, e del potenziale di riutilizzo o riciclo dei materiali dismessi. La definizione di circolarità data dall'Hellen MacArthur Foundation [6] è: "un'economia pensata per potersi rigenerare da sola. In un'economia circolare i flussi di materiali sono di due tipi: biologici, in grado di essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici, destinati a essere rivalorizzati senza entrare nella

biosfera". Il settore dell'edilizia offre grandi possibilità di cambiamento. Avvicinarsi a un modello di economia circolare significa innovare i processi, dalla produzione alla trasformazione dello scarto, cambiare il modo in cui si concepiscono i prodotti stessi.

Il presente lavoro di tesi affronta lo studio di un metodo per stimare il livello di circolarità di specifici componenti edili, in termini di DfD, basato sull'utilizzo di strumenti **Building Information Modeling (BIM)**. Nell'industria dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni, il termine BIM viene generalmente (e riduttivamente, oltre che erroneamente) associato all'utilizzo di un software che permette di disegnare e modellare in tre dimensioni. Tuttavia, come viene spiegato nel libro scritto da Eddy Krygiel [7] quando si parla di BIM, si fa riferimento a tutti i processi e le metodologie che il BIM implementa. Un modello BIM ti permette di contenere in un unico file tutte le informazioni necessarie per il corretto studio, analisi e costruzione di un fabbricato. Permette di ricavare tabelle su materiali, misure e quantità del modello. Tutto viene realizzato in forma parametrica e quindi tutto è interconnesso; infatti, ogni cambiamento ad un componente all'interno del file, è immediatamente riflesso su tutti i componenti nel resto del progetto e in contemporanea vengono aggiornati i dati estrapolati. È possibile ricavare informazioni sul consumo di energia, le spese di realizzazione, e altri dati interessanti per la progettazione. Tutti i processi di analisi all'interno di un gruppo di lavoro sono velocizzati per il fatto che il modello e le relative informazioni sono condivise in tempo reale con tutti gli utenti con cui è condiviso il documento. È interessante come i diversi ambiti di un grande progetto possono interagire tra di loro senza problemi in quanto ognuno può apportare le modifiche che vuole al proprio campo di azione. La parte strutturale interagisce con gli impianti in modo dinamico e in tempo reale così da minimizzare gli errori e il tempo di interazione fra i tecnici specializzati. Inoltre, se viene effettuata una variazione questa si aggiorna anche su tutti gli altri aspetti del progetto. In tutto ciò essendo un modello 3D, questo può essere usato per capire quali saranno gli spazi e quali sono le aspettative sul progetto. Dal modello BIM si generano con facilità piante, sezioni, alzati, dettagli a diverse scale. Il BIM ha cambiato come i progettisti e gli stakeholder coinvolti guardano all'intero processo, dalla fase preliminare alla costruzione vera e propria. Con il crescere della complessità dei progetti e il numero di professionisti coinvolti è necessario adattarsi con strumenti all'avanguardia di questo tipo. Nello specifico, il presente lavoro di tesi definisce un set di indicatori di DfD, associati ad ogni elemento/insieme di elementi, tramite un punteggio che va da 0 a 1, e viene elaborato un indice sintetico finale per il sistema costruttivo, che rappresenta il livello di circolarità in termini di DfD. Il processo BIM consente di agevolare l'associazione di questi punteggi e di facilitarne il controllo, attraverso la modifica locale di singoli strati/materiali per incrementare il livello di circolarità (e tendere verso 1). La possibilità di creare un indice complessivo permette di confrontare le soluzioni adottate e capire la migliore in termini di Dfd. Inoltre, il punteggio da 0 a 1 permette di individuare quali elementi sono il punto debole così da poter intervenire rapidamente e in modo mirato.

Per validare il metodo strutturato viene svolta un'analisi del livello di Dfd relativa all'involucro del caso pilota italiano, collocato ad Argelato (Bologna), selezionato dal progetto Europeo finanziato nell'ambito del programma Horizon2020, intitolato "DRIVE 0 – Driving decarbonization of the EU building stock by enhancing a consumer-centred and locally based circular renovation process"

## 2 DESIGN FOR DISASSEMBLY: I CRITERI

---

Come riportato da Brad Guy e Nicholas Ciarimboli [8] il DfD rappresenta un concetto innovativo per la progettazione e la costruzione, che contribuisce significativamente al Design for Environment (DfE) ossia alla progettazione per l'ambiente. Il DfE indica un metodo progettuale olistico volto allo sviluppo di una progettazione legata all'ambiente e all'uomo sul ciclo di vita di un prodotto. Ci sono molti altri sottoinsiemi di DfE, ma in realtà il DfD è parte integrante di qualsiasi "Design for..." che intende massimizzare la conservazione dei materiali dalla fine del ciclo di vita dell'edificio fino allo smaltimento dei materiali. Dato che molti edifici vengono demoliti a causa della mancata riqualificazione e la loro incapacità di rimanere utilizzabili all'interno di quell'ambiente, il DfD può anche rappresentare una strategia intelligente per prevenire l'obsolescenza e mitigare i fattori economici (come il costo del lavoro) che incoraggiano la distruzione, la demolizione e lo smaltimento di edifici.

L'ambito di studio del DfD è nato e continua a **svilupparsi all'interno delle industrie manifatturiere**, all'interno delle quali è posta sempre maggiore attenzione alla gestione del fine vita di prodotti. Le aziende cercano di mitigare sempre più l'influenza ambientale che un prodotto ha sull'ambiente visto l'impatto inquinante che si ha durante sua produzione. In Europa, in particolare, i vincoli alla produzione di rifiuti e l'inquinamento, hanno posto l'accento sulla "responsabilità estesa del produttore" che ha portato alla direttiva 2000/53/CE del Parlamento europeo sui veicoli fuori uso e la Legge tedesca sui veicoli fuori uso del 2002 [9]. Estendere la responsabilità del produttore (Extended Producer Responsibility (EPR)) è definita come "... responsabilizzare il fabbricante del prodotto per l'intero ciclo di vita e soprattutto per il ritiro, il riciclaggio e lo smaltimento finale del prodotto" [10]. In sintesi, questo richiede che chi crea un prodotto è responsabile nel progettare l'intero ciclo di vita, compreso il suo smaltimento finale, come riutilizzo e riciclo, per raggiungere la redditività economica al minimo rischio. Gli elementi della Direttiva 2000/53/CE relativi alla progettazione EPR e i processi di produzione includono:

- riduzione e controllo dei materiali pericolosi;
- requisiti dello smantellamento e il riutilizzo/riciclaggio di veicoli e componenti integrato nella progettazione e produzione;
- presenza di un certificato di distruzione che tiene conto del recupero del veicolo;
- utilizzo di standard di codifica per componenti e materiali;
- creazione e diffusione di informazioni per il corretto smantellamento di fine vita;
- obiettivi misurabili della quantità media di materiali in kg, per veicolo, da recuperare.

Poiché gli edifici sono fabbricati in genere composti da componenti precostruiti e componenti assemblati in loco, il DfD può essere applicato all'ambiente costruito in modo simile ad altri manufatti. Una distinzione importante per la maggior parte degli edifici è la dominanza dell'assemblaggio "a umido", ossia la realizzazione di sistemi irreversibili. Una costruzione "a umido", ad esempio realizzata mediante la realizzazione di un getto di calcestruzzo, non si presta facilmente alla separazione dei materiali per il riuso. Sebbene non sia tipicamente considerato un "prodotto", gli edifici sono comunque composti da materiali, componenti e connessioni che vengono creati attraverso la collaborazione di progettisti, ingegneri, operatori

commerciali, produttori di materiali e componenti. Gli edifici residenziali e civili possono anche avere un significato profondo, analogamente agli oggetti artigianali, assumendo un carattere dal valore prestazionale, in termini di riparo e comfort, o di simbolico-culturale. A causa della loro importanza nella società e visto l'enorme impatto sull'utilizzo delle risorse a livello globale, qualsiasi tentativo di considerare la sostenibilità nel riuso delle risorse relative all'edificio deve tenere conto della gestione di tutti i flussi di materiale nell'intero ciclo di vita degli edifici: l'estrazione, la fabbricazione, la progettazione, la costruzione, il funzionamento, la ristrutturazione, e l'eventuale fine vita. Ci sono molte ragioni pratiche per considerare il DfD nell'ambiente delle costruzioni.

[5] Si riporta che l'ambiente costruito è responsabile del 40% del consumo finale di energia nell'UE e l'energia necessaria al funzionamento negli edifici rappresenta fino al 60% dell'energia del ciclo di vita dell'edificio, con la relativa CO<sub>2</sub> inglobata. Nell'UE più del 50% di tutti i materiali estratti sono attribuiti agli edifici. Questo sfruttamento delle risorse naturali e il loro impatto ambientale collaterale rappresentano una grave minaccia per i sistemi naturali, sociali ed economici.

Questa enorme massa di edifici che devono essere costruiti possono rappresentare grandi fonti di rifiuti nel prossimo futuro, oppure possono rispondere ai criteri del DfD per recuperare i loro materiali per riparazioni future, ristrutturazioni e traslochi. Questa nobilitazione dei materiali conservati negli edifici, che facilita il recupero per un riuso successivo, è destinata a fornire uno sviluppo economico e ambientale per i costruttori, i proprietari, gli occupanti e le comunità in cui risiedono questi edifici.

Oltre a tutti i benefici che la teoria del Dfd promuove, esistono alcuni aspetti negativi legati alla praticità dei fatti con cui ci scontriamo ogni giorno nel mondo dell'edilizia. Se pensiamo a come affrontiamo i progetti al giorno d'oggi, si cerca di tendere più alla quantità che alla qualità per non rischiare il fallimento. È necessario comprendere come un cambio radicale nel pensiero della società e di tutti gli attori coinvolti nel settore sia necessario. Il processo che coinvolge il DfD è di certo un processo lento. La demolizione "classica" viene svolta con cariche esplosive o, nella maggior parte dei casi, mediante l'utilizzo di strumenti meccanizzati rapidi (Es. pinze meccaniche) che, senza distinzione di materiali e apparecchiature, ma molto velocemente, fanno crollare interi edifici. Inoltre, il metodo esposto nel presente lavoro di tesi, prevede l'utilizzo di forza lavoro e di strumenti a mano, lenti da utilizzare (martelli, cacciaviti, trapani, ecc.). [11] Per legge i costi della manodopera sono liberamente valutabili dal concorrente, nel rispetto assoluto dei minimi salariali e degli obblighi contributivi; non devono essere scorporati dall'importo assoggettato a ribasso e devono superare il giudizio di congruità in sede di verifica delle offerte anormalmente basse. Non è possibile eliminare in nessun modo i costi della manodopera, per cui si può lavorare su altri aspetti della progettazione, come l'organizzazione del cantiere in fase di smontaggio, la reperibilità delle informazioni, ottimizzando i processi su cui è possibile intervenire. Uno dei modi potrebbe essere quello di assicurare una redditività futura dal recupero dei materiali smontati per essere rivenduti o riutilizzati per rientrare nelle spese. Potrebbe inoltre esserci un adeguamento fiscale a chi decostruisce invece che demolire per via tradizionale, con l'obiettivo ambientale.

## 2.1 PROBLEMI NELLA PROGETTAZIONE CORRENTE

Generalmente gli edifici sono difficili da adattare o smontare per il recupero dei materiali al fine di riutilizzarli o riciclarli a seconda delle modalità economicamente più vantaggiose.

Alcuni motivi sono:

- tendenze che si allontanano dai materiali rinnovabili e a base di fibre inorganiche e l'aumento dell'uso di compositi e prodotti ingegnerizzati che sono difficili da riciclare perché via della loro complessità chimica;
- costi di manodopera per decostruire e processi difficoltosi nel recuperare i materiali;
- utilizzare tecniche di connessione come chiodi ad azionamento pneumatico, graffette e adesivi estremamente difficili da rimuovere;
- la perdita di abilità artigianali tali per cui il costo del lavoro per creare connessioni esposte e dettagli estetici è proibitivo;
- fare affidamento su rivestimenti e incapsulamento di elementi con innumerevoli strati di materiali di finitura al posto di un sistema più semplice composto di: involucro integrale/finitura/sistemi strutturali;
- la natura altamente speculativa di molti edifici, per cui non vi è una proprietà a lungo termine, e quindi costi di adeguamento, ristrutturazione e demolizione non sono a carico del proprietario originale;
- la percezione che l'inclusione di componenti e sistemi progettati per essere smontati, diversi rispetto a quelli esplicitamente destinati ad avere vite brevi (spazi per mostre, luoghi di intrattenimento, ecc.) riduce il valore e implica altri compromessi estetici, o di vita/sicurezza.

Alcuni dei punti sopra descritti inducono a ragionare su come cambiare il metodo di progettazione fin dalle prime fasi, con lo scopo di riutilizzare i componenti dopo la dismissione dell'edificio, e di come possa cambiare radicalmente la visione dell'edilizia attuale. Di seguito si presentano i principali punti che hanno ispirato l'idea di disassemblaggio espressa da due studiosi, Brad Guy [8] e Philip Crowther [12]

## 2.2 BENEFICI DEL DESIGN FOR DISASSEMBLY

Il DfD è un paradigma di progettazione che mira a costruire in modo responsabile dal punto di vista ambientale e che prevede una contabilità a tutto tondo dei costi. Il DfD riconosce che i costi "iniziali, operativi e finali" per la fornitura dei servizi dell'ambiente costruito devono essere considerati nella progettazione fin dall'inizio. Il DfD incorpora il ciclo di vita degli edifici, compresa la fine, nelle decisioni prese prima della costruzione di un edificio, aumentandone così il valore e l'efficacia di fronte all'uso e ai costi futuri.

Alcuni dei **vantaggi del Dfd** sono:

- ridurre l'uso delle risorse e dei rifiuti a partire dalle prime fasi del processo di progettazione dell'edificio e come parte integrante del suo ciclo di vita;
- soddisfare la domanda del mercato di edifici flessibili e convertibili, in particolare di edifici speculativi con alti tassi di rotazione (cambiamenti nell'uso interno degli spazi);
- soddisfare le esigenze di adattamento degli edifici dei proprietari-occupanti, per soddisfare i cambiamenti futuri, le aggiunte e le sottrazioni su larga scala;

- mantenere il valore di rivendita per i futuri proprietari di edifici che desiderano effettuare adattamenti o trasformazioni. Questo valore consiste nella riduzione dei costi di adattamento e rimozione sostenuti da un futuro proprietario;
- consentire la facilità di manutenzione e riparazione di componenti e consentire sistemi di leasing e ritiro dei prodotti;
- ridurre la tossicità nella scelta dei materiali attraverso l'attenzione al riutilizzo e alla capacità di riciclaggio, riducendo di conseguenza la potenziale esposizione dei lavoratori e degli occupanti agli impatti ambientali e sanitari dei materiali;
- ridurre la responsabilità futura dei costi di smaltimento dei rifiuti per la comunità in cui l'edificio è situato;
- assicurare la futura redditività economica della gestione dei materiali derivanti dall'uso, dall'adattamento e dalla rimozione degli edifici nel contesto dell'aumento dei costi della manodopera, delle attrezzature e del carburante;
- usufruire del metodo di certificazione degli edifici quale ad esempio LEED;
- implementare il concetto di Fattore 10 utilizzando i servizi di progettazione al posto dei sistemi lineari di flusso dei materiali e ad alta intensità energetica. Definendo il fattore così: "Poiché meno del 20% dell'umanità consuma oltre l'80% delle risorse naturali in questo momento, i Paesi più ricchi devono dematerializzare la loro base tecnica di ricchezza - o aumentare la produttività delle risorse - di almeno un fattore 10 in media";
- consentire l'adattamento futuro e la rimozione degli edifici che riducono l'impatto ambientale del sito di un fattore 10;
- effettuare le demolizioni strutturali tali per cui vengano ridotte le emissioni di polvere, rumore e l'utilizzo di attrezzature meccaniche;
- preservare l'energia incorporata investita nei materiali da costruzione e facilitare la sostituzione dei materiali recuperati con l'uso di risorse vergini;
- rendere l'industria della decostruzione più efficiente dal punto di vista dei costi, riducendo potenzialmente i tempi e i requisiti di manodopera che attualmente sono i principali ostacoli allo smontaggio e al recupero di edifici e materiali,
- consentire ai proprietari di edifici commerciali di beneficiare di vantaggi fiscali grazie alla segregazione dei componenti dell'edificio, consentendo una classificazione di proprietà personale per i componenti dell'edificio con una vita di ammortamento molto più breve rispetto a quella di una proprietà immobiliare fissa.

## 2.3 DEFINIZIONI E PRINCIPI

Il DfD rappresenta un approccio alla progettazione di edifici per facilitare il futuro cambiamento e l'eventuale smantellamento (parziale o completo) per il recupero di sistemi, componenti e materiali. Questo processo di progettazione include lo sviluppo di insiemi, componenti, materiali, tecniche di costruzione, sistemi informativi e gestionali per raggiungere questo obiettivo. Il recupero dei materiali ha lo scopo di massimizzare il valore economico e minimizzare gli impatti ambientali attraverso i successivi riutilizzi, riparazioni, rigenerazioni e riciclaggio. Il DfD consente flessibilità, convertibilità, aggiunta e sostituzione di interi edifici. Il DfD include l'utilizzo di materiali riutilizzabili, destinati al riciclo di materie prime e "naturali" che potrebbero essere interamente biodegradabili. Inoltre, il DfD cerca di garantire che tutti gli aspetti della sostenibilità dell'edificio siano supportati. In effetti, consente di ottenere molteplici benefici, come la riduzione di sistemi

elettrici complessi attraverso l'utilizzo di sistemi di illuminazione diurna per ridurre anche il consumo di energia e aumentare la salute dell'ambiente interno. Il risultato finale di un'applicazione come il design dell'illuminazione diurna sarà rappresentato da un edificio più dinamico, in grado di adattarsi ad aggiornamenti tecnologici e configurazioni diverse nel corso della sua vita.

Molte strutture vernacolari e "primitive" sono state progettate e costruite in relazione simbiotica con i contesti in cui erano inserite, dove la riparazione, la mobilità e il cambiamento erano necessari. Ad **esempio**, i concetti del DfD erano parte integrante dei nativi americani delle pianure in quanto le loro abitazioni venivano montate e smontate per consentire i loro modelli migratori (*figura 4*). Nella cultura tradizionale giapponese, alcuni fattori combinati, come la presenza di legname, il clima mite e la geografia soggetta a terremoti, hanno creato un'architettura ad alta intensità artigianale a base di falegnameria dotata di un elevato grado di reversibilità. Il paradigma di questa tradizione si trova a Ise Shrine, dove negli ultimi 1.300 anni, il santuario è stato distrutto e ricostruito ogni 20 anni. Questo processo include la gestione della risorsa del legno utilizzata per costruire ogni nuova iterazione e il riutilizzo e la dispersione del materiale dell'edificio smantellato per altri santuari in tutto il paese. Ogni smantellamento e il ciclo di ricostruzione mantiene anche la tradizionale abilità di falegnameria attraverso i secoli.

Nel più recente passato, lo stile internazionale dell'architettura ha adottato molti concetti del DfD, per quanto riguarda l'estetica, il controllo degli occupanti e la sostenibilità generale. Dai "Cinque punti di una nuova architettura" di Le Corbusier a Mies van de Rohe con il padiglione di Barcellona, che incarna l'espressione modernista di materiali e forme enfatizzate senza decorazioni, l'architettura moderna spesso ha espresso l'assemblaggio di una struttura attraverso la sperimentazione di materiali e metodi di connessione reversibili, tradizionali e innovativi. Un esempio notevole è il Seagram Building a New York City: con l'utilizzo di materiali puri come metallo, vetro, pietra e cemento, si ritrova la capacità intrinseca di riutilizzo e riciclo. Nell'uso di sistemi di connessione come quello bullonato, emergono dei caratteri legati ai temi della decostruzione che si adatta bene alle tecniche e alle esigenze edilizie dei giorni d'oggi. Esemplificativo è il lavoro di Richard Rogers e Renzo Piano e lo stile "hi-tech" da loro adottato per la Lloyds a Londra e il Centre Pompidou a Parigi, che illustrano molti principi del DfD. Questi edifici usano la struttura come elemento su cui posizionare i sistemi meccanici idraulici e elettrici. In questo modo la planimetria interna rimane completamente libera ed è possibile utilizzare lo spazio in modo flessibile. Un altro esempio che possiamo trovare ai giorni nostri sono i padiglioni espositivi o le strutture militari che necessitano di un veloce smantellamento. Negli esempi elencati precedentemente possiamo ritrovare, anche se non in modo esplicito, alcuni principi del Dfd, che potrebbero nel tempo aiutare a sviluppare una teoria più sostanziosa anche per gli edifici più tradizionali.



Figura 2 Esposizione Universale di Barcellona 1929, Mies Van De Rohe



Figura 1 Centre George Pompidou, Piano, Franchini e Rogers



Figura 3 Ise Shrine, Tempio sacro giapponese



Figura 4 Teepee, tipica abitazione indigena dei nativi americani

Per Brad Guy e Ciarimboli [8] i 10 principi del Dfd sono:

- 1. Documentare i materiali e i metodi per la decostruzione.** Disegni as-built (etichettatura delle connessioni e materiali) e un "piano di decostruzione" che contribuisce ad uno smontaggio e ad una decostruzione efficiente;
- 2. Selezione dei materiali utilizzando il principio di precauzione.** Materiali scelti tenendo conto degli impatti futuri e che hanno alta qualità mantenendo il valore e/o saranno più facilmente riutilizzabili e riciclabili;
- 3. Progettare delle connessioni accessibili.** Visivamente e fisicamente. Le connessioni ergonomicamente accessibili aumenteranno l'efficienza, per evitare attrezzature costose o dispendiose. Inoltre, viene garantita la protezione per la salute e la sicurezza ambientale dei lavoratori;
- 4. Ridurre al minimo o eliminare le connessioni chimiche.** Leganti, sigillanti e colle nei materiali li rendono difficili da separare e riciclare, aumentando il potenziale di impatti negativi sulla salute umana ed ecologica derivanti dal loro utilizzo;

**5. Utilizzare connessioni meccaniche reversibili (imbullonate, avvitate e inchiodate).** Utilizzo di connessioni standard e una gamma limitata di connettori che ridurranno gli strumenti impiegati, il tempo e gli sforzi per passare da una all'altra;

**6. Separare sistemi meccanici, elettrici e idraulici, (MEP).** Disticare i sistemi MEP dagli assemblaggi che li ospitano, semplificando la separazione di componenti e materiali per la riparazione, la sostituzione, il riutilizzo e il riciclaggio;

**7. Progettare per il lavoratore e per un lavoro di separazione.** dimensionare i componenti alla scala umana per facilitare la rimozione da parte di attrezzature meccaniche. Questo farà diminuire l'intensità del lavoro e il numero di lavoratori specializzati necessari;

**8. Semplicità di struttura e forma.** Semplici sistemi strutturali open-span, forme semplici e standard dimensionali a griglia che consentiranno facilità di costruzione e decostruzione;

**9. Intercambiabilità.** Utilizzo di materiali e sistemi che abbiano principi di modularità, indipendenza e standardizzazione per facilitare il riutilizzo;

**10. Decostruire in modo sicuro.** Consentire il movimento delle attrezzature, la sicurezza dei lavoratori e dell'accesso al sito faciliterà il lavoro di ristrutturazione e smontaggio, riducendo costi e rischi;

#### **Le sei S secondo Stewart Brand**

Utilizzando la nomenclatura di F. Duffy e modificata da S. Brand [13] nel suo libro del 1994, "How Building's Learn", andiamo ad analizzare il sistema delle sei S ovvero: *Site - Structure - Skin - Services - Space Plan - Stuff*. Queste categorie hanno lo scopo di aiutare a descrivere gli edifici come "strati" che sono in costante attrito. I livelli con un cambiamento più rapido, ad esempio lo *Space Plan*, sono controllati dai livelli che cambiano più lentamente come la *Structure*, che è meno flessibile, creando così attrito tra di loro. Per esempio, un elemento strutturale interno che può essere spostato solo come parte dell'intera riconfigurazione dell'edificio determinerà i limiti delle modifiche non strutturali dello *Space Plan*. Se la configurazione dello *Space Plan* necessaria per ottimizzare la funzione dell'edificio non può essere fatta perché la *Structure* non lo permetterà, questo alto grado di attrito potrebbe causare l'obsolescenza prematura dell'intero edificio. Al fine di evitare questi conflitti, sia durante l'uso, sia come mezzo per facilitare lo smontaggio a fine vita, viene considerato che gli insiemi di cui è composto l'edificio hanno cicli di utilizzo e che l'usura può aiutare i progettisti a pianificare il cambiamento con la minima disfunzione dell'edificio, i minimi costi e il minimo spreco. *Stuff* non ha incluso, in quanto sono artefatti non costruiti, i mobili che non sono collegati agli edifici. Le categorie di *Stuff* sono comunque utilizzate nelle descrizioni di componenti e materiali, in quanto fanno ancora parte della libreria di prodotti per l'edilizia.

I sei strati di cui parla Brand sono:

- **site** (impostazione geografica, posizione urbana, definizione legale del lotto) può facilmente durare più a lungo della vita dell'edificio. Si tratta dell'area in cui sorge l'edificio e non può essere modificata, anzi seguendo i principi dell'ecologia la costruzione dovrebbe avere il meno impatto possibile su di esso;
- **struttura** (fondazioni ed elementi portanti) può durare 30-300 anni anche se molti edifici non vivono così a lungo per altri motivi. Si parla principalmente dell'ossatura in calcestruzzo armato, ossatura metallica, o muratura portante. Non può essere toccata se non quando si vuole dismettere l'edificio;
- **skin** (l'involucro dell'edificio, costituito da telaio, finiture esterne, vetri, ecc.) può cambiare per la riparazione ogni 25 anni circa. È quello su cui agiamo per migliorare aspetti energetici dell'edificio e su cui è bene poter lavorare anche a distanza di pochi anni. Il seguente lavoro di tesi si focalizza su questo strato;

- **services** (gli impianti HVAC e mezzi di movimento come ascensori) possono raggiungere il momento di essere sostituiti ogni 7-15 anni e possono causare la demolizione di un intero edificio se il loro inserimento nell'edificio ne impedisce l'alterazione. Anche su questi devo poter agire in modo facile per evitare l'obsolescenza dell'edificio;
- **space Plan** (divisione dello spazio, mobili, finiture interne) può variare da un ambiente all'altro in quanto può essere revisionato spesso. In un ambiente commerciale, ad esempio, si hanno cambiamenti significativi dello *space plan* anche ogni 3 anni. Al contrario in un ambiente residenziale questo può avvenire in tempi più lunghi, visto che ha un costo in termini economici rilevante;
- **stuff** (mobili, lampade autoportanti, elettrodomestici, ecc.) le cose che cambiano giornalmente o mensile. Sta ad ogni singolo utente e quindi fuori dal controllo del progettista;

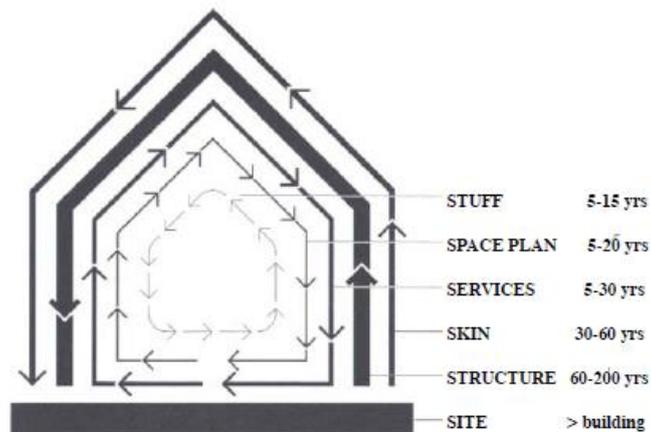


Figura 5 Le sei S di Stewart Brand

Un altro importante personaggio che ha illustrato il Design for Disassembly è Philip Crowther [12]. Il suo contributo è fondamentale in quanto non si è spinto solo ad enunciare dei principi ma ha ipotizzato delle vere e proprie linee guida pratiche.

Per l'autore è importante capire come progettare con lo scopo finale di disassemblare e, pertanto, è stato necessario per lui introdurre una serie di **principi di progettazione** o linee guida di progettazione. Lo studio e l'analisi di esempi permette di porre più attenzione all'atto pratico e significativo della questione dello smontaggio, e da alcuni di essi sono stati tratti i ragionamenti per arrivare ai principi. Alcuni di questi esempi sono: edifici in legno tradizionali e vernacolari, edifici temporanei per uso militare, i progetti Dymaxion di Buckminster Fuller, il Fun Palace di Cedric Price, il Centre George Pompidou, e molti dei progetti di Nicholas Grimshaw. Lo studio di questi edifici e molti altri, alcuni realizzati e altri solamente al livello concettuale, rivelano un modello di soluzioni o approcci comuni alla difficoltà del Design for Disassembly. Queste norme possono essere viste come linee guida di progettazione o tecniche per architetti e progettisti. I principi costituiscono anche precise indicazioni per consentire uno sviluppo per tutti i livelli della gerarchia del riuso e un maggiore utilizzo dei materiali riciclati che possano incoraggiare l'industria e il governo a sviluppare nuove tecnologie per la riconversione e creare una rete di sostegno più ampio ai mercati per il futuro.

- *ridurre al minimo il numero di diversi tipi di materiali* - questo semplificherà il processo di selezione durante lo smontaggio e ridurrà il trasporto nei diversi luoghi di riciclaggio. Comporterà inoltre maggiori quantità di riuso di ciascun materiale;

- *evitare materiali tossici e pericolosi* - questo ridurrà il potenziale di contaminazione dei materiali che vengono smistati per il riciclaggio e ridurrà il rischio per la salute degli operai che altrimenti potrebbero essere scoraggiati nel mettere mano a materiali pericolosi;
- *evitare materiali compositi e creare sottoinsiemi inseparabili dallo stesso materiale* – in questo modo grandi quantità di un materiale non saranno contaminate da una piccola quantità di un materiale estraneo che non può essere facilmente separato;
- *evitare finiture secondarie ai materiali* - tali rivestimenti possono contaminare il materiale di base e rendere il riciclaggio difficile, ove possibile utilizzare materiali che forniscano la propria finitura o utilizzare finiture separabili meccanicamente (Nota: alcune finiture protettive come la zincatura possono essere molto utili, poiché prolungano la durata del componente nonostante i problemi di smontaggio o riciclaggio);
- *fornire un'identificazione standard e permanente dei tipi di materiali* - molti materiali come la plastica non sono facilmente identificabili e dovrebbero essere dotati di un marchio di identificazione non rimovibile e non contaminante per consentire la futura cernita. Tale marchio potrebbe fornire informazioni sul tipo di materiale, sul luogo o sull'origine, sulla capacità strutturale, sul contenuto tossico, e così via;
- *ridurre al minimo il numero di diversi tipi di componenti* - questo semplificherà il processo di smistamento e ridurrà il numero di diverse procedure di smontaggio da intraprendere. Renderà anche il riutilizzo dei componenti più attraente a causa di un minor numero di componenti;
- *utilizzare connessioni meccaniche piuttosto che chimiche* - questo consentirà la facile separazione dei componenti e materiali senza forzare, riducendo la contaminazione dei materiali e riducendo i danni ai componenti;
- *utilizzare un sistema di costruzione aperto in cui parti dell'edificio sono più liberamente intercambiabili e meno uniche per la singola applicazione* - questo consentirà modifiche nel layout dell'edificio attraverso il trasferimento del componente senza modifiche significative;
- *utilizzare il design modulare* - utilizzare componenti e materiali compatibili con altri sistemi sia dimensionalmente che funzionalmente. Questo tipo di coordinamento modulare, che oggi in parte diamo per scontato, non solo ha vantaggi nell'assemblaggio, ma chiaramente ha anche vantaggi di smontaggio, in quanto la standardizzazione ha anche un più ampio mercato dei componenti riutilizzati;
- *utilizzare tecnologie di costruzione compatibili con standard, semplici e "low-tech" realizzabile con strumenti comuni* - le tecnologie specialistiche renderanno lo smontaggio difficile da eseguire ed è un'opzione meno attraente, in particolare per l'utente. Tecnologie, materiali e sistemi specializzati che oggi hanno un'applicazione limitata potrebbero non essere prontamente disponibili in futuro quando un edificio deve essere smontato;
- *separare la struttura da: rivestimento, pareti interne e servizi* - per consentire il parallelo smontaggio, tale che alcune parti o sistemi dell'edificio possano essere rimossi senza intaccare altre parti. Nella maggior parte delle costruzioni i metodi possono essere considerati come un sistema di pareti portanti o un sistema a telaio separato da ciò che non è strutturale. Il sistema a telaio separato è di gran lunga il più compatibile dei due con una serie di requisiti per lo smontaggio;
- *fornire l'accesso a tutte le parti dell'edificio e a tutti i componenti* - la facilità di accesso consentirà facilità di smontaggio;
- *realizzare componenti e materiali di dimensioni adeguate ai mezzi di smontaggio previsti* – consentire varie operazioni di movimentazione durante il montaggio, lo smontaggio, il trasporto, il ritrattamento e il riassemblaggio. La gestione di materiali e componenti è una considerazione importante in qualsiasi edificio, a maggior ragione se deve essere smontato e i componenti successivamente riassemblati;

- *fornire una procedura per la lavorazione e la localizzazione dei componenti durante il montaggio e lo smontaggio* - la lavorazione può richiedere punti di attacco per le attrezzature di sollevamento, nonché supporto e posizionamento temporanei di dispositivi. La fornitura di un procedimento per la movimentazione dei componenti non è spesso considerata nella progettazione degli edifici perché l'attuale approccio all'interno dell'industria edile è che un componente verrà gestito una sola volta durante l'assemblaggio iniziale;
- *fornire tolleranze realistiche per consentire manovre durante lo smontaggio* - l'assemblaggio ripetuto e il processo di smontaggio può richiedere una tolleranza maggiore rispetto al processo di fabbricazione di un processo di assemblaggio che viene eseguito una volta per tutte;
- *utilizzare un numero minimo di elementi di fissaggio o connettori* - per consentire uno smontaggio facile e rapido e in modo che la procedura di smontaggio non sia complessa o difficile da capire. Tale principio aiuterà nella riparazione del componente o nella ricostruzione di esso, anche se non è così rilevante per il riciclaggio del materiale, che potrebbe essere recuperato semplicemente rompendo il componente;
- *utilizzare un basso numero di diversi tipi di elementi di fissaggio o connettori* - per consentire un processo di montaggio e smontaggio più standardizzato senza la necessità di numerosi strumenti e operazioni diverse;
- *progettare giunti e connettori per resistere ad un uso ripetuto* - per ridurre al minimo danni irreparabili o distorsioni a componenti e materiali durante le ripetute procedure di montaggio e smontaggio;
- *consentire lo smontaggio parallelo piuttosto che lo smontaggio sequenziale* - in modo che i componenti o i materiali possano essere rimossi senza dover toccare altri componenti o materiali. Laddove ciò non sia possibile vanno resi riutilizzabili i materiali che devono per forza essere toccati. Inoltre, è necessario rendere le parti dell'edificio più accessibili, per consentire il massimo recupero di quei componenti e materiali che sono più probabili da riutilizzare;
- *fornire un'identificazione permanente del tipo di componente* - in modo coordinato con le informazioni sui materiali e le informazioni totali sul sistema di costruzione, idealmente leggibili elettronicamente secondo gli standard internazionali;
- *utilizzare una griglia strutturale* - la dimensione e l'orientamento della griglia devono essere correlati ai materiali utilizzati in modo tale che le campate siano progettate per rendere l'uso più efficiente e consentire il trasferimento coordinato di componenti come il materiale del rivestimento. Ciò si tradurrà anche in più componenti di dimensioni standard e la griglia risponde ai problemi di efficienza;
- *utilizzare sottoinsiemi prefabbricati e un sistema di produzione di massa* - per ridurre il lavoro in cantiere e consentire maggiore controllo sulla qualità e la conformità dei componenti. La prefabbricazione di questi componenti riduce la quantità di lavoro on-site richiesto e quindi facilita il processo di assemblaggio, e successivamente smontaggio, dell'edificio;
- *utilizzare materiali e componenti leggeri* - questo renderà la manipolazione più facile e veloce, rendendo lo smontaggio e il riutilizzo un'opzione più attraente. Ciò consentirà anche lo smontaggio per la manutenzione ordinaria e la sostituzione delle parti;
- *identificare in modo permanente i punti di smontaggio* - in modo da non essere confusi con altre caratteristiche della costruzione e per aumentare la conoscenza dei componenti dell'edificio. Oltre a indicare i punti di smontaggio, potrebbe essere necessario indicare le procedure di smontaggio con delle istruzioni;
- *fornire loro pezzi di ricambio e di stoccaggio in loco* - in particolare per parti progettate su misura, sia per la sostituzione di componenti rotti o danneggiati e quando necessario per piccole modifiche relative alla progettazione. Lo stoccaggio di componenti per il ricambio va considerato fin dall'inizio;

- *conservare tutte le informazioni sui sistemi di costruzione dell'edificio e sul montaggio e smontaggio* - si dovrebbero compiere sforzi per conservare e aggiornare informazioni quali i disegni "as built", compresi tutti i materiali riutilizzabili e il potenziale di riciclaggio come registro delle risorse. La conservazione di tali informazioni comprendente l'intero edificio migliora il suo valore per il trasferimento, il riutilizzo o il riciclaggio.

Da questo elenco di principi di progettazione per lo smontaggio, emerge che ci saranno inevitabilmente situazioni di conflitto tra alcuni punti. Ad esempio, la necessità di *ridurre al minimo il numero di diversi tipi di materiali* non sarà sempre compatibile con la necessità di *utilizzare materiali leggeri*. In tal caso, per determinare i potenziali benefici ambientali derivanti da ciascun principio, potrebbe essere necessario confrontare e valutare la questione in modo più ampio. I principi in sé offrono una guida su *come progettare* i sistemi edilizi in un'ottica di smontaggio futuro ma, come già notato, ci sono temi più ampi che devono essere affrontati per rispondere alle domande più complesse, relative all'oggetto dello smontaggio e alla logistica, in termini temporali e spaziali. Uno dei modi in cui può essere trattato il problema con una più ampia comprensione del problema è rappresentato dalla *tabella 1* che mostra come i diversi principi saranno più o meno rilevanti per i diversi scenari di fine vita proposti. La tabella valuta ciascun principio rispetto ai quattro scenari di fine vita della gerarchia del riciclo e li classifica come "altamente pertinenti", "pertinenti" o "normalmente non pertinenti". Questa classifica consente al progettista di valutare i principi in base ai benefici tecnici che possono produrre, offrendo così un metodo, basato sul livello di riciclo, per determinare i principi più appropriati da applicare a un progetto di edificio.

Legend of level of relevance:					
● Highly relevant					
• Relevant					
. Not normally relevant					
No	Principle	Material recycling	Component remanufacture	Component reuse	Building relocation
1	Use recycled and recyclable materials	●	●	.	.
2	Minimise the number of different types of material	●	●	.	.
3	Avoid toxic and hazardous materials	●	●	.	.
4	Make inseparable subassemblies from the same material	●	●	.	.
5	Avoid secondary finishes to materials	●	●	.	.
6	Provide identification of material types	●	●	.	.
7	Minimise the number of different types of components	.	•	●	●
8	Use mechanical not chemical connections	.	●	●	●
9	Use an open building system not a closed one	.	.	●	•
10	Use modular design	.	.	●	•
11	Design to use common tools and equipment, avoid specialist plant	.	•	●	●
12	Separate the structure from the cladding for parallel disassembly	.	.	●	•
13	Provide access to all parts and connection points	•	•	●	●
14	Make components sized to suit the means of handling	.	•	●	●
15	Provide a means of handling and locating	.	.	●	●
16	Provide realistic tolerances for assembly and disassembly	.	.	●	●
17	Use a minimum number of connectors	.	•	●	●
18	Use a minimum number of different types of connectors	.	•	●	●
19	Design joints and components to withstand repeated use	.	.	●	●
20	Allow for parallel disassembly	•	•	●	•
21	Provide identification of component type	.	•	●	•
22	Use a standard structural grid for set outs	.	.	.	●
23	Use prefabrication and mass production	.	.	●	●
24	Use lightweight materials and components	●	●	●	●
25	Identify points of disassembly	.	•	●	●
26	Provide spare parts and on site storage for them and parts during disassembly	.	.	.	●
27	Retain all information of the building components and materials	.	.	•	●

Tabella 1 Principi del Design for Disassembly e la loro rilevanza rispettivamente alla gerarchia dei livelli di riciclo

Rielaborando i principi di Crowther per poterli adattare allo scopo della seguente tesi, si è proceduto con la concentrazione di questi all'interno di macrogruppi. Nei capitoli seguenti verrà presentato il metodo proposto per supportare la progettazione di componenti e sistemi edilizi reversibili.

## 3 IL PROCESSO BIM

---

### 3.1 DEFINIZIONE E PRINCIPI

Secondo Eddy Krygiel [7] nel settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni (AEC), c'è un equivoco secondo cui il Building Information Modeling (BIM) è solo un software. Anche se il software è una parte necessaria di questo processo, è molto più di un'applicazione. Quando ci riferiamo al BIM, stiamo discutendo la metodologia e il processo creato. Un "modello BIM", d'altra parte, è un termine grammaticalmente scorretto che è diventato comune, riferendosi specificamente al modello digitale creato dal software, piuttosto che ad un processo basato sul BIM.

Il pioniere del Bim, Charles Eastman [14], ha definito la modellazione Bim come un nuovo approccio alla progettazione, alla costruzione e alla gestione delle strutture in cui viene utilizzata una rappresentazione digitale del prodotto e del processo dell'edificio, per facilitare lo scambio e l'interoperabilità delle informazioni in formato digitale. Il BIM è un cambiamento relativamente recente nella metodologia di progettazione e documentazione nelle industrie di costruzione. Il BIM può dare informazioni sull'intero edificio e un crea un set completo di documenti memorizzati in uno o più database integrati. Le informazioni sono organizzate per essere fruite a più livelli, mentre geometrie e componenti sono spesso caratterizzati da attributi parametrici. Eventuali modifiche geometriche apportate a un oggetto all'interno del modello sono immediatamente riflesse su tutto il resto, nonché in tutte le viste. Un modello BIM contiene le strutture e gli elementi effettivi dell'edificio, piuttosto che una rappresentazione bidimensionale dell'edificio che si trova comunemente nei disegni basati sul CAD. Il BIM è definito come la creazione e l'uso di elementi coordinati, coerenti e calcolabili da informazioni, su un progetto di un edificio che può essere in fase di progettazione, manutenzione e smantellamento. Sono contenute al suo interno le **informazioni parametriche** utilizzate per la progettazione durante il processo decisionale, la produzione di **documenti** di costruzione di alta qualità, la previsione di prestazioni dell'edificio, la **stima dei costi** e la pianificazione della costruzione. Un modello BIM può essere utilizzato in modo olistico durante tutto il processo di progettazione e il processo di costruzione. Ad esempio, può aiutare il gruppo di progettazione consentendo **modifiche in parallelo** effettuate da più componenti accelerando il processo di progettazione. Se si sposta un muro in un piano, si riflette in elevazioni, nelle sezioni e nelle altre viste correlate generando una documentazione completa. Dopo che il modello è stato completato dalla squadra di progettazione, può quindi essere consegnato all'appaltatore. Quest'ultimo può utilizzare il modello per la visualizzazione **in loco** delle finalità di progetto per comprendere come dovrebbe essere lo spazio una volta completato, invece che doverlo immaginare da un'astrazione 2D fornita nel set di disegni. L'appaltatore può inoltre utilizzare il modello per i controlli delle **quantità di materiali** necessarie e aggiornare i dati in tempo reale. Quindi, avendo ad esempio un muro, l'appaltatore potrebbe dire immediatamente quanto gesso e quanto isolamento sono necessari per costruirlo. Eventualmente i proprietari possono utilizzare il BIM per **gestire e far funzionare la struttura**, programmando i materiali e gli arredi. Il BIM ha cambiato il modo in cui progettisti e appaltatori guardano l'intero edificio fin dal processo di progettazione preliminare, attraverso la documentazione di costruzione, fino alla costruzione vera e propria, e molto importante ai fini di questa tesi, **anche nella gestione degli edifici post-costruzione**. Con il BIM, crei un modello 3D parametrico utilizzato per **generare automaticamente astrazioni** di edifici tradizionali come piani, sezioni, prospetti e dettagli. I disegni non sono solo una raccolta di linee coordinate, ma rappresentazioni interattive del modello. Lavorare in un framework basato sul modello garantisce che una modifica in una vista si propagherà a tutti altre viste del modello. Questo sistema potenziato consente un controllo senza precedenti sulla qualità e sul coordinamento delle informazioni del progetto fornendo allo stesso tempo strumenti per una rapida analisi del consumo di energia e di materiale. In un metodo basato sul CAD, ogni vista viene disegnata separatamente senza alcuna relazione tra i disegni essendo infatti solo

una raccolta di tutti i file generati manualmente. Il BIM non è certamente l'unico strumento nello scenario, ma è di crescente importanza per aiutare a gestire la quantità sempre più crescente di informazioni e complessità di un progetto.

Vediamo di **indagare alcuni dei motivi che hanno reso necessario un cambiamento nella nostra metodologia e nel modo di pensare**. Negli ultimi cento anni, l'industria della progettazione e dell'edilizia è cambiata radicalmente. Gli edifici sono diventati molto più complessi, molti più correlati e frutto di sistemi integrati. Durante questo periodo, abbiamo aggiunto una serie di sistemi di costruzione e altri livelli di progettazione che non esistevano, per un eccessivo livello di complessità o semplicemente non esistevano affatto. Se si considera un moderno edificio per uffici, negli ultimi cento anni, abbiamo aggiunto dati e telecomunicazioni, aria condizionata, sicurezza, sostenibilità, parcheggio sotterraneo e miglioramenti agli involucri edilizi, per citare solo qualche specialità. Con **l'aggiunta della complessità**, architetti, proprietari e appaltatori hanno tutti dovuto adattarsi a questi cambiamenti. Questi livelli hanno richiesto **più documentazione** da parte dell'architetto che disegna il progetto, con molte più tavole e dettagli aggiunti al set di disegni. Ciò ha a sua volta richiesto più tempo per coordinare tutti questi sistemi, gestire i mestieri e gli installatori aggiuntivi in loco per l'appaltatore, e ha richiesto uno staff più competente per mantenere questi sistemi da parte del proprietario. Questi aumenti di specializzazione, scala e complessità hanno aggiunto tempo e costo al processo e al ciclo di vita dell'edificio. Questi e altri fattori hanno portato a un calo generale delle prestazioni degli edifici e ad un aumento del consumo di energia.

Per analizzare questi fattori in modo un po' più dettagliato, è necessario ottenere un quadro più ampio del settore della progettazione e delle costruzioni negli ultimi decenni. Guardando al patrimonio storico del settore, possiamo vedere dove siamo per quanto riguarda il tempo di costruzione, l'energia e altre risorse. Se non consideriamo un cambiamento nei nostri metodi per adattarci all'ambiente che cambia, possiamo solo aspettarci che queste tendenze continuino a modificarsi. Questa analisi ci permetterà di capire meglio dove dobbiamo concentrare le nostre energie per attuare il cambiamento. **Le tendenze in aumento di costo del lavoro e dell'energia** mostrano che gli edifici stanno diventando più complicati da costruire. Hanno bisogno di sempre più risorse per essere costruiti ed operare, e questo si traduce in un aumento del costo del ciclo di vita per un edificio. Man mano che questi costi e complessità aumentano, **siamo inondati con più informazioni e dati da gestire sull'edificio**. Per stare al passo con le tendenze in crescita, dobbiamo trovare modi migliori per coordinare le informazioni, comunicarle chiaramente alle varie parti coinvolte, e meglio comprendere il nostro ruolo nell'ecologia globale. In questo modo, possiamo utilizzare gli strumenti disponibili per rendere più efficiente il nostro lavoro utilizzando al massimo le risorse disponibili.

### 3.2 POTENZIALITÀ DEL BIM IN RELAZIONE AI CRITERI DEL DESIGN FOR DISASSEMBLY

Come scrivono Arghavan Akbarieh e Felix Norman Teferle [15] nella **loro review letteraria dell'argomento**, Il Design for Disassembly non è un concetto completamente nuovo. La sua definizione moderna è rinnovata con le ideologie della sostenibilità e della circolarità, cioè progettare un edificio sostenibile con elementi che possono essere reintrodotti nel mercato per un futuro riutilizzo. L'aggiunta del livello di digitalizzazione (sotto forma di BIM) a questa definizione ne esalta la complessità. Pertanto, il DfD basato sul BIM è una miscela di argomenti sottosviluppati con pochi esempi pratici nella storia moderna della costruzione. Un significativo ostacolo nell'applicazione diffusa del DfD basato su BIM è percepito come la disconnessione tra BIM, strumenti di gestione e pianificazione EoL/DfD. L'industria delle costruzioni sembra desiderosa di **utilizzare sempre più strumenti BIM e DfD in tandem** per ottenere una migliore gestione del ciclo di vita e per la trasparenza dei dati. Mentre l'ambiente collaborativo del BIM è attraente per coloro che sono

interessati a una costruzione BIM-based, sembra che la capacità degli strumenti BIM di memorizzare un'enorme quantità di informazioni sia più attraente per coloro che sono coinvolti nel DfD. Uno dei motivi è l'enorme **quantità di informazioni che il DfD richiede** e il tempo delle effettive attività di decostruzione attualmente sconosciuto ma che nel futuro saranno noti.

Tuttavia, ancora oggi non c'è un metodo chiaro e specifico per ricavare le informazioni necessarie a strutturare in modo semplice il legame tra BIM e DfD. Le banche dati, come ad esempio **Building as material Banks** che ha creato i Passaporti dei Materiali elettronici, mirano a essere uno sportello unico per le informazioni sui materiali. Cercano di racchiudere insieme di dati che descrivono caratteristiche definite dei materiali presenti nei prodotti che conferiscono loro valore per il recupero e il riutilizzo. In alcuni brevi punti i passaporti mirano a:

- aumentare il valore o mantenere il valore di materiali, prodotti e componenti nel tempo;
- creare incentivi per i fornitori a produrre materiali/prodotti edili sani, sostenibili e circolari;
- sostenere le scelte dei materiali nei progetti di Reversible Building Design;
- facilitare la scelta di materiali da costruzione sani, sostenibili e circolari da parte di committenti, gestori e ristrutturatori;
- facilitare la logistica inversa e il ritiro di prodotti, materiali e componenti;

Nonostante l'enorme sforzo che gli studiosi stanno cercando di fare si è ancora lontani da riuscire facilmente a reperire le informazioni necessarie, soprattutto se parliamo di un tema specifico come il DfD e se lo si vuole rapportare ad un software.

**Di seguito sono riportati alcuni casi di connubio tra Software e DfD/LCA che potrebbero avere un futuro e che sono stati da spunto per la realizzazione del mio metodo.**

Per trovare la soluzione di decostruzione più sostenibile in termini di emissioni di carbonio e consumo di energia, A. Akbarnezhad [16] ha pensato uno studio basato sul BIM con **quattro diversi scenari EoL**:

- (A) convenzionale demolizione e messa in discarica;
- (B) convenzionale demolizione e messa in discarica, ma con il riciclo di calcestruzzo e acciaio;
- (C) disassemblaggio dei componenti orientati a DfD alla fine del primo ciclo di vita, mentre tutto è interamente demolito alla fine del secondo ciclo di vita;
- (D) smontaggio di componenti orientati a DfD al fine del primo ciclo di vita, mentre cemento e acciaio vengono riciclati alla fine del secondo ciclo di vita;

Hanno preso in considerazione dei fattori, tra cui l'energia incorporata in materiali e componenti, trasporti, costi e prezzi di mercato. Sulla base dei loro risultati, la quarta soluzione è l'opzione più socialmente ed economicamente sostenibile.

I loro risultati sono conformi ai risultati di un altro studio di Densley Tingley D. e Davison B. [17], in cui hanno dimostrato che quando un elemento (come una trave d'acciaio) con una durata di vita individuale superiore a quella dell'edificio in cui è incorporata è utilizzata in più di una struttura, le **emissioni di carbonio prodotte sono divise per le vite di utilizzo e sono quindi molto più basse**. Vari componenti in un edificio hanno aspettative di vita diverse che possono essere archiviate e successivamente riprese in base alla richiesta grazie al BIM. Su questa nota, l'utilizzo dell'edificio che è direttamente correlato all'occupazione, all'attività e al comportamento di chi lo usa, determina notevolmente la durata dei componenti dell'edificio. Inoltre, hanno dimostrato che un edificio basato su DfD produce minori emissioni di carbonio per l'intero ciclo di vita e principalmente in fase di disattivazione. Tuttavia, il DfD avrebbe successo solo se i componenti vengono recuperati dopo che il ciclo di vita dell'edificio è terminato. Qualsiasi edificio può essere costruito, ma per

decostruirlo con successo (dopo molti anni di occupazione quando i progettisti e gli appaltatori iniziali non sono più coinvolti) è un compito difficile.

Con un nuovo approccio, Akinade O.O. & Al. [18] hanno preso di mira i **fattori di successo tecnici e non tecnici necessari per un effettivo recupero dei materiali grazie al Dfd**. Hanno scoperto che la legislazione e le politiche rigorose, il processo di progettazione e la competenza per la decostruzione, la progettazione per il recupero dei materiali, la progettazione per il riutilizzo dei materiali e la progettazione per la flessibilità dell'edificio sono i fattori di successo generalmente accettabili per affrontare lo smaltimento degli edifici in modo sostenibile. **Il BIM può aiutare con la stima delle quantità dei materiali**, andando a ottimizzare le volumetrie dei componenti necessari, inoltre aiuta anche con le proprietà dei materiali, come cerca di dimostrare il seguente lavoro di tesi, andando a individuare i più idonei per lo smontaggio e quelli che stimolano il processo di recupero. Materiali, regolamenti, metodi di costruzione, esigenze e gusti sociali cambieranno nel tempo, il che potrebbe portare all'abolizione degli edifici progettati per essere decostruiti e dei componenti riutilizzabili. Pertanto, qualsiasi framework basato nel BIM proposto deve prendere in considerazione i fattori dipendenti dal tempo sopra descritti. Se tutte le informazioni sono registrate in BIM, i componenti riutilizzabili possono essere facilmente regolati ai cambiamenti imprevisti del futuro. Un modello intelligente basato sui singoli oggetti può essere modificato più facilmente delle piante in CAD. In questo modo, sarà anche più facile per gli edifici futuri esplorare le possibilità del fine vita con le tecnologie all'avanguardia.

Molti ricercatori hanno introdotto soluzioni innovative per far proliferare l'uso sistematico del BIM in scenari di fine vita dell'edificio. Kim Y. C. & Al. [19] hanno formulato un **quadro di stima dei rifiuti di demolizione** basato sul BIM che si basa sui tipi di materiali da costruzione in ingresso. Sulla base dei materiali di input, sono stati identificati gli output indicanti la quantità di rifiuti di demolizione.

Sanchez B. e Haas C. [20] hanno stabilito un **framework basato sul BIM per il riutilizzo adattivo degli edifici attraverso la pianificazione selettiva della sequenza di smontaggio**. Il loro metodo impiega regole basate su un'analisi ricorsiva, al fine di trovare un ordine di smontaggio ottimale, ma pratico per diversi edifici al fine di ridurre al minimo gli impatti ambientali e le prestazioni in termini di costi di un edificio. Hanno inoltre insistito sul fatto che l'analisi costi-benefici sia necessaria prima di qualsiasi costruzione o demolizione per confrontare i costi ambientali ed economici associati, rispetto alle alternative di installazione di nuovi elementi.

Inoltre, Rose C.M. e Stegemann J.A. [21] hanno proposto un "processo di triage" per **acquisire le informazioni nel momento giusto e renderle visibili nel posto giusto all'interno della comunità** con un riutilizzo diretto attraverso la creatività nel parco immobiliare esistente. Il loro studio ha dimostrato che una delle principali barriere della decostruzione è che i componenti preziosi non sono identificati in anticipo. Il BIM può risolvere questo problema attraverso la visualizzazione virtuale e il monitoraggio dei componenti.

Bilal M. & Al. [22] hanno esaminato i primi cinque modellatori di BIM presenti sul mercato (vale a dire Autodesk Revit, Bentley MicroStation, Graphisoft ArchiCAD, Vectorworks e Digital Project) per valutare la loro capacità di supportare le pratiche di riduzione dei rifiuti di costruzione. Hanno identificato varie caratteristiche che sono fondamentali per un software di minimizzazione dei rifiuti conforme al BIM o ad un plug-in. In seguito, hanno proposto una **Building Waste Performance Analysis (BWA)** al fine di utilizzare il BIM per progettare un modello di analisi dei rifiuti per l'edificio: questo dovrebbe comprendere la determinazione delle quantità e aiutare a ridurre la produzione di rifiuti.

Inoltre, i **"Big Data"** sono un'altra tendenza emergente che ha attratto molti ricercatori in ogni campo della scienza. Tibaut A. e Zazula D. [23] hanno proposto un quadro concettuale e tecnico per la **gestione sostenibile dei cantieri attraverso i big data**. Hanno testato il loro prototipo per il monitoraggio dei rifiuti in loco durante la fase di costruzione come anche il monitoraggio della produzione e del trasporto dei componenti nelle

attività di costruzione on site. Un monitoraggio BIM-aided potenziato dall'intelligenza artificiale delle opere di costruzione riduce le possibilità di lavorazione inutili e la produzione di rifiuti, che alla fine si traduce in BIM as-built di alta qualità.

In un altro studio condotto da Bilal M. & Al. [24], sono state studiate le analisi dei rifiuti (alimentate da Big Data Architecture). Credono che l'analisi sia il futuro della gestione dei rifiuti rispetto all'Artificial Intelligence che viene praticata nelle attuali attività di gestione. Hanno affermato che la progettazione che riguarda i rifiuti (cioè la minimizzazione dei rifiuti nella fase iniziale di progettazione) sono più compatibili con l'**analisi dei rifiuti (WA)** perché è maggiormente basata sui dati e può gestire un volume considerevole di set di informazioni sulla costruzione al fine di trovare i modelli latenti nella progettazione e nell'approvvigionamento dei materiali. Hanno inoltre sostenuto che la WA consentirà varie tecniche avanzate (come l'analisi delle serie temporali a fini previsionali e preventivi), che è il ragionamento alla base per creare il loro prototipo di simulazione dei rifiuti. Il loro plug-in si basa sull'API (Application Programming Interface) di Autodesk Revit come strumento BIM e secondo quanto riferito, utilizza IFC per acquisire le modifiche di progettazione.

Akinade O.O & Al. [25] hanno identificato una lacuna, analizzando i software BIM esistenti, in termini di analisi delle prestazioni dei rifiuti, soprattutto durante le prime fasi di progettazione. Quindi hanno sviluppato un modello matematico, chiamato punteggio di valutazione della decostruzione basato sul BIM (**punteggio BIM-DAS**). Fornisce un punteggio oggettivo per la valutazione delle strategie del DfD e del grado di decostruzione di un progetto edilizio. Il punteggio BIM-DAS può essere separato in Punteggio di Decostruzione (relativo ai componenti dell'edificio) e Punteggio di Recupero (relativo ai materiali da costruzione). Può essere collegato con strumenti BIM per avere automaticamente le informazioni da un modello.

Per ottimizzare la decostruzione o la pianificazione della ristrutturazione, Volk R. & Al. [26] hanno sviluppato un prototipo chiamato "**ResourceApp**". Registra, immagazzina e ricostruisce gli interni degli edifici esistenti e quindi crea inventari dei materiali. Le stime di tempi, materiali e costi sono rapide se fatte con questo prototipo. ResourceApp utilizza i risultati analizzando i dati dei sensori per rilevare gli oggetti tramite ispezioni walk-through. Quindi, i risultati vengono inviati agli strumenti BIM per la creazione di un digital twin.

Conseguentemente, lo strumento **BWPE (Whole-life Performance Estimator)** basato su BIM è stato sviluppato da Akanbi L. A. & Al. [27] come modello matematico per misurare il grado di circolarità del materiale nella fase di fine vita. BWPE fa una stima delle prestazioni di recupero degli edifici basato sul BIM che mira a contemplare la sostenibilità delle opzioni di costruzione e decostruzione a supporto delle decisioni di progettazione in fase iniziale. Il BWPE fornisce valori numerici per il grado di recuperabilità del materiale e la loro affidabilità nella redistribuzione. È compatibile con gli strumenti BIM, poiché la modellazione parametrica intelligente del BIM consente il recupero automatico di informazioni prive di errori sulla qualità, la quantità dei materiali e le componenti nel modello.

Inoltre, Lu W. & Al. [28] hanno aggiunto ulteriori proprietà non geometriche a quelle di componenti BIM nel loro prototipo, per una corretta stima del **Construction Waste Management (CWM)**. Le proprietà includevano, il livello di produzione di rifiuti di progettazione e di costruzione. Le informazioni date dal CWM sono accessibili tramite un database esterno che può essere collegato al BIM ed essere aggiunto ai componenti BIM esistenti.

Liu Z. & Al. [29] hanno ideato un processo decisionale BIM-aided detto **Construction Waste Minimisation (BaW)** basato su una metodologia mista che utilizza i risultati di questionari, interviste e una revisione della letteratura. Il metodo BaW intende migliorare la comunicazione, la collaborazione, la gestione dei documenti, il rilevamento dei dettagli e delle interferenze, nonché la minimizzazione degli sprechi prestazionali, per calcolare i rifiuti virtuali in tutte le fasi di progettazione. Il BaW Framework ha riunito i requisiti BIM di livello due e livello tre ed è diviso in due parti: costruzione assistita dal BIM di alto livello nel quadro di minimizzazione

dei rifiuti (BaW) e costruzione assistita dal BIM di basso livello nel quadro di minimizzazione dei rifiuti. Il primo è per il processo decisionale strategico e il secondo aiuta più nel dettaglio i processi e le azioni da effettuare. Il BaW di alto livello è in sintonia con le esigenze di sostenibilità dei clienti, come studi di fattibilità e assistenza decisionale per lo sviluppo di briefing strategici. Il BaW di basso livello valuta la minimizzazione dei rifiuti virtuali del concept design. Mira a un'ottimizzazione nella progettazione con la minima generazione di rifiuti virtuali attraverso la modellazione parametrica 3D e il rilevamento delle interferenze. Il risultato dell'analisi dei rifiuti virtuali può essere riportato come il fattore di scarto (cioè la percentuale di produzione di rifiuti edili).

Fatta questa lunga carrellata del come il BIM è stato studiato in relazione a temi quali LCA, la riduzione dei rifiuti in seguito alla demolizione o appunto per il Dfd viene approfondito in che modo si sono relazionati i principi del Dfd e il BIM.

## 4 METODOLOGIA

---

### 4.1 CASI APPLICATIVI DI BIM E DfD

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è quello **di riportare in modo corretto e coerente i principi del DfD con il processo BIM**. Sono già presenti molti studi che hanno tentato di farlo, giungendo a risultati significativi per la comunità scientifica. Tuttavia, le strade che sono state percorse sono differenti da quella che voleva essere improntata in questo lavoro di tesi, che è focalizzato sulla scala dell'edificio giungendo fino al livello di dettaglio dei singoli componenti.

Francois Denis, Camille Vandervaeren e Niels De Temmerman [30], dopo aver esaminato la letteratura in materia di progettazione per il disassemblaggio, compresi i criteri e i metodi di valutazione, secondo un approccio di ricerca esplorativa su semplici esempi, hanno sviluppato un metodo chiamato **Disassembly Network Analysis (DNA)**. Il metodo DNA analizza l'interdipendenza tra gli elementi e definisce quali vengono recuperati e quali persi durante lo smontaggio parziale di una costruzione e quanto tempo richiede lo smontaggio. Il metodo utilizza il BIM e la Network Analysis (NA), ossia l'analisi di rete. Il BIM con il suo database pieno di dati geometrici e non geometrici legati agli elementi costruttivi mira a facilitare le valutazioni quantitative delle opzioni progettuali, con soluzioni per studiare i flussi di risorse e dei rifiuti. Nella NA, le reti sono utilizzate per studiare i modelli di connessione in una vasta gamma di fenomeni fisici e sociali, in particolare per ottimizzare lo smontaggio seguendo le sequenze di manufatti.

Il metodo del DNA fornisce una spina dorsale generica per le analisi relative ai flussi di materiali da costruzione o processi di assemblaggio. Viene brevemente illustrato il potenziale di applicazione del metodo del DNA utilizzando una massa di elementi recuperati, persi e il loro tempo di smontaggio. Utilizzando questo metodo, altri dati, ad esempio il valore di rivendita, la durata residua e la tossicità possono essere collegati agli elementi di costruzione per ulteriori analisi ambientali ed economiche.

Per sviluppare il metodo e garantirne l'usabilità, hanno stabilito **tre regole guida**, considerando gli elementi di design persuasivo:

1. La quantità di parametri aggiunti dagli utenti dovrebbe rimanere limitata. Pertanto, la combinazione con il BIM è considerata un'opportunità chiave nell'integrazione, nello sviluppo e nella diffusione del metodo, in quanto massimizza la quantità di informazioni raccolte riducendo al minimo la quantità di informazioni extra da aggiungere manualmente.
2. Un utente che aggiunge più informazioni dovrebbe essere ricompensato. I valori presi per impostazione predefinita considerano lo scenario peggiore (cioè lo scenario che induce la maggiore quantità di rifiuti). Ad esempio, un modello senza informazioni su connessioni e dipendenze considera per impostazione predefinita che tutte le connessioni sono irreversibili e tutti gli elementi sono interdipendenti, dove per cui si avrà un'elevata quantità di elementi persi. Se l'utente aggiunge ulteriori informazioni, i risultati possono solo migliorare. D'ora in poi, il metodo può valutare progetti preliminari e dettagliati, consentendo agli utenti di testare un progetto lungo il suo sviluppo. Questa seconda regola si riferisce al trigger e alla motivazione.
3. Infine, il metodo del DNA non dovrebbe basarsi su un particolare software BIM ma piuttosto sul generale principio di una piattaforma BIM, come la struttura dei dati, l'approccio orientato agli oggetti e la

classificazione degli elementi. Questa terza regola rende il metodo DNA indipendente dal software proprietario o strumenti in rapida evoluzione e aumenta la capacità dell'utente.

Sulla base della letteratura e della sperimentazione di casi di studio fittizi, gli studiosi hanno selezionato i parametri che possono influenzare il potenziale recupero di un elemento edilizio. I parametri riguardano gli elementi (cioè i nodi della rete), il collegamento fisico tra gli elementi attraverso una connessione o un contatto (cioè i bordi della rete), o la composizione degli elementi (cioè la struttura della rete). Il valore di alcuni parametri dipende da un elenco di verificatori.

Criteria	Verifiers	Data Availability in BIM
Accessibility	The element is free to move in the disassembly direction.	Depending on the Level of Detail.
Transportability	Maximum weight, maximum dimensions.	Yes, if weight max is specified by the user.
Resistance factor [0,1] Weight (kg)		User input or link to external database. Yes.
Reversibility of connection	The two connected elements are separable without damage.	User input or link to external database.
Disassemble time and Demolition time	Based on empirical measurements with a weighting factor.	User input or link to external database.
Sequential dependence	Which other objects needs to be disassembled prior to the disassembly of object i	User input or partially automatic detection in BIM between family types (e.g., beam, column).

Tabella 2 i parametri che possono influenzare il potenziale recupero di un elemento edilizio. Nella seconda colonna sono indicati i verificatori, mentre nella terza colonna troviamo quali dati sono disponibili nel BIM.

Essi hanno poi suddiviso il metodo utilizzando un Diagramma di flusso, il cui principio corrisponde alla seguente domanda: come si smonta e si recupera un elemento  $eO$  (elemento di destinazione)?

**Il metodo è diviso in quattro parti**, che rispondono a domande diverse (Figura 7).

La prima parte di controllo rapido definisce se il tentativo di recuperare  $eO$  ha senso. La questione è rispondere se  $eO$  può essere trasportato (considerando il peso e le dimensioni dell'elemento) e scollegato dalla struttura (considerando la reversibilità della connessione tra  $eO$ , gli elementi circostanti e il fattore di resistenza). In particolare, se questa connessione è irreversibile, un mix delle analisi qualitative e quantitative devono definire quale elemento viene perso.

La seconda parte si occupa della creazione di potenziali percorsi in cui vengono elencati tutti i possibili modi per accedere e recuperare  $eO$  (cioè potenziali sequenze di disassemblaggio). Per fare ciò, l'edificio viene caricato come una rete di elementi (nodi) collegati da delle connessioni (tratti). Attraverso un controllo geometrico del modello, vengono determinati gli elementi direttamente accessibili dall'esterno o dall'interno. Quindi, elenca i potenziali percorsi a partire dall'elemento target verso gli elementi accessibili. Inoltre, gli elementi extra e anche le connessioni che impediscono la rimozione a causa di interdipendenze funzionali vengono aggiunte all'elenco. L'attuale versione del metodo DNA considera due tipi di interdipendenze: la stabilità strutturale (gli elementi non strutturali dipendono sempre da quelli strutturali) e l'accessibilità (un elemento che blocca deve essere rimosso prima di intervenire sull'elemento preso in considerazione). Il primo tipo può essere parzialmente automatizzato tramite BIM considerando i tipi di famiglia e le relazioni host/hosted (ovvero i legami che si stabiliscono tra gli elementi). Il secondo tipo può essere automatizzato utilizzando dei dati geometrici BIM; L'elemento è accessibile se la geometria tocca i

confini tridimensionali della stanza o l'esterno, considerando che i confini della stanza vengono aggiornati ogni volta che un componente viene smontato. Alla fine di questa seconda parte, il metodo crea un elenco di connessioni ordinate in base alla sequenza di smontaggio. È importante sottolineare che c'è una lista da seguire come possibile sentiero. Pertanto, vengono memorizzati diversi elenchi che serviranno a misurare e quantificare la quantità di rifiuti generati da ogni connessione.

La terza parte tratta la quantificazione dell'effetto delle connessioni. Si verifica che per ogni connessione dell'elenco venga controllata la reversibilità (considerando la direzione), il fattore di resistenza degli elementi (per determinare gli elementi potenzialmente persi) e la trasportabilità. Se l'elemento non è trasportabile, irreversibile o non resistente a sufficienza, verrà aggiunto all'elenco degli elementi che non possono essere recuperati. Altrimenti, verrà aggiunto all'elenco degli elementi recuperati. A seconda dell'uso del metodo, viene considerato il tempo di smontaggio o demolizione.

Infine, la quarta parte relativa al processo di informazione e feedback produce per ogni percorso l'elenco di elementi recuperati e connessioni da separare, la massa di rifiuti generati, il tempo per ottenere l'elemento e la sequenza di disassemblaggio. Combinando queste informazioni con i valori di ogni potenziale percorso, l'utente può confrontare e ottimizzare le opzioni progettuali per ottenere indicatori soddisfacenti (flussi di materiale e tempo) per il percorso più breve. Inoltre, il metodo può identificare un parametro, per modificare la priorità, con cui migliorare significativamente un indicatore (flussi di materiale e tempo) con il percorso più breve. Secondo un'analisi critica svolta nell'ambito della presente tesi, si osserva che in questo studio manca una stretta connessione con il BIM, che effettivamente non viene presentata in modo esaustivo.

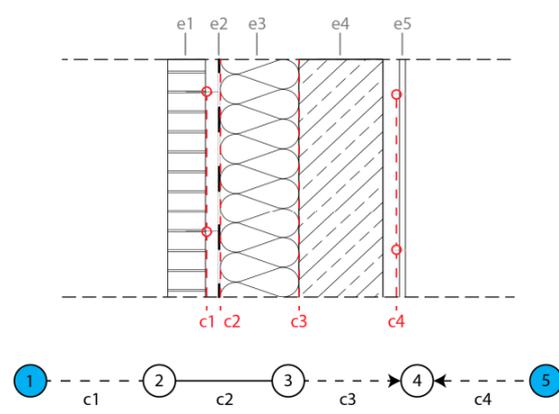
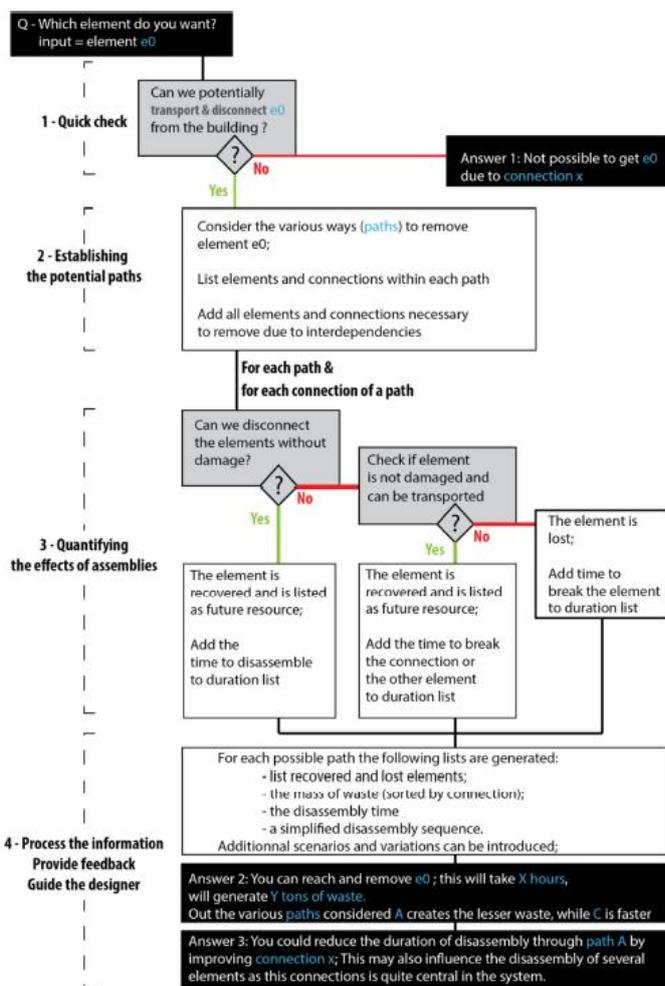


Figura 7 Schema tipo di analisi sintetica di una parete per il metodo DNA

Figura 6 Flowchart del processo seguito per la realizzazione del metodo DNA

## 4.2 IL “REVERSIBLE BUILDING DESIGN”: LE LINEE GUIDA

La domanda che si è posta Elma Durmisevic [2] per elaborare il suo metodo è: **come trasformare l'attuale approccio lineare alla progettazione del "fine vita" (demolizione) degli edifici, in una soluzione progettuale circolare che garantisca molteplici opzioni di riutilizzo finali dell'edificio, dei suoi sistemi, prodotti e materiali?** Questo capitolo verte nella trasformazione di tre aspetti: flessibilità spaziale, flessibilità tecnica, flessibilità materica. Gli edifici che hanno la possibilità di trasformare queste tre dimensioni sono chiamati edifici reversibili. Per reversibilità spaziale si intende, l'adattamento dello spazio in termini di volume, capacità e posizione degli elementi chiave. Reversibilità della struttura implica la riconfigurazione della struttura senza colpire tutto l'edificio. La possibilità di separare le funzioni di un edificio permette di poter lavorare separatamente. Quello che riguarda più da vicino questa tesi è la reversibilità del materiale, in cui una separazione dei materiali e degli elementi fa sì che si possa smontare o effettuare la manodopera solo su alcuni elementi senza intaccare gli altri. Per fare ciò bisogna considerare la geometria, la morfologia degli elementi, la loro posizione e in che modo gli elementi sono uniti tra di loro.

La base di questo studio è la reversibilità, che dà Elma Durmisevic è definita come il processo di trasformazione degli edifici o di smantellamento dei suoi sistemi, prodotti e materiali senza la creazione di danni irreparabili. La costruzione degli edifici che può supportare un tale processo è il **Reversible Building Design (RBD)** e può essere vista come un fattore promotore dell'economia circolare nell'edilizia. La progettazione reversibile dell'edificio è vista come ciò che tiene conto di tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio e si concentra sugli scenari futuri di utilizzo. Le soluzioni progettuali in grado di garantire un'elevata possibilità di riutilizzo dell'edificio, dei sistemi, dei prodotti e dei materiali e che hanno un'elevato potenziale di trasformazione sono descritte come reversibili. Un elemento chiave di RBD è il Dfd, che consente di modificare facilmente le tipologie spaziali e lo smontaggio delle parti dell'edificio.

- Reversibilità spaziale

La trasformazione dello spazio dell'edificio vista come cambiamento della funzione e il suo impatto sulla struttura vengono analizzati durante la fase di fattibilità e progettazione preliminare. Tale processo analizza la capacità dello spazio e della struttura di ospitare diverse funzioni senza causare grandi lavori di ricostruzione, demolizione e perdita di materiale. Meno sforzo è necessario per trasformare un edificio, maggiore sarà il potenziale di trasformazione che avrà. Maggiore è la varietà e il numero di opzioni di modifica (opzioni di riutilizzo degli edifici), maggiore è il potenziale di trasformazione. Vengono identificati tre tipi principali di trasformazioni: opzioni di trasformazione monofunzionale, opzioni di trasformazione transfunzionale e opzioni di trasformazione multidimensionale che integrano le due precedenti.

Gli indicatori di design della reversibilità spaziale sono:

- tipologia edilizia;
- dimensioni del blocco di costruzione;
- posizione del nucleo e distanza tra i nuclei;
- tipo di sistema di carico;
- metodo di costruzione;
- altezza dal pavimento al soffitto;
- aperture delle finestre;

A livello spaziale, le seguenti combinazioni dei parametri di progettazione avranno un impatto sulla capacità dell'edificio di essere trasformato.

- Livelli di decomposizione tecnica

Una divisione in sistema, sottosistema, componente è relativo. Un sottosistema a un livello è un componente a un altro livello. Gli edifici reversibili riconoscono tre livelli di composizione / scomposizione tecnica che sono:

- il livello dell'edificio rappresenta la disposizione dei sistemi, che sono portatori delle principali funzioni dell'edificio (costruzione portante, involucro, partizionamento);
- il livello del sistema rappresenta la disposizione dei componenti, che sono portatori delle funzioni del sistema (finitura e manutenzione) quindi le sotto funzioni dell'edificio;
- il livello dei componenti rappresenta la disposizione di elementi e materiali, che sono portatori di funzioni dei componenti (come finiture e componenti di manutenzione);

- Reversibilità tecnica

La reversibilità della struttura dell'edificio è definita da tre settori del design:

- dominio funzionale: si occupa della decomposizione funzionale e dell'allocazione delle funzioni in materiali separati, che hanno tassi di variazione diversi. Questo dominio definisce le dipendenze funzionali;
- la scomposizione tecnica si occupa della disposizione gerarchica dei materiali da costruzione e delle relazioni, nonché delle dipendenze gerarchiche tra i livelli dei materiali;
- il dominio fisico si occupa di interfacce che definiscono l'integrità fisica e le dipendenze della struttura;

La configurazione reversibile è considerata come il processo di creazione di una disposizione da un dato insieme di elementi definendo le relazioni tra gli elementi selezionati e le loro funzioni in modo da soddisfare i requisiti e i vincoli per lo smontaggio, il riutilizzo e la trasformazione. Durante la progettazione della configurazione reversibile, un progettista assegna funzioni a un insieme di elementi e ne determina le relazioni.

Gli indicatori chiave sono:

- indipendenza: L'indipendenza si rivolge principalmente all'aspetto funzionale e crea un ambiente in cui l'assemblaggio, la trasformazione e il disassemblaggio di un cluster funzionale possono essere realizzati senza influire sull'altro;
- intercambiabilità: L'intercambiabilità affronta l'indipendenza tecnica e fisica e crea l'ambiente in cui sistemi/componenti/elementi possono essere smontati, senza danneggiare le parti circostanti della struttura e fornendo il potenziale per il loro riutilizzo in altri contesti. Il numero e la gerarchia delle relazioni fisiche, nonché la tipologia di interfaccia che aumenta il potenziale di riutilizzo sono essenziali;

Al fine di progettare strutture reversibili che stimolino la manipolazione consapevole delle materie prime e forniscano un elevato livello di trasformazione e riutilizzo, dovrebbero essere soddisfatti i seguenti requisiti:

- accessibilità;
- variazione;
- riutilizzo;
- sostituibilità;

- riconfigurazione;
- riciclaggio;

Nello schema seguente viene riportato uno schema riassuntivo della sequenza di informazioni necessarie

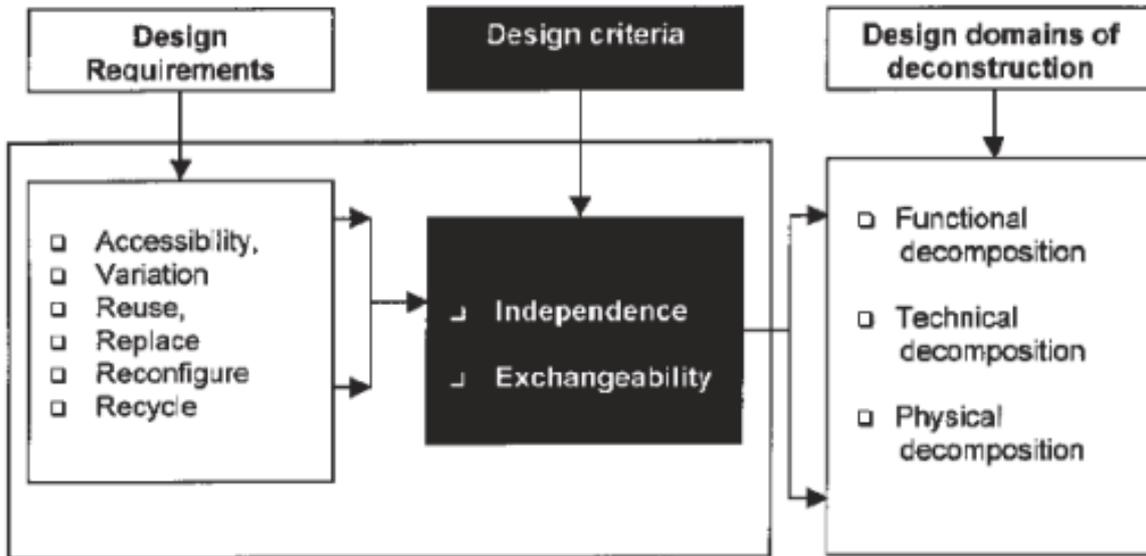


Figura 8 Schema riassuntivo delle informazioni necessarie per definire un edificio reversibile.

A differenza delle strutture convenzionali in cui il design si occupa della composizione funzionale, tecnica e fisica, la progettazione di strutture reversibili considera la decomposizione funzionale, tecnica e fisica. A seconda del punto di vista da cui stiamo esaminando la struttura reversibile (concentrandoci sul riutilizzo

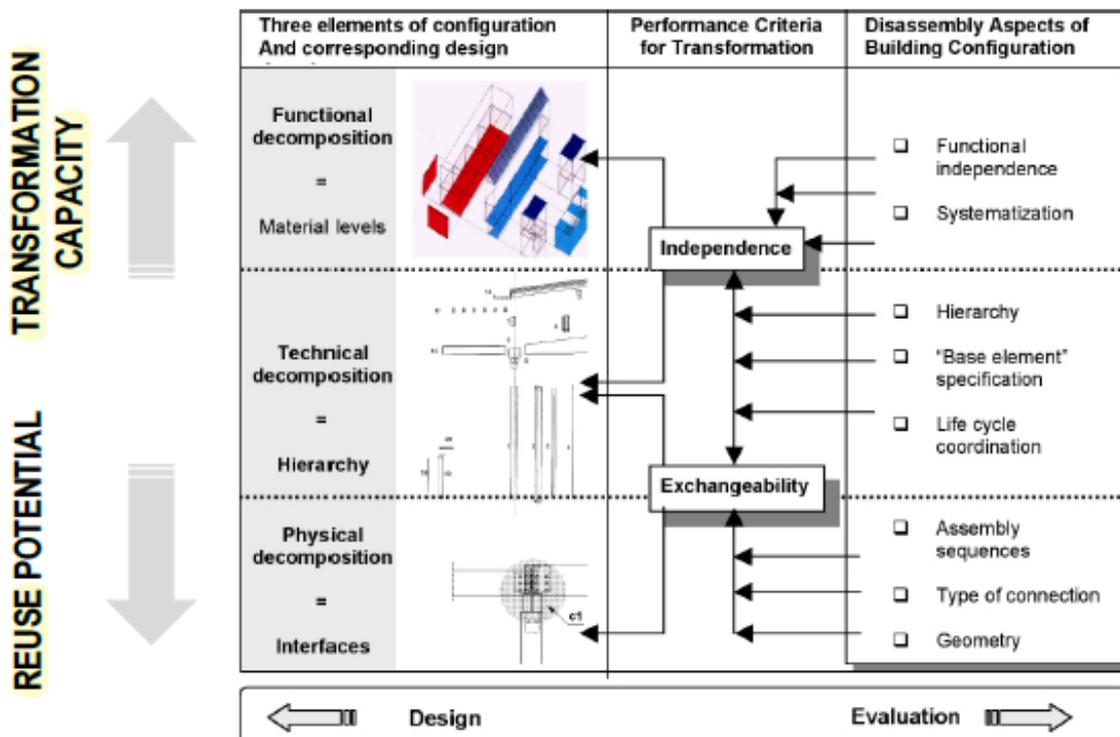


Figura 9 Schema riassuntivo, che si tratti di riuso o capacità di trasformazione, e relazione tra configurazione, criteri performativi e aspetti della configurazione dell'edificio.

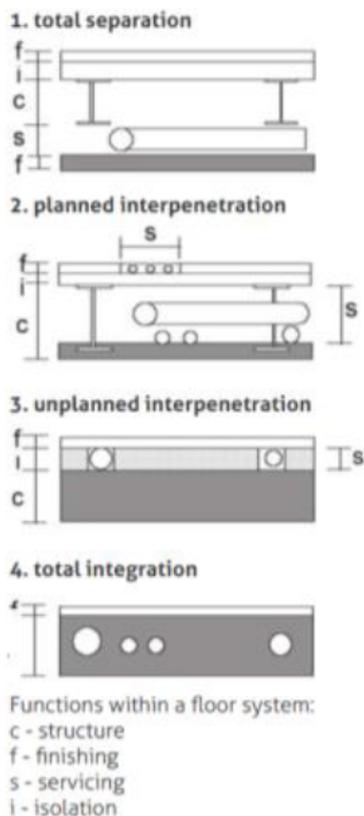
degli elementi o concentrandoci sulla trasformazione della struttura) i fattori di impatto dei criteri che misurano le dipendenze funzionali, tecniche e fisiche differiranno.

#### 4.2.1 Definizione degli aspetti progettuali più importanti per i livelli di decostruzione

Gli aspetti progettuali che influenzano il processo decisionale durante la progettazione di strutture reversibili sono elencati e spiegati all'interno di questo paragrafo. Molti di questi parametri sono stati usati nel presente lavoro di tesi, in quanto rispecchiano alla perfezione il tipo di analisi che si è ricercato.

**1. Decomposizione funzionale:** un componente di un edificio può essere estratto se è indipendente dalla struttura. Il primo passo è suddividere la struttura in diverse sezioni che hanno diverse prestazioni e diversi cicli di vita. L'integrazione di due o più funzioni in un componente può fermare o rallentare la trasformazione che era stata ipotizzata. Differenti funzioni devono avere cicli di vita differenti.

L'incorporazione tra gli elementi può essere totale nel caso peggiore, oppure può essere pianificata (il che presuppone essere stata calcolata in fase di progetto) o non pianificata. Ciò significa che il riposizionamento o il ridimensionamento dei componenti che hanno una funzione influenza l'integrità di altri componenti con altre funzioni. Quello che si vuole ottenere è l'autonomia funzionale. Rendendo le funzioni indipendenti si può giungere alle seguenti strategie: integrazione totale, interpenetrazione pianificata, interpenetrazione non pianificata, separazione totale.



Assessment functional autonomy	
1. total separation (modular zoning)	1,0
2. planned interpenetration for different solutions	0,8
3. planned interpenetration for one solution	0,4
4. unplanned interpenetration	0,2
5. total integration	0,1

Figura 10 Esempio pratico nel caso di una pavimentazione delle categorie di divisione funzionali

## 2. Sistematizzazione e clustering:

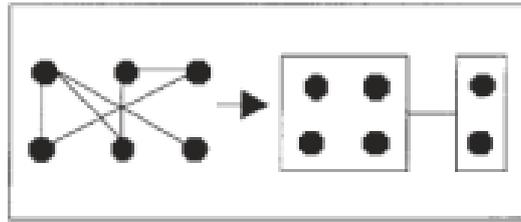


Figura 11 semplificazione delle opzioni di disassemblaggio

Un alto numero di opzioni di disassemblaggio può essere un ostacolo alla reversibilità. Se sono richieste un gran numero di sequenze di disassemblaggio si tenderà a scegliere la demolizione. Questo porta a focalizzare l'attenzione su due fasi di assemblaggio e disassemblaggio: al livello del sito e in fabbrica dove c'è un livello minore di complessità e gli elementi sono riusati più facilmente

**3. Relazioni delle gerarchie tra elementi:** Due aspetti riguardano il modello relazionale: tipo di modello e posizione delle relazioni. Gli edifici tradizionali erano caratterizzati da complessi diagrammi relazionali, che rappresentavano la massima integrazione di tutti gli elementi dell'edificio in un'unica struttura dipendente. In un tale ambiente, la sostituzione di un elemento potrebbe avere conseguenze considerevoli sulle parti correlate alle loro connessioni. L'aspetto più importante che influenza il potenziale di disassemblaggio delle strutture è il numero di relazioni. Si può distinguere tra cinque modelli relazionali che danno luogo a cinque tipi di assiemi:

1. assemblaggio chiuso,
2. assemblaggio stratificato,
3. assemblaggio bloccato,
4. assemblaggio tabella
5. assieme aperto

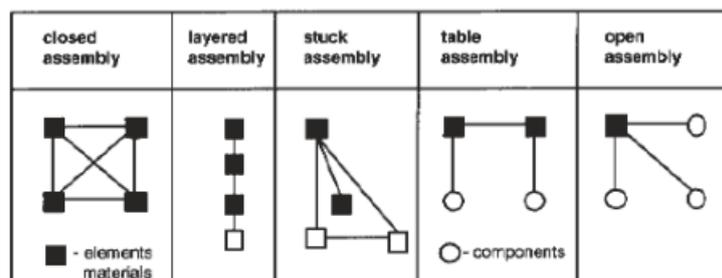


Figura 12 Rappresentazione dei cinque modelli relazionali

Le configurazioni fisse rappresentano modelli che generano assiemi chiusi, sovrapposti o bloccati. Mentre la gerarchia aperta è rappresentata da parti di costruzione che vengono mantenute indipendenti l'una dall'altra creando relazioni dipendenti solo con un elemento all'interno di un assieme (elemento base della configurazione).

Il diagramma delle relazioni può essere interpretato come la rappresentazione dei legami presenti tra i diversi elementi (rappresentati orizzontalmente), mentre ogni colonna rappresenta la scomposizione tecnica all'interno di un gruppo familiare. (vedi figura 13) La regola principale è che i sottosistemi possono avere relazioni solo con l'elemento di base della struttura. In questo modo, i componenti/elementi che appartengono ai sottosistemi, possono essere facilmente sostituiti. Le relazioni verticali rappresentano le

relazioni all'interno di un gruppo funzionale, mentre le relazioni orizzontali rappresentano le relazioni tra diversi gruppi funzionali. Idealmente, diversi gruppi funzionali non dovrebbero essere direttamente correlati. Ciò rende più fattibile la replicabilità e le modifiche di requisiti diversi.

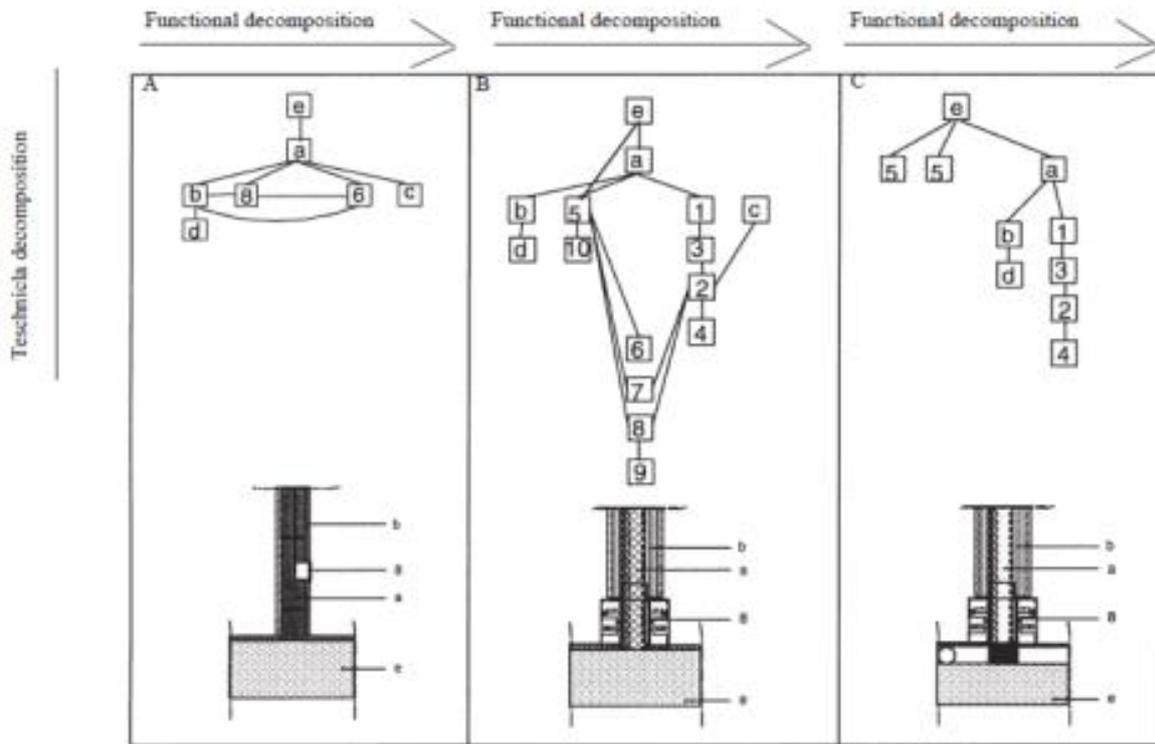


Figura 13 Esempi di decomposizione funzionale

**4. Specifica degli elementi di base:** Un prodotto edilizio (sistema / componente / elemento) è un portatore di funzioni specifiche dell'edificio. Ogni prodotto assemblato rappresenta un cluster di elementi che sono portatori di sotto funzioni. Per garantire l'indipendenza degli elementi all'interno di due cluster, ognuno deve definire il proprio elemento di base, che integra tutti gli elementi circostanti. Questo elemento funge da intermediario tra gli elementi e i cluster. Tale condivisione intermedia funziona su due livelli:

- collega elementi all'interno del cluster;
- funge da intermediario con altri cluster.

Gli elementi di base/intermediari possono essere trovati su tutti i livelli di composizione tecnica di un edificio

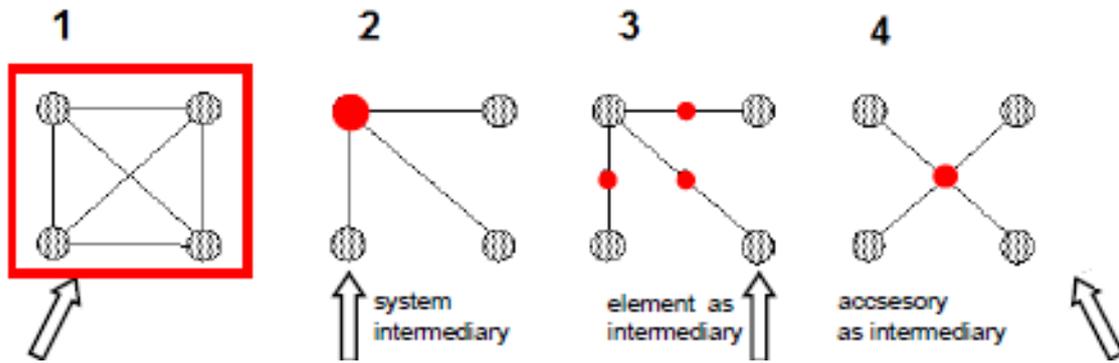


Figura 14 Relazioni possibili tra intermediario ed elemento di base

**5. Sequenze di assemblaggio:** il ciclo di vita di materiali assemblabili, i tipi di materiali, la geometria e il tipo di connessione influenza le sequenze di assemblaggio e disassemblaggio. Il modo in cui viene assemblato un edificio è lo specchio di quello che accadrà durante le fasi di smontaggio e disassemblaggio. Possiamo distinguere due sequenze: una parallela e un sequenziale. Quella parallela è quella ottimale e velocizza i processi. La sequenziale crea delle dipendenze e rende le sostituzioni più faticose e costose. È possibile distinguere cinque tipi di sequenze:

1. secondo un attrattore gravitazionale;
2. parallelo;
3. a cerchio chiuso;
4. interlock;
5. sequenziale.

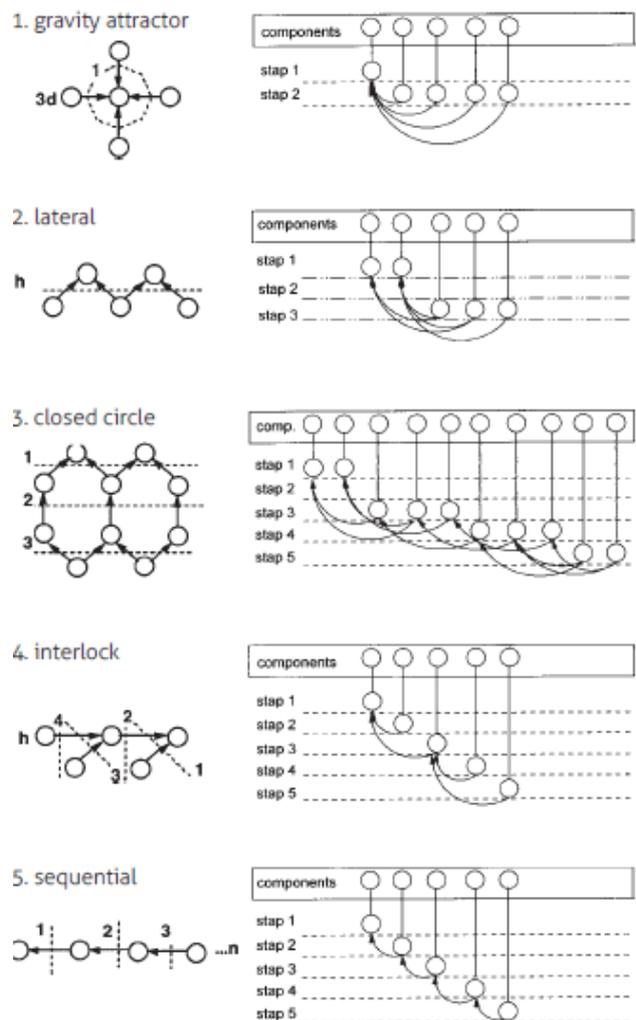


Figura 15 Tipologie di sequenze di assemblaggio

**6. Geometria dell'interfaccia:** La reversibilità degli elementi può essere influenzata dalla modifica della geometria del bordo del prodotto. Ciò è strettamente correlato alla progettazione dell'interfaccia e alle specifiche del tipo di connessione. È possibile identificare sei situazioni che definiscono l'idoneità della geometria per lo smontaggio dei componenti. Si possono fare due distinzioni principali tra geometria aperta e geometria compenetrante. La geometria compenetrante è meno adatta per lo smontaggio, poiché gli elementi possono essere smontati in una sola direzione. Nel peggiore dei casi, i componenti possono essere rimossi solo demolendo gli elementi collegati

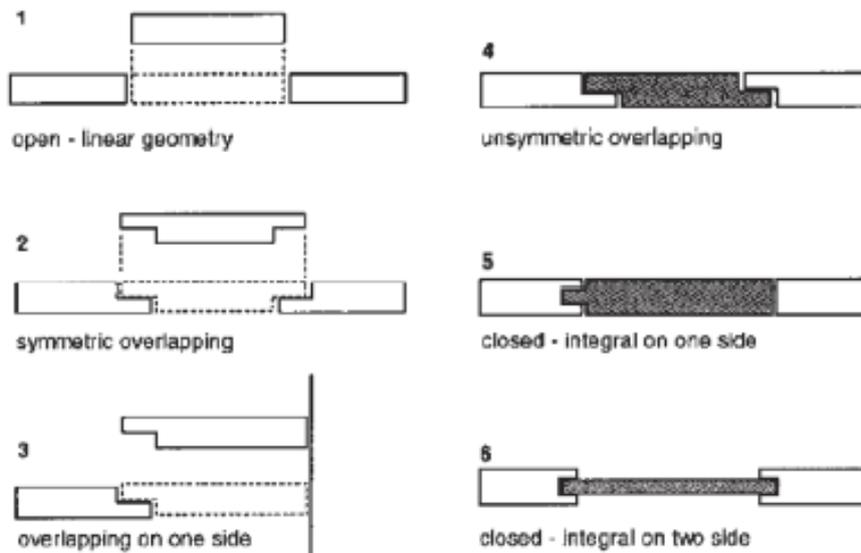


Figura 16 Tipologia di rapporto geometrico tra le parti

**7. Tipo di connessioni:** Le interfacce definiscono il grado di libertà tra i componenti, attraverso la progettazione del bordo del prodotto e la specifica del tipo di connessione. In generale è possibile definire tre tipi principali di connessioni:

- dirette (integrali): le connessioni integrali sono quelle in cui la geometria degli spigoli dei componenti forma una connessione completa. Si possono distinguere due tipi di connessione integrale di base:
  - (i) sovrapposti;
  - (ii) interbloccati.

Le connessioni sovrapposte sono spesso utilizzate tra componenti verticali esterni di facciata o tra componenti verticali e orizzontali. Il loro smontaggio dipende dal tipo di materiale utilizzato, dalle sequenze di assemblaggio, dalla posizione gerarchica dei componenti e dalle loro relazioni con altri componenti. Una connessione interbloccata è una interna in cui i bordi dei componenti hanno una forma diversa. Qui, la forma dei bordi consente solo l'assemblaggio sequenziale;

- indirette (accessorie): le connessioni accessorie sono quelle in cui vengono utilizzate parti aggiuntive per formare la connessione. Si possono distinguere due tipi:
  - interne;
  - esterne.

Il tipo interno incorpora un accessorio sciolto che collega i componenti. L'accessorio viene inserito nei componenti. La connessione possiede il vantaggio di una forma del bordo identica ai

componenti. Lo smantellamento di tali connessioni può essere difficile a causa delle sequenze di assemblaggio sequenziali. Lo snodo esterno accessorio facilita lo smontaggio, con strisce di copertura applicate o con una combinazione di telaio e strisce di copertura;

- Riempiute: connessioni tra due componenti riempiti con materiale chimico. L'assemblaggio di tali componenti richiede molta manodopera. Possono essere connessioni saldate tra piastre metalliche, tra travi e colonne, o possono essere connessioni tra pannelli di pavimento in cemento, mattoni ecc. Lo smontaggio di tali connessioni è spesso impossibile o richiede lo sviluppo di speciali tecnologie di decostruzione come ad esempio le tecnologie laser;

Due criteri principali per la progettazione di connessioni scomponibili sono:

1. gli elementi/componenti devono essere tenuti separati, per evitare la penetrazione in altri componenti o sistemi;
2. le tecniche di giunzione a secco dovrebbero sostituire le tecniche chimiche.

Queste condizioni dovrebbero essere applicate a tutti i livelli di un edificio. In questo modo tutti i sistemi costruttivi diventano smontabili, ogni componente ed elemento è sostituibile e tutti i materiali sono riciclabili. Le caratteristiche di smontaggio di una connessione dipendono da:

- il numero di dispositivi di connessione;
- il tipo di materiale utilizzato nella connessione;
- la forma del bordo di un componente.

Nella gamma da fisso a reversibile si possono distinguere sette tipi di connessione.

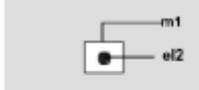
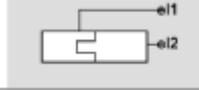
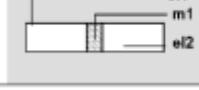
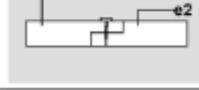
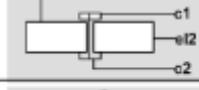
	type of connection	graphic representation	dependence in assembly
fixed	 <b>I</b> Direct chemical connection two elements are permanently fixed (no reuse, no recycling)		$m1 \text{---} e12$
	 <b>II</b> direct connection between two pre-made components two elements are dependent in assembly/ disassembly (no component reuse)		$e11 \text{---} e12$
	 <b>III</b> indirect connection with third chemical material two elements are connected permanently with third material (no reuse, no recycling)		$m1 \text{---} e12$
	 <b>IV</b> direct connection with additional fixing devices two elements are connected with accessory which can be replaced. If one element has to be removed then whole connection needs to be dismantled		$e11 \text{---} c1 \text{---} e12$
	 <b>V</b> indirect connection via dependent third component two elements/component are separated with third element/component, but they have dependence in assembly (reuse is restricted)		$e11 \text{---} c1 \text{---} e12$
	 <b>VI</b> indirect connection via independent third component there is dependence in assembly/disassembly but all elements could be reused or recycled		$e11 \text{---} c1 \text{---} e12$
	 <b>VII</b> indirect with additional fixing device with change of one element another stays untouched all elements could be reused or recycled		$e3 \text{---} c1 \text{---} e1$
reversible			

Figura 17 I sette tipi di connessione

## 8. Coordinamento del ciclo di vita nel montaggio/smontaggio:

Un aspetto del coordinamento nell'assemblaggio riguarda l'integrazione dei materiali rispetto al loro ciclo di vita. I materiali da costruzione hanno cicli di vita che vanno da 5 a 75 anni, ma spesso le sequenze di assemblaggio dei materiali non lo considerano. I materiali con ciclo di vita più breve vengono spesso assemblati per primi. Gli elementi che hanno un lungo ciclo di vita e maggiori dipendenze nell'assemblaggio devono essere assemblati per primi e smontati per ultimi. Gli elementi, che hanno un ciclo di vita breve, devono essere assemblati per ultimi e smontati per primi. Due coordinazioni del ciclo di vita sono significative per le strutture trasformabili:

- assemblaggio di materiali che hanno cicli di vita diversi;
- assemblaggio di materiali, le cui funzioni hanno cicli di vita diversi.

### 4.2.2 Le conclusioni dalla teoria

Quando si analizzano sette aspetti progettuali e i loro sotto aspetti è possibile sviluppare un profilo di reversibilità della struttura dell'edificio/sistema/componente che dia una prima indicazione di possibili miglioramenti del progetto al fine di fornire una maggiore reversibilità strutturale. Per informare i progettisti sui criteri e sul processo di progettazione che può migliorare le soluzioni progettuali per la struttura reversibile dell'edificio, è stata fatta una specifica dei criteri per le tre principali fasi: progettazione preliminare, progettazione definitiva e progettazione tecnica (preparazione per la costruzione). I criteri affrontano tre livelli di dipendenza tra le strutture del prodotto: funzionale, tecnico e fisico. Durante la fase di progettazione preliminare, il focus del design si concentra sulla funzionalità dell'oggetto di design. In termini di reversibilità, la scomposizione funzionale è un importante criterio. Il secondo importante aspetto della progettazione reversibile degli edifici in questa fase è la sistematizzazione. La sistematizzazione rappresenta il raggruppamento di base dei materiali al fine di svolgere una determinata funzione. Quali funzioni sono raggruppate e quali no, determineranno le opzioni di riconfigurazione del prodotto. Inoltre, il coordinamento del ciclo di vita dell'uso e del ciclo di vita tecnico svolgono un ruolo importante nel fornire soluzioni più reversibili. Anche le relazioni e i modelli che rappresentano le dipendenze tra elementi e componenti giocano un ruolo nelle soluzioni reversibili. Infine, durante la progettazione tecnica per l'esecuzione della costruzione, l'indipendenza delle sequenze di assemblaggio, la geometria del bordo del prodotto e la tipologia delle connessioni determineranno in ultima analisi il livello di danno dei prodotti e dei materiali da costruzione recuperati. Se un progettista pone più attenzione alla trasformazione che alla decomposizione funzionale, la composizione tecnica sarebbe una priorità maggiore. Se un progettista si concentra maggiormente sul recupero di alto valore e sul riutilizzo di singole parti, la decomposizione fisica sarà di maggiore interesse. Tuttavia, in definitiva, se un progettista sta progettando un edificio reversibile, tutti e tre i livelli di decomposizione di un edificio (funzionale, tecnico e fisico) hanno lo stesso significato.

## 4.3 DAI CRITERI AI PARAMETRI

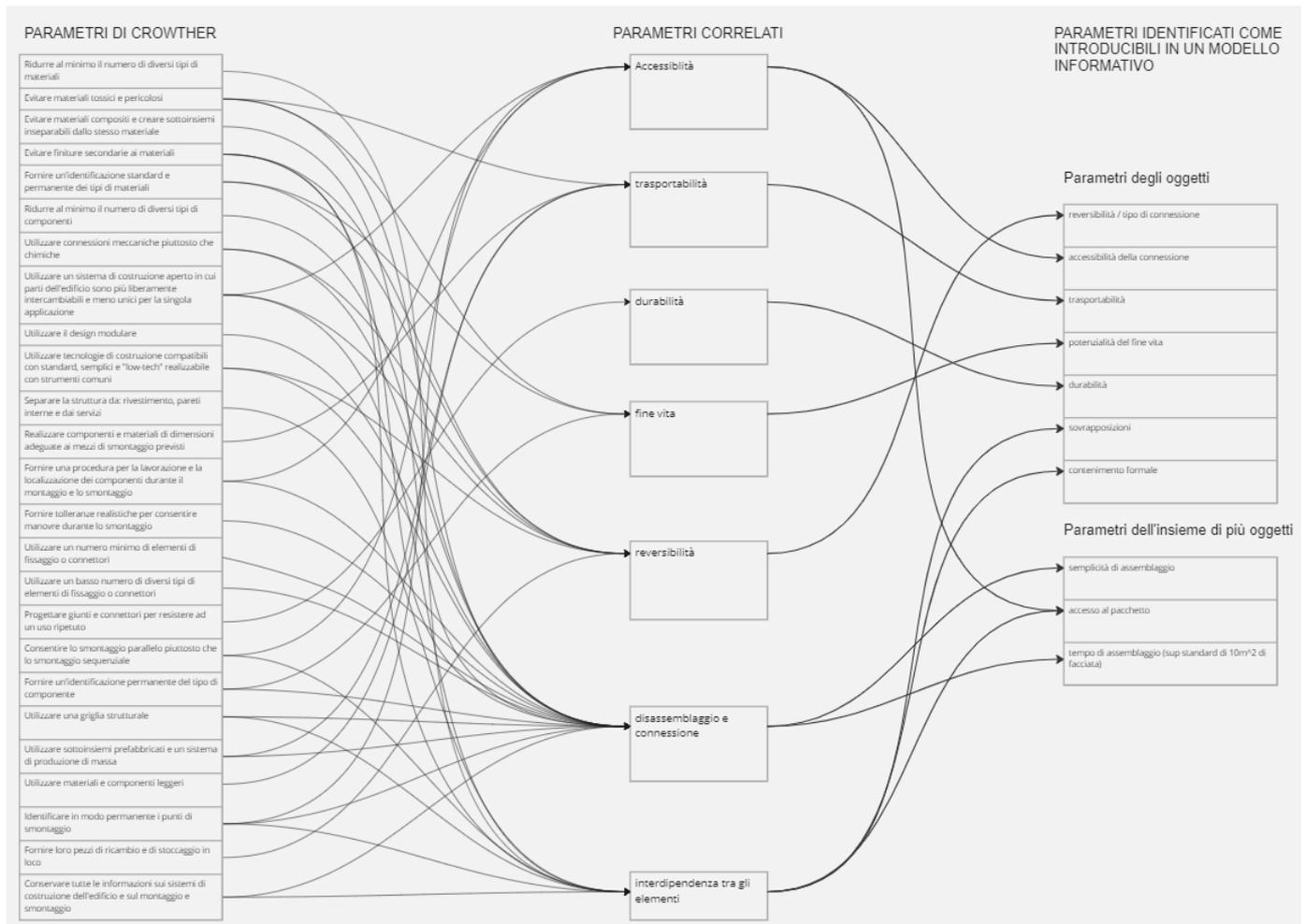


Figura 18 Passaggio schematico dai parametri di Crowther a parametri utilizzabili nel BIM

I principi descritti da Crowther sono troppo numerosi per essere utilizzati al livello pratico e possono essere raccolti in un concetto più ampio. **Nella figura 18 è rappresentato uno schema del ragionamento che si è seguito.** Il ragionamento è stato collegare i principi di Crowther più pertinenti tra di loro in parametri correlati che potessero essere raccolti in un significato più ampio:

- **“accessibilità”**: si intende la possibilità di raggiungere l’elemento nel modo più facile e veloce possibile, senza dover incidere sui componenti della struttura;
- **“trasportabilità”** indica la facilità di manovrare e di posizionare in cantiere l’elemento, con la conseguente comodità di smontarlo e trasportarlo via nel momento in cui si decostruisce;
- **“durabilità”** è il principio perfettamente descritto da Crowther in diversi sui punti. Un elemento che può resistere nel tempo al degrado e all’utilizzo è una condizione necessaria per cui questo possa essere riutilizzato e sfruttato per usi futuri;
- **“fine vita”** racchiude in sé diversi concetti più ampi. Il primo è la tossicità, che deve essere evitata se si vogliono riutilizzare gli elementi senza mettere a rischio la salute di chi lavora. C’è inoltre la necessità di codificare gli elementi in modo permanente, per far sì che questi siano riconoscibili in

fase di smontaggio e poter capire in modo facile la loro provenienza, la loro storia e il modo in cui poterli smaltire;

- **“reversibilità”**, che come la definisce Elma Durmisevic [2] è un processo di trasformazione degli edifici o smantellamento dei suoi sistemi, prodotti e materiali senza causare danni. Edifici reversibili sono visti come strutture che prendono in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita e si concentrano sui loro scenari futuri. Gli aspetti chiave della reversibilità sono: l’indipendenza e scambiabilità, che crea un sistema in cui la trasformazione e il disassemblaggio non si scontrano con altri elementi e non viene danneggiato nessun altri componente;
- **“disassemblaggio e connessione”** È una categoria molto ampia che racchiude all’interno tutto ciò che ha a che fare con gli elementi di connessione, che rappresentano il vero fulcro del ragionamento, in quanto una loro alta accessibilità e smontabilità rende facile il disassemblaggio. Si parla ridurre il tipo di elementi di connessione, di identificare in modo permanente l’elemento e di utilizzare tecnologie semplici e standard;
- **“interdipendenza fra gli elementi”** sta a rappresentare quanto gli elementi sono legati fra di loro e in che modo, così da descrivere in modo accurato il legame che definisce la loro relazione.

**I parametri relazionati al BIM sono suddivisi in due gruppi:** I parametri relativi ai singoli componenti, in quanto è possibile che la modifica di anche uno solo di essi vada a modificare la complessiva valutazione del DfD finale, e in parametri relativi all’insieme di più elementi uniti fra di loro (come insieme di elementi prefabbricati o strettamente correlati per il metodo costruttivo) in quanto alcuni dei parametri sopra descritti hanno senso solo considerando l’insieme di più elementi. Ognuno di questi criteri presenta dei valori da 1 a 0,1 che rappresentano il livello relativo a quel parametro. Se l’oggetto è predisposto correttamente ai concetti del Dfd avrà un valore che si avvicinerà molto ad 1 mentre, più scendiamo, più questo non rispecchierà le caratteristiche che cerchiamo.

Di seguito sono riportati e spiegati i singoli parametri che andremo ad inserire nel software:

- Reversibilità / tipo di connessione

Reversibilità/tipo di connessione	
descrizione	Val.
Reversibile/ a secco	1
A secco con aggiunta di elementi	0,8
Chimica leggera	0,4
Chimica forte/non reversibile	0,1

Tabella 3 Indicazione dei valori

È un criterio fondamentale per il DfD in quanto, la possibilità di smantellare un componente legato semplicemente con una connessione a secco rende il lavoro più semplice, e permette di ricomporlo da un'altra parte, senza dover effettuare riparazioni, modifiche o interventi di alcun tipo. Una connessione

chimica altera in qualsiasi modo l'oggetto sia in modo leggero che ovviamente in modo permanente. Nell'ultimo caso l'elemento non solo non potrebbe più essere riutilizzato ma neanche riciclato.

- Trasportabilità

Trasportabilità	
descrizione	Val.
1 operaio	1
2 o più operai	0,8
Mezzi leggeri	0,4
Mezzi pesanti	0,1

Tabella 4 Indicazione dei valori

Più un oggetto è leggero e piccolo più sarà facilmente trasportabile, questo è un incentivo importante per il disassemblaggio poiché ci saranno meno mezzi pesanti coinvolti nel trasporto e nello smontaggio che rende più economico e fattibile il procedimento. I valori sono indicati in base ai mezzi necessari per lo spostamento del singolo elemento.

- Accesibilità

Accesibilità	
descrizione	Val.
Accessibile liberamente	1
Azioni che non causano danni	0,8
Azioni che causano danni riparabili	0,4
Non accessibile	0,1

Tabella 5 Indicazione dei valori

In questo caso parliamo delle connessioni che compongono gli elementi. Nei vari casi si valuta quanto sia difficile raggiungere la connessione per poter apportare modifiche, riparare o smontare il manufatto. Questo parametro è strettamente collegato con che tipo di connessione si tratta e dove si trova. Se ad esempio fosse legato chimicamente allora sarebbe impossibile non creare danni agli elementi sovrastanti e quindi andrebbe a rendere inutilizzabile non solo l'elemento in questione ma anche gli elementi con cui è collegata.

- Potenzialità del fine vita

<b>Potenzialità del fine vita</b>	
descrizione	Val.
Riuso	1
Riciclo	0,8
Raccolta differenziata	0,4
Discarica	0,1

*Tabella 6 Indicazione dei valori*

In questo caso si valuta che cosa si può fare dell'oggetto una volta che l'edificio viene smantellato. È molto utile per capire quanta porzione di edificio potrà essere riutilizzata seguendo il principio di Dfd e quanta invece potrà essere solamente riciclata. Ci si aspetta da un progetto che la parte di rifiuto che dovrà essere smaltita in discarica sia sempre meno rispetto al passato.

- Conteniamento formale

<b>Conteniamento formale</b>	
descrizione	Val.
Nessuna inclusione	1
Sovrapposizione su un lato	0,8
Chiuso su un lato	0,4
Chiuso su più lati	0,1

*Tabella 7 Indicazione dei valori*

Questo paramentro è riferito a quanto l'elemento sia contenuto da un involucro che lo trattiene e non permette facilmente di poterlo modificare. La Figura 19 mostra le quattro diverse possibilità di contenimento di un oggetto. In alto a destra è rappresentata l'opzione "Aperto, senza inclusioni". In questo caso l'oggetto è libero di muoversi. Nell'angolo in alto a sinistra l'opzione "Sovrapposizione su un lato" per cui l'oggetto è irraggiungibile solo da un lato, mentre l'angolo in basso a sinistra e l'angolo in basso a destra mostrano rispettivamente le due opzioni "Chiuso su un lato" in tutte le direzioni e "Chiuso su più lati". Ovviamente non è riferito solo ad oggetti come quello in figura ma astruendo il concetto possiamo rapportarlo a tutti gli elementi. Nel nostro caso lavorando su elementi di facciata il concetto si applica bene in quanto sono disposti verticalmente e ipoteticamente bloccati in queste sei direzioni.

- Durabilità

Durabilità	
descrizione	Val.
Riutilizzabile in ogni condizione	1
Riutilizzabile se riqualificato	0,8
Difficilmente riutilizzabile	0,4
Non riutilizzabile	0,1

Tabella 8 Indicazione dei valori

È un altro parametro alla base del principio del DfD in quanto se un componente viene a deteriorarsi dopo pochi anni di utilizzo è chiaro che in seguito alla demolizione dell'edificio, l'oggetto in questione non potrebbe più essere riutilizzato ma bensì andrebbe smaltito. Ci sono dei casi in cui è possibile che il componente si degradi ma senza perdere la sua funzione e quindi con del lavoro di manutenzione sarà facile poterlo riutilizzare. La distinzione è stata fatta così che nella possibilità di riusare l'elemento in qualsiasi condizione il punteggio sarà uguale a 1, mentre se è per il singolo utilizzo allora sarà 0.1. i casi intermedi rappresentano la possibilità che un componente debba essere mantenuto per poter essere riutilizzato, che è un'opzione che non si può del tutto scartare.

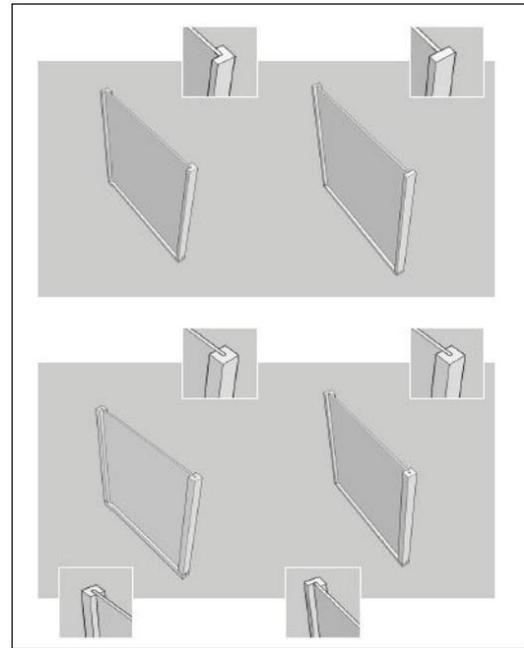


Figura 19 Esempio grafico di un elemento di facciata contenuto

- Interdipendenza fra gli elementi

### Interdipendenza fra gli elementi

descrizione Val.

Zonizzazione modulare	1
Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8
Sovrapposizione tra 1 o più oggetti non pianificata	0,4
Completa integrazione	0,1

Tabella 9 Indicazione dei valori

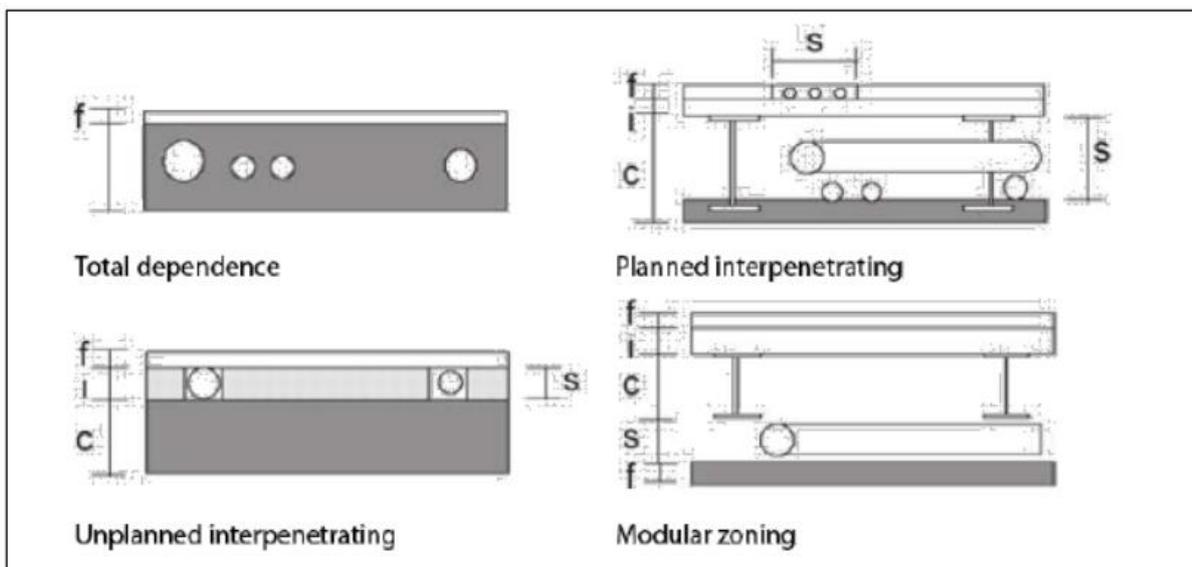


Figura 20 Rappresentazione dei casi di interdipendenza fra gli elementi

Da non confondere con il parametro “contentimento formale”, qui si tratta di capire come il componente è legato agli altri che lo circondano. Di fondamentale importanza è il tipo di connessione a cui si fa riferimento. Sicuramente un oggetto legato chimicamente non avrà un punteggio alto in quanto strettamente correlato. La Figura 20 mostra esempi per una soluzione di pavimentazione: i casi sono di integrazione completa degli oggetti (in alto a sinistra), in cui il punteggio sarà 0.1 in quanto tutti i componenti sono impossibili da riutilizzare. In basso destra il pavimento è realizzato seguendo una zonizzazione modulare degli oggetti, in questo caso i componenti possono essere separati e riutilizzati. Le soluzioni intermedie riguardano la pianificazione di interpenetrazioni. Nel caso sia pianificata allora saranno definite anche le operazioni necessarie per lo di smantellamento e il riutilizzo dei componenti. Nell’esempio, la dipendenza totale è rappresentata da tubi imbevuti di cemento, le due soluzioni intermedie da una separazione parziale di cemento, moquette e tubi , mentre l’opzione di zonizzazione modulare separa completamente tutte le funzioni (isolamento, struttura, tubature, isolamento, isolamento).

I seguenti tre parametri sono riferiti all'insieme di più elementi già connessi, in quanto è utile considerare i parametri al livello complessivo e non del singolo componente. Infatti questi potrebbero essere riutilizzati insieme senza dover essere divisi.

- Semplicità di assemblaggio

<b>Semplicità di assemblaggio</b>	
descrizione	Val.
Via meccanica (un operaio solo)	1
Via meccanica (strumenti sofisticati)	0,8
Via chimica (un operaio solo)	0,4
Via chimica strumenti sofisticati	0,1

Tabella 10 Indicazione dei valori

Dato che siamo passati ai parametri che riguardano l'insieme di più componenti è corretto valutare la semplicità di assemblaggio dell'insieme, andando di nuovo a valutare se per la movimentazione e l'applicazione fossero necessari operai semplici o strumenti più sofisticati. Più la procedura è complessa più aumentano costi e tempistiche. Per il Dfd più è semplice e realizzato da pochi operai meglio è.

- Tempo di assemblaggio

<b>Tempo di assemblaggio</b>	
descrizione	Val.
Meno di un ora	1
Mezza giornata	0,8
Una giornata	0,4
Più di un giorno	0,1

Tabella 11 Indicazione dei valori

Anche se non risulta facile con i mezzi e i dati a disposizione di tutti è fondamentale valutare il tempo di assemblaggio. Questo parametro è forse il più complesso da rendere oggettivo per questo motivo abbiamo considerato il montaggio di una superficie standard di 10 metri quadri, così da poter raccogliere i dati disponibili e rendere il parametro il più veritiero possibile.

- Accessibilità

Accessibilità	
descrizione	Val.
Aperto	1
Sovrapposto su un lato	0,8
Chiuso su un lato	0,4
Chiuso su più lati	0,1

Tabella 12 Indicazione dei valori

L'accesso al pacchetto potrebbe sembrare un parametro ridondante ma non lo è in quanto andiamo a considerare l'insieme di più elementi. Anche qua, tuttavia, sarà fondamentale capire e considerare gli elementi intorno, visto che utilizzeremo gli stessi parametri di giudizio già visti prima per gli elementi singoli.

#### 4.4 METODOLOGIE PREGRESSE PER L'INDIVIDUAZIONE DI UN INDICATORE

Come sottolineato da Cottafava D. nel Report D6.1 *"on benchmarking on circularity and its potentials on the demo sites"* [31] del Progetto Europeo Horizon2020 "DRIVE 0", i metodi studiati per calcolare un indice che possa adeguatamente rappresentare un input di progetto sono stati molti. Tuttavia, a livello Europeo o Internazionale ancora nessuno di questi è entrato in pieno uso. La comunità accademica si è impegnata a proporre e introdurre **Circularity Indicator (CI)**, ossia indicatori di circolarità per valutare l'impatto ambientale, lo sfruttamento di materiali vergini o la produzione di rifiuti non recuperabili. Sono state introdotte nuove metriche per valutare la durata di vita dei prodotti, il potenziale di riutilizzo o l'intensità d'uso.

Nel 2019, Corona B & Al. [32] hanno pubblicato una revisione letteraria proponendo una classificazione basata sulle 3E - Economy, Energy and Environment (Economia, Energia e Ambiente) [33] degli indici, degli indicatori e dei quadri di riferimento CE più riconosciuti. Ogni metodo è stato valutato sulla base di **otto criteri**:

1. Riduzione dell'input di risorse;
2. Riduzione dei livelli di emissione (inquinanti e gas serra);

3. Riduzione delle perdite di materiale/dei rifiuti;
4. Aumento dell'input di risorse rinnovabili e riciclate;
5. Massimizzazione dell'utilità e della durata dei prodotti;
6. Creazione di posti di lavoro locali a tutti i livelli di competenza;
7. Creazione e distribuzione di valore aggiunto;
8. Aumento del benessere sociale.

Dalle analisi condotte da Corona B & Al. si è concluso che nessuno dei metodi analizzati soddisfa tutti i requisiti.

Saidani M. & Al. [34], invece, hanno classificato **55 CI** (attualmente, il più grande database categorizzato e pronto per l'uso di metriche di circolarità) sulla base di 10 criteri:

1. Livelli (micro, meso, macro);
2. Cicli (mantenere, riutilizzare/rifabbricare, riciclare);
3. Prestazioni (intrinseche, impatti);
4. Prospettiva (effettiva, potenziale);
5. Usi (ad esempio: miglioramento, benchmarking, comunicazione);
6. Trasversalità (generica, specifica del settore);
7. Dimensione (singola, multipla);
8. Unità (quantitativa, qualitativa);
9. Formato (ad esempio: strumento web-based, Excel, formule);
10. Fonti (accademici, aziende).

Infine, Parchomenko A & Al. [35] hanno classificato 63 metriche attraverso un'analisi delle corrispondenze multiple (Multiple Correspondence Analyses (**MCA**)) valutando 24 caratteristiche, mappando ogni metrica nella fase del ciclo di vita di un prodotto/servizio. Dal loro lavoro emerge chiaramente che nessuna delle metriche esistenti consente di valutare l'intero ciclo di vita e di prendere in considerazione tutti gli aspetti rilevanti della Circular Economy (CE).

Attualmente, l'indicatore più riconosciuto e adottato a livello mondiale è il Material Circularity Indicators (**MCI**) proposto dalla Ellen MacArthur Foundation (EMF) nel 2015, illustrato nella Figura 21. L'MCI si basa su tre aspetti principali:

1. La quantità di materiale vergine "V";
2. L'utilità del prodotto "X";
3. La quantità di rifiuti non recuperabili "W".

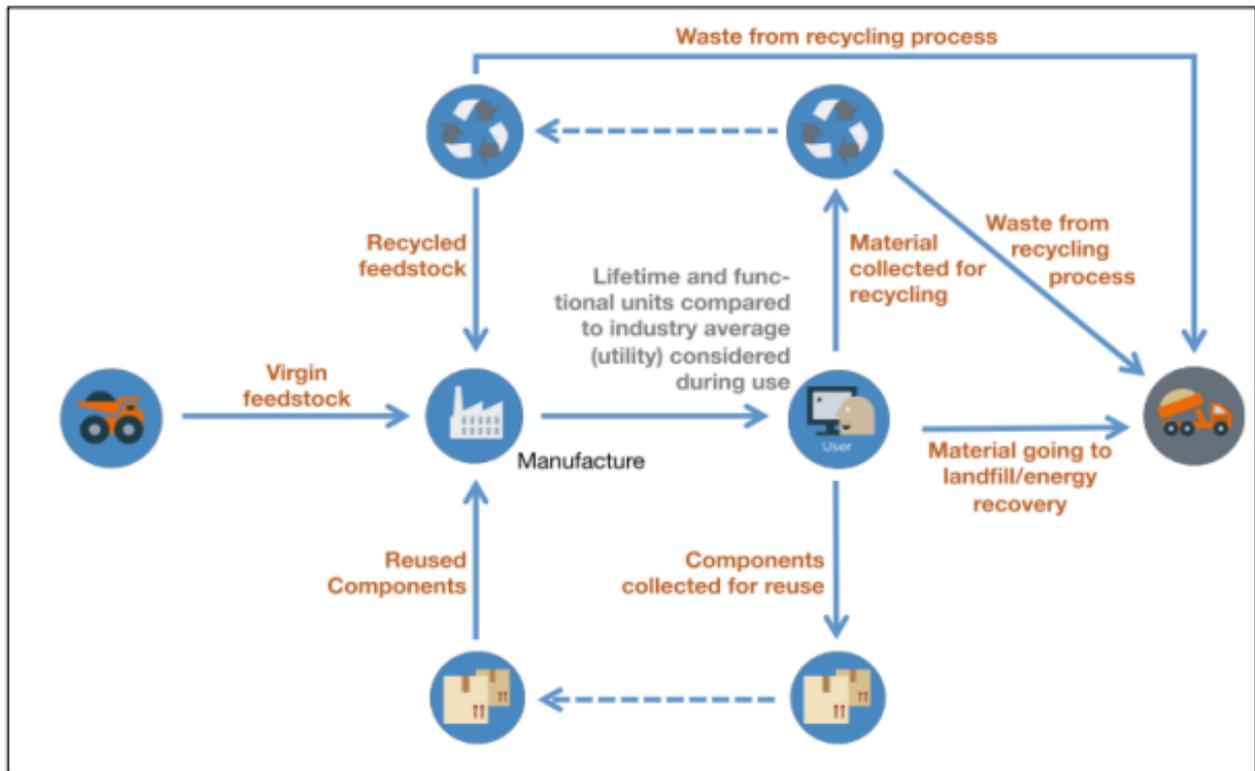


Figura 21 Spiegazione dell'Material Circularity Indicators

Più precisamente, la quantità di materiale vergine "V" è pari alla massa totale del prodotto "M" meno la frazione di materiale riutilizzato "Fu" e la massa riciclata "Fr".

$$V = M (1 - Fr - Fu)$$

L'utilità del prodotto "X" è calcolata moltiplicando il rapporto di durata ( $L/L_{av}$ ), cioè la durata del prodotto rispetto alla durata media di un prodotto simile sul mercato, per il rapporto di intensità ( $U/U_{av}$ ), l'intensità d'uso all'anno rispetto alla media del mercato.

$$X = (L/L_{av})(U/U_{av}),$$

La quantità di rifiuti non recuperabili W è calcolata sommando i rifiuti del flusso lineare W0 e i rifiuti del processo di raccolta WC e del processo di riciclaggio WF.

$$W = W0 + (WF + WC) / 2$$

Infine, l'indice di flusso lineare (LFI) e l'MCI possono essere quantificati come

$$LFI = (V + W) / (2M + (WF - WC) / 2)$$

$$MCI = 1 - LFI * (X / 0,9).$$

Pertanto, l'MCI proposto dall'EMF, come caso di studio per questo rapporto, è un indicatore versatile che tiene conto del materiale vergine sfruttato, dei rifiuti non recuperabili prodotti e delle prestazioni del prodotto.

Un miglioramento dell'MCI, applicato all'ambiente costruito, è il **Building Circularity Indicator (BCI)** proposto da Verberne J. [36]. Il BCI si basa sull'MCI, calcolato per ogni prodotto di un edificio (porte, finestre, piastrelle,

arredi, ecc.), ed è migliorato includendo fattori di progettazione per "pesare" l'impatto di ogni prodotto nella valutazione ambientale dell'intero edificio. Verberne, J. [36] ha ipotizzato alcune precondizioni per la sostenibilità, come la minimizzazione dell'impronta di CO2 e dell'impatto ambientale o la massimizzazione dell'uso di energia rinnovabile e della salute dei materiali.

- in primo luogo, per ogni prodotto all'interno dell'edificio viene quantificato l'MCIp;
- In secondo luogo, ogni MCIp viene ponderato moltiplicandolo per i sette fattori di disassemblaggio identificati (Fi 11) e viene calcolato l'indicatore di circolarità del prodotto (PCIp). Ogni fattore ha un peso compreso tra 0 e 1, dove 0 rappresenta il caso peggiore per il riciclaggio (ad esempio, connessioni chimiche) e 1 il miglior potenziale di riciclaggio (ad esempio, connessioni bullonate).
- In terzo luogo, gli Indicatori di Circolarità del Sistema (SCI) vengono calcolati ponderando il PCIp con la massa di ogni singolo prodotto e, infine, il BCI si ottiene moltiplicando ogni SCI per il Livello di Importanza (Lk). Lk 12 è un fattore di ponderazione tra 0 e 1, basato sui sei livelli di costruzione [13].

Più recentemente, sono stati proposti alcuni **miglioramenti del BCI**. Una terza e una quarta versione sono state discusse da Alba concepts [37] [38]. Alba Concepts ha sviluppato un nuovo BCI **basato su tre livelli**, ovvero un Indice di Circolarità del Prodotto (Product Circularity Indicators (PCI)), un Indice di Circolarità dell'Elemento (Elements Circular Indicators (ECI)) e un Indice di Circolarità dell'Edificio (Building Circularity Indicators (BCI)). Van Schaik ha applicato una leggera modifica dell'indicatore di Alba Concept alle fondamenta degli edifici. La metodologia proposta è illustrata nella Figura 22. Il PCI è calcolato moltiplicando l'Indice del materiale (Material Index (MI)) per un Indice di disassemblaggio (Disassembly Index (DI)), mentre l'ECI è calcolato moltiplicando l'Indice di riutilizzabilità (Reusability Index (RI)) per il DI. Infine, il BCI viene valutato facendo la media di ogni ECI per l'edificio analizzato. Un elemento è definito da Alba Concepts come "un raggruppamento di prodotti che sono indissolubilmente collegati. Quando la connessione è smontabile e il danno rimane limitato, il raggruppamento termina e gli elementi vengono recuperati". In pratica, un elemento può essere identificato quando un raggruppamento di prodotti ha un PCI inferiore a 0,4. Il DI viene valutato seguendo il peso del DfD illustrato nella Figura 22. Diversi altri indicatori si basano sugli stessi presupposti e, con altre formule di ponderazione o fattori inclusi, cercano di valutare gli stessi tre aspetti principali.

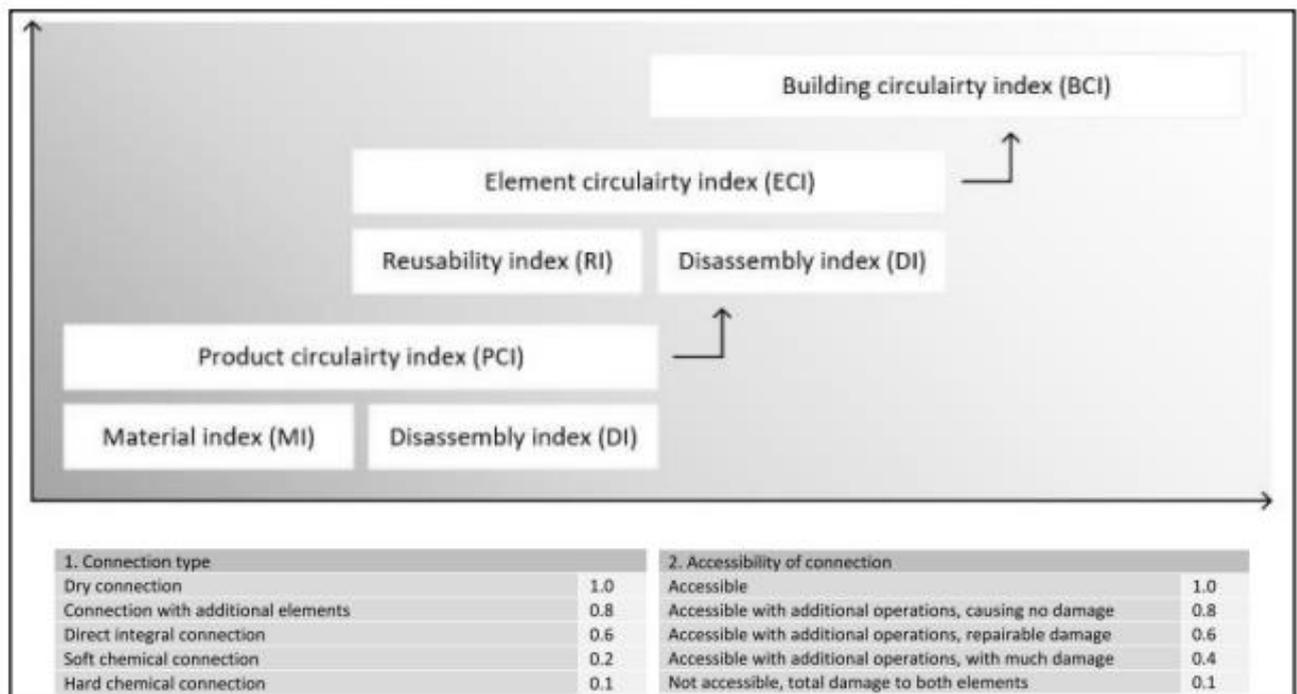


Figura 22 Rappresentazione del Building Circularity Indicator proposta da Alba Concept e adatta da van Schaik

Ad esempio, Niero M. Kalbar, P. P. [39] ha proposto un **Material Reutilization Score (MRS)** per valutare sia la Riciclabilità intrinseca (Intrinsic Recyclability (IR)), cioè la percentuale che può essere riciclata, sia il Contenuto riciclato (Recycled Contained (RC)), cioè la percentuale di materiale già riciclato. Tale dato viene calcolata secondo la formula:

$$MRS = (2 * IR + RC) / 3.$$

J. Y. Park e Chertow R. [40] hanno introdotto il **Resource Potential Indicator (RPI)** per misurare il valore intrinseco di riutilizzo di un materiale tenendo conto dello stato dell'arte delle tecnologie di riciclaggio.

Di Maio F. & Al. [41] hanno proposto il **Value Based Resource Efficiency (VRE)** per valutare la percentuale di valore delle risorse incorporate in un prodotto/servizio che viene restituito dopo la sua vita.

L'indicatore di longevità, proposto da Franklin-Johnson E. [42], misura invece il tempo totale di permanenza di un materiale in un sistema di prodotti/servizi.

In conclusione, **in letteratura esiste una moltitudine di indicatori** volti a valutare diversi aspetti della circolarità. Alcuni indicatori si concentrano solo su una caratteristica precisa, ad esempio la longevità o la durata, l'input o l'output riciclato, e sono stati adottati come indicatori gestionali o come parte dei processi di certificazione dei prodotti/servizi. Altri indicatori cercano invece di includere gli aspetti sociali, economici e ambientali in un unico processo di valutazione. In genere, tali indicatori si basano su un approccio LCA e risentono delle stesse considerazioni fatte per l'analisi LCA, ossia il sistema di ponderazione e la soggettività delle misurazioni. Inoltre, alcuni approcci includono aspetti legati sia al ciclo di vita sia ai criteri di progettazione, come il BCI precedentemente descritto. Non esiste ancora un'unica metodologia standardizzata e gli indicatori esistenti proposti da ricercatori e professionisti sono ancora oggetto di un dibattito aperto, al fine di evidenziare e sottolineare pro e contro. I principali vantaggi di un approccio di valutazione circolare consistono nel prestare maggiore attenzione alla rinnovabilità delle risorse in ingresso, nel concentrarsi maggiormente sulla fase di utilizzo, sulla possibilità di riutilizzare, riparare e rifabbricare i prodotti e nell'introdurre la valutazione della potenziale riciclabilità dei materiali dopo la vita del prodotto. Inoltre, gli IC più comunemente utilizzati necessitano generalmente di **pochi dati di input e risultano essere**

**abbastanza facili da calcolare.** Tuttavia, potrebbero tali indicatori essere criticati per la mancanza di un approccio scientifico e rigoroso, dal momento che molti di essi si basano semplicemente sul peso materiale delle parti di prodotto riciclate/riciclabili o sulla rinnovabilità/non rinnovabilità delle risorse in ingresso, senza tenere conto del reale impatto ambientale per la produzione di materiali rinnovabili, EE o ECO<sub>2</sub> e così via.

#### 4.4.1 Criteri di progettazione e prestazioni ambientali dei prodotti

La previsione dei materiali recuperabili utilizzati nell'ambiente costruito, come già evidenziato in precedenza, è di fondamentale importanza per progettare, mantenere e ristrutturare o demolire edifici con un approccio circolare. La quantità di rifiuti dovuti alla demolizione degli edifici negli ultimi decenni ha generato la metà del flusso globale di rifiuti.

Dorsthorst T. e Kowalczyk B. [43] hanno stimato che **meno dell'1% degli edifici esistenti può essere completamente smontato.** Solo di recente, negli ultimi decenni, ricercatori e professionisti hanno iniziato a concentrarsi sui criteri di progettazione e sulle linee guida per migliorare la smontabilità dei componenti e dei prodotti edilizi. In effetti, durante la fase di progettazione di un prodotto, di un servizio o di un edificio, più del 70% dell'impatto ambientale può essere determinato e, di conseguenza, prevenuto e minimizzato. I criteri di progettazione sono particolarmente importanti per l'ambiente costruito, perché un edificio è un "oggetto" complesso, composto da diversi strati e con una durata di vita differente. Per esempio, rispetto ai sei strati di Brand, è fondamentale progettare per la flessibilità (Design for Flexibility (DfF)), per l'adattabilità (Design for Adaptability (DfA)), per il disassemblaggio (DfD) o per il riutilizzo/riciclo (Design for Reuse/Recycle (DfR)), al fine di sostituire singoli componenti, prodotti o materiali senza influenzare le altre parti e gli altri strati. In generale, il Design for ... può essere descritto come "una combinazione di strategie di progettazione ecologica, tra cui la progettazione per l'ambiente e la progettazione per la rigenerazione, che porta ad altre strategie di progettazione come quella per l'aggiornamento, per l'assemblaggio, per il disassemblaggio, per la modularità, per la manutenibilità e per l'affidabilità" [44]. A causa della grande quantità di aspetti da tenere in considerazione in un processo di recupero/disassemblaggio, non esiste ancora un protocollo standardizzato o standard riconosciuti a livello globale. Molti ricercatori hanno cercato di proporre linee guida, metodologie e criteri nel primo decennio del 2000.

Ad esempio, Akinade O.O. & Al. [18] hanno identificato **15 diversi fattori per la DfD** grazie a un'accurata revisione della letteratura. Hanno aggregato i 15 fattori principali in tre gruppi principali che spaziano dagli aspetti ambientali a quelli sociali. Inoltre, hanno identificato **38 fattori critici** per il DfD, attraverso lo studio di esperti, raggruppati in 5 categorie:

1. Legislazione e politiche rigorose;
2. Processo di progettazione della decostruzione e competenze;
3. Progettazione per il recupero dei materiali;
4. Progettazione per il riutilizzo dei materiali;
5. Progettazione per la flessibilità dell'edificio.

Alla fine degli anni '90 il Programma Ambientale delle Nazioni Unite (UNEP) ha invece proposto otto strategie generali di eco-design per ridurre al minimo l'impatto ambientale dei prodotti.

Russell P. e Moffat S. [45] hanno introdotto otto principi della **DfA**:

1. Durevolezza;

2. Versatilità;
3. Accesso ai servizi;
4. Ridondanza;
5. Semplicità;
6. Aggiornabilità;
7. Indipendenza;
8. Informazioni sull'edificio.

Nel 2016 [46] Geraedts R. ha proposto una metodologia di valutazione circolare degli edifici basata sulla DfA, chiamata **FLEXI**. La sua metodologia consiste nel calcolare un punteggio di adattabilità, moltiplicando due criteri: un peso  $F_i$  (mostrato nella Figura), e un valore di valutazione  $V_i$ , per ogni strato e sottolivello di un edificio. Il  $V_i$  consiste in un peso compreso tra 1 e 4 attribuito da un consulente/esperto, dove 1 rappresenta una bassa capacità di adattamento e 4 un'alta capacità di adattamento.

Layer	Sub-layer		Performance indicator	Weighting		
1	Site	1	Expandable site/location	1		
2	Structure	Measurements	2	Surplus of building space/floor space	4	
			3	Surplus of free floor height	4	
		Access	4	Access to building	2	
3	Skin	Façade	Construction	5	Positioning obstacles/columns in load	3
			6	Façade windows to be opened	1	
			7	Daylight facilities	2	
4	Services	Measure & Control	8	Customisability/controllability	3	
			9	Surplus of facilities shafts and ducts	4	
		Dimensions	10	Modularity of facilities	2	
5	Space	Functional	11	Distinction between support – infill	4	
		Access	12	Horizontal access to building	3	

Figura 23 Peso  $F_i$  per la metodologia FLEXI

Negli ultimi anni, per far progredire i principi generali di progettazione, molti ricercatori hanno studiato in modo più approfondito le specifiche e gli **indicatori chiave di prestazione** (Key Performance Indicators (KPIs)) per valutare il potenziale di disassemblaggio di un prodotto. Al fine di misurare e quantificare gli aspetti e le caratteristiche progettuali dei prodotti, gli **indicatori di prestazione ambientale dei prodotti** (Environmental Product Performance Indicators (EPIs)) rappresentano un utile kit di strumenti per i responsabili delle decisioni e gli operatori del settore. A seconda dell'obiettivo, gli EPI mirano a misurare le caratteristiche macro, meso o micro di un prodotto. Gli EPI macro possono essere confrontati con i più semplici Indicatori di circolarità o con i risultati di un'analisi LCA parziale, quantificando gli aspetti ambientali, la quantità di rifiuti o le perdite di energia. A livello meso, valutano aspetti come le parti riciclabili/riutilizzabili (senza indicazioni su come riconoscerle), mentre a livello micro misurano caratteristiche come il tempo di disassemblaggio, il tipo di connessioni o il numero di materiali composti. Le macro EPI sono strumenti utili per i manager; sono un sottoinsieme dei risultati di CI e LCA precedentemente discussi. I Meso e Micro EPI, invece, sono fondamentali per valutare con precisione il potenziale di riciclo, riutilizzo o ri-fabbricazione di un prodotto e, insieme ai CI, consentono di condurre con successo ispezione di recupero per gli edifici.

Per quanto riguarda i micro-aspetti, ad esempio, Durmisevic E. [47] ha definito i pesi da utilizzare per i sette principali criteri del DfD, come riportato nella tabella alla pagina seguente. I pesi possono essere ottenuti rispondendo ad alcune domande abbastanza generali sugli aspetti progettuali.

<b>Functional separation</b>	separation of functions	1.0
	integration of function with same lifecycle into one element	0.6
	integration of function with different lifecycle into one element	0.1
<b>Functional dependence</b>	modular zoning	1.0
	planned interpenetrating for different solutions (overcapacity)	0.8
	planned for one solution	0.4
	unplanned interpenetrating	0.2
	total dependence	0.1
<b>Technical life cycle / coordination</b>	long (1) / long (2) or short (1) / short (2) or long (1) / short (2)	1.0
	medium (1) / long (2)	0.5
	short (1) / medium (2)	0.3
	short (1) / long (2)	0.1
<b>Geometry of product edge</b>	open linear	1.0
	symmetrical overlapping	0.8
	overlapping on one side	0.7
	unsymmetrical overlapping	0.4
	insert on one side	0.2
	insert on two sides	0.1
<b>Standardisation of product edge</b>	pre-made geometry	1.0
	half standardised geometry	0.5
	geometry made on the construction site	0.1
<b>Type of connections</b>	accessory external connection or connection system	1.0
	direct connection with additional fixing devices	0.8
	direct integral connection with inserts (pin)	0.6
	direct integral connection	0.5
	accessory internal connection	0.4
	filled soft chemical connection	0.2
	filled hard chemical connection	0.1
	direct chemical connection	0.1
<b>Accessibility to fixings and intermediary</b>	accessible	1.0
	accessible with additional operation with causes no damage	0.8
	accessible with additional operation which is reparable damage	0.6
	accessible with additional operation which causes damage	0.4
	not accessible – total damage of bought elements	0.1

Figura 24 Pesi da utilizzare per i 7 principali criteri di Dfd

Issa, I. I. et Al. [48], invece, nel 2015, hanno fornito un'accurata banca dati open access di oltre 250 EPI (macro, meso e micro) classificandoli rispetto alla fase del ciclo di vita - prefabbricazione, produzione e progettazione, distribuzione e imballaggio, uso e manutenzione, fine vita, attività generali - e rispetto agli aspetti ambientali - materiali, energia, rifiuti solidi, acque reflue, emissioni gassose, perdita di energia.

Anche se non è possibile avere una stima perfetta di quali materiali saranno riutilizzati o riciclati dal punto di vista della progettazione, si possono estrarre informazioni degne di nota. Indicatori come il tempo di disassemblaggio possono fornire un suggerimento sulla convenienza del processo in termini economici (ad esempio, il salario dei lavoratori), mentre i materiali intelligenti hanno delle caratteristiche tali da essere reversibili per cambiamenti fisici o chimici. L'uso di polimeri e metalli intelligenti, ad esempio, è

fondamentale per ridurre i costi e i tempi di disassemblaggio. Se l'uso di alcuni degli EPI esistenti è una pratica ottimale e semplice per un designer o un architetto durante la fase di progettazione di un prodotto o di un edificio, **lo stesso non è più valido per gli edifici esistenti a causa della mancanza di informazioni**. Si possono applicare approcci più "soggettivi" per valutare la fattibilità dello smontaggio di un componente durante un'ispezione di recupero.

Ad esempio, Kroll E. & Al. [49] hanno proposto un semplice foglio di calcolo per valutare la facilità di smontaggio. I progettisti devono valutare con una valutazione soggettiva, cioè con un punteggio da 1 (facile) a 4 (difficile), alcuni aspetti progettuali, come l'accessibilità, la posizione, la forza, il tempo e le caratteristiche speciali di ciascun componente di un prodotto. La somma di tutti i punteggi rappresenta la facilità di smontaggio, dove un punteggio più basso significa un compito più facile, mentre un punteggio più alto evidenzia le difficoltà di smontaggio.

Un approccio simile è stato adottato da Eagan J. and Yarwood P. [50] che hanno adattato la Product Design Matrix di Graedel, utilizzata per l'ecologia industriale, per valutare l'impatto ambientale di un prodotto durante la fase di progettazione.

In conclusione, esiste una quantità significativa di metodologie di progettazione e di EPI per valutare quasi ogni singolo aspetto ambientale o progettuale di un prodotto o di un componente. Questa grande quantità di strumenti e il fatto che gli audit di bonifica dipendono ancora dallo sfondo e dalle conoscenze dell'esperto che conduce a verificare la correttezza dei dati, contribuiscono alla sfida di avere uno standard unico valido in molti casi. In generale, i principali vantaggi degli EPI e dei criteri di progettazione per il benchmarking e la valutazione della circolarità sono legati ai livelli micro o meso. Molti EPI sono focalizzati sul livello dei componenti e sono stati creati per i professionisti, garantendo così una rapida adozione e facilità di calcolo. Tuttavia, **emergono alcuni limiti**: in generale, essi **dipendono da una valutazione soggettiva** e il risultato di una valutazione varia da caso a caso non trovando una strada univoca per definirlo. Gli EPI di meso-livello mancano di indicazioni sul disassemblaggio, ma possono essere utilizzati per quantificare i componenti riutilizzabili e riciclabili, mentre gli EPI di micro-livello possono fornire informazioni utili sul processo di disassemblaggio, ma una relazione solida tra la fattibilità del disassemblaggio dovuta a un singolo aspetto (ad esempio, il tempo di disassemblaggio) e l'effettiva riciclabilità è una sfida e un compito difficile da dimostrare. In conclusione, gli EPI di micro-livello e i criteri di progettazione ben specifici possono essere adottati come strumento di valutazione complementare durante una valutazione dei dati per il recupero, mentre il meso-livello può fornire uno strumento efficace durante la fase di ristrutturazione/demolizione del ciclo di vita di un edificio.

#### 4.4.2 Ulteriore miglioramento della valutazione della circolarità

Per **far progredire ulteriormente lo stato dell'arte nell'ambito delle** valutazioni ambientali degli edifici e della circolarità, è stato proposto un ulteriore sviluppo degli approcci precedenti da Dario Cottafava, Michiel Ritzen e John Van Oorschot [31]. In particolare, per superare alcune delle principali limitazioni di ciascuna metodologia, è stato adottato un approccio di valutazione congiunto tra i livelli macro, meso e micro.

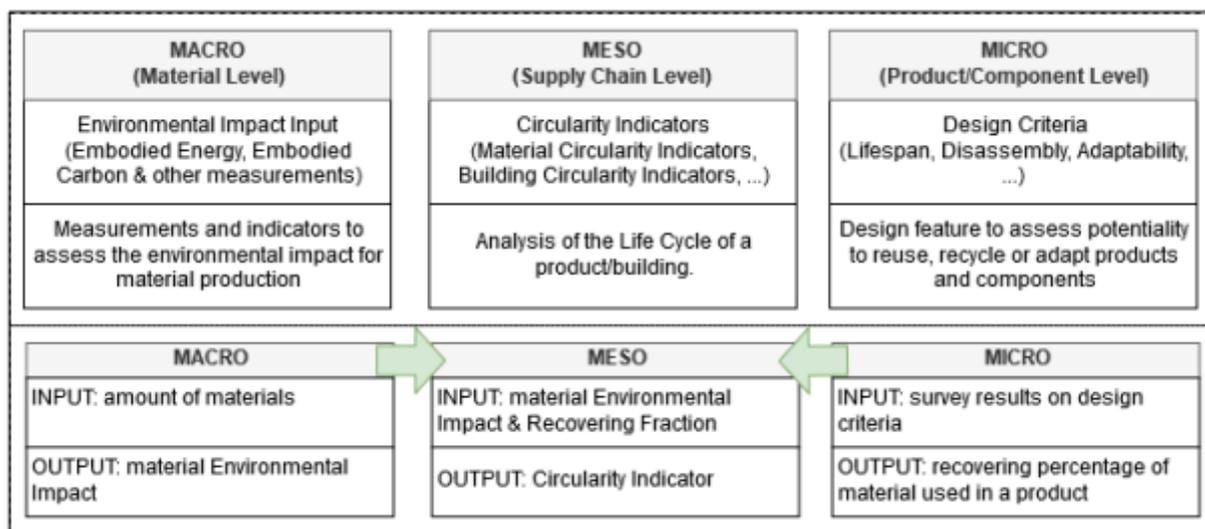


Figura 25 Rappresentazione generale della convergenza tra gli approcci Macro Meso e Micro per una stima della circolarità

La Figura 25 mostra schematicamente l'approccio adottato. Il livello macro, cioè il livello del materiale, e il livello micro, cioè il livello del prodotto/componente, fungono da input per il livello meso, cioè il livello della catena di fornitura. Il livello del materiale fornisce l'impatto ambientale, in termini di EE ed  $CO_2$ , per esempio dei materiali utilizzati, mentre il livello prodotto/componente fornisce informazioni sulla frazione potenziale che può essere recuperata/riutilizzata/riciclata all'interno di un prodotto. Queste informazioni alimentano il livello della catena di fornitura, come dati di input, al fine di calcolare un indicatore di circolarità per il benchmarking. Questo approccio generale potrebbe aiutare a superare:

- 1) a livello meso, la mancanza di una rigorosa valutazione dell'impatto ambientale in molte IC. In altre parole, la valutazione dell'EE, invece del puro peso o della massa, di un materiale fornisce una valutazione più rigorosa e precisa.
- 2) a livello micro, la mancanza di una solida relazione tra gli impatti ambientali e i criteri di progettazione previsti dalle linee guida DfD o dagli strumenti di gestione delle prestazioni ambientali dei prodotti.
- 3) a livello macro, la mancanza di "oggettività" nella decisione di quali parti di un prodotto possano essere realmente riciclate o riutilizzate.

Infatti, come discusso nelle sezioni precedenti, attualmente, in una ispezione di riqualificazione, la percentuale di materiali potenzialmente riutilizzabili identificati in un edificio varia da meno del 10% fino al 70% a seconda di chi conduce la verifica. L'approccio proposto può essere più facilmente compreso osservando la generalizzazione dell'MCI del EMF, illustrata nella Figura 26.

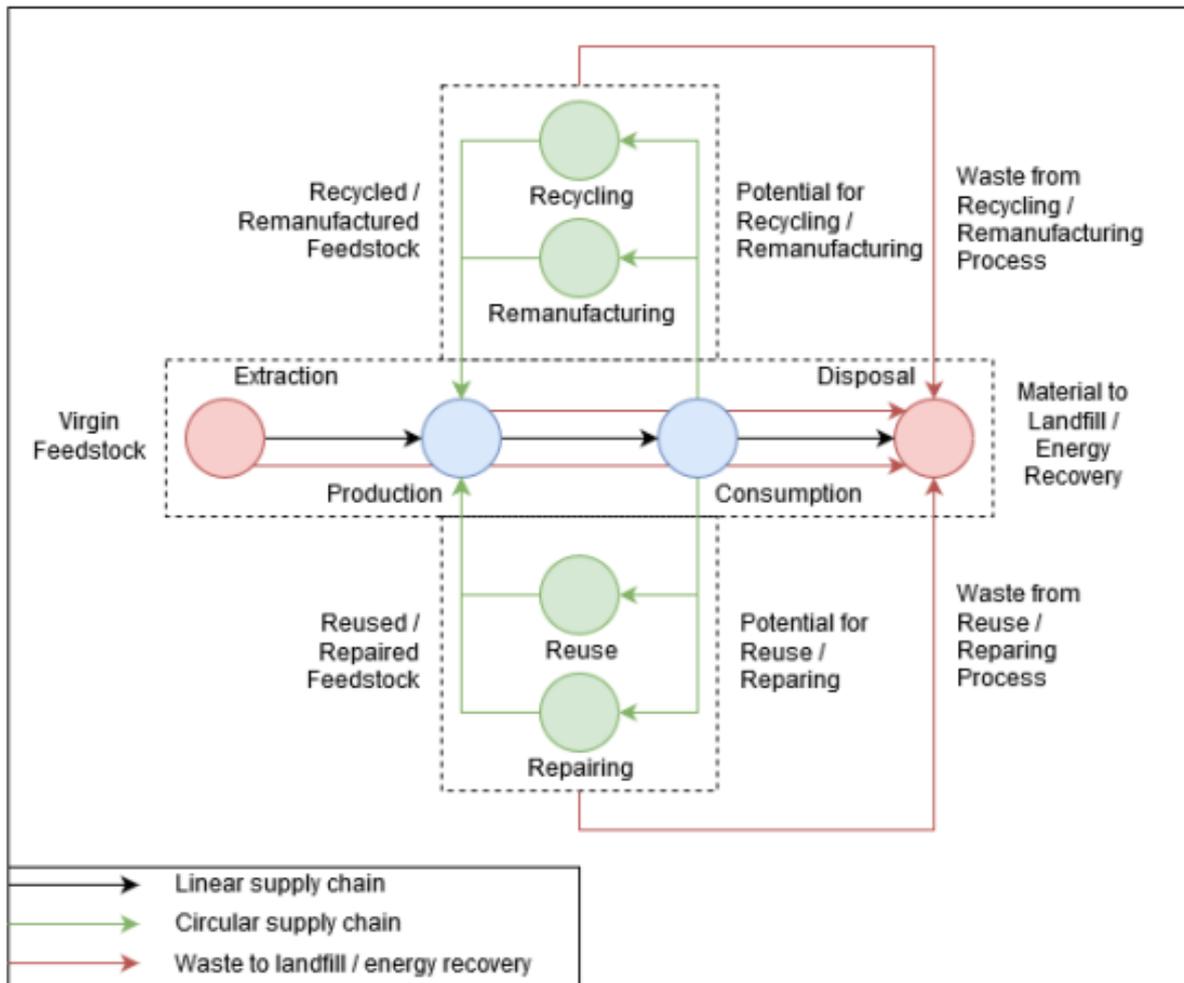


Figura 26 Generalizzazione del Material Circularity Indicators proposto dalla Hellen McArthur Foundation

In particolare, dall'analisi dell'MCI emergono due principali lacune e limitazioni nella valutazione dell'indicatore di circolarità della FEM:

1. Come valutare l'impatto ambientale della materia prima vergine e del materiale da smaltire in discarica con il relativo recupero energetico che ne deriva evitando un'analisi LCA completa?
2. Come quantificare il potenziale di riciclo/riproduzione/riutilizzo/riparazione evitando, o riducendo, la valutazione "soggettiva" durante un'ispezione di recupero?

La prima lacuna potrebbe essere superata, come anticipato, introducendo misure più rigorose, come ad esempio la valutazione dell'EE anziché della massa dei materiali, durante il calcolo dell'MCI; la seconda questione, invece, potrebbe essere risolta introducendo precisi criteri di progettazione da valutare durante un audit di recupero, al fine di avere una misurazione più "oggettiva" dei materiali recuperabili.

## 5 APPLICAZIONE DEL CASO STUDIO

---

Per andare a validare il metodo proposto e ottenere dati di output che siano realistici e riapplicabili, sono stati utilizzati i parametri sopra descritti per analizzare alcuni sistemi di facciata applicati al complesso signorile inserita nel complesso edilizio della Corte Palazzo ad Argelato, selezionata come caso pilota italiano nell'ambito del progetto "DRIVE 0: Driving decarbonization of the EU building stock by enhancing a consumer-centred and locally based circular renovation process".

Come descritto da Cecilia Mazzoli et Al. [5] nel progetto DRIVE0, sono stati selezionati 8 casi studio che sono stati analizzati dal punto di vista della circolarità e riqualificati dal punto di vista energetico e architettonico. Gli edifici sono collocati in diversi paesi europei, al fine di confrontare diversi contesti climatici, economici e legislativi, evidenziandone barriere e opportunità di attuazione di strategie circolari. Le nazioni selezionate sono: Olanda, Estonia, Slovenia, Irlanda, Spagna, Grecia, e Italia.

**Il caso italiano** consiste in una villa compresa in un complesso storico che si trova ad Argelato, in Provincia di Bologna. L'edificio appartiene alla fondazione privata Carisbo. Il complesso è stato costruito agli inizi del 1900 e parzialmente demolito e ricostruito negli anni. Sono inclusi una villa signorile, uno stabile/fienile e un piccolo ricovero per animali. Nel 2019, quando la fondazione ha deciso di intraprendere un profondo processo per la riabilitazione dell'area, il complesso era pesantemente compromesso e danneggiato in termini di sicurezza sismica, qualità architettonica e conservativa. Le performance energetiche e meccaniche erano pessime. Infatti, il complesso residenziale era stato abbandonato per molto tempo, ed era necessario un profondo rinnovamento per adattare gli spazi a nuove e coerenti funzioni, oltre che renderlo di nuovo abitabile e confortevole. All'interno del complesso, l'edificio più adatto per l'applicazione delle strategie di DRIVE0 è la villa padronale, grazie alle dimensioni (intorno ai 500 m<sup>2</sup>), le sue caratteristiche costruttive e il suo stato di decadimento. La villa è stata costruita intorno al 1900 e consiste in un edificio in muratura portante di mattoni pieni. Una breve descrizione dei componenti dell'edificio è riportata di seguito per sottolineare lo stato attuale in termini di qualità, elementi costruttivi, condizione di conservazione, sottolineando anche l'alta sismicità del territorio italiano.

La fondazione è composta di una struttura portante in mattoni pieni legati dalla malta, presentano uno spessore di 50 cm e una profondità di 40 cm. L'analisi diagnostica sviluppata ha mostrato che la conservazione delle fondazioni e le sue dimensioni non sono neanche adeguate alla stabilità dell'edificio allo stato attuale: per cui è necessario integrare la fondazione con materiali compatibili con il mattone, per incrementare le dimensioni e le performance meccaniche. I muri esterni sono costituiti di muratura portante in mattoni solidi uniti con malta (due livelli di mattoni con 29 cm di spessore), rifiniti esternamente con uno strato di malta a base di limo e uno strato di pittura per ricoprire. Internamente invece lo strato è composto da un calce di gesso. Le analisi meccaniche hanno mostrato che i muri esterni non sono adeguati alla sicurezza dell'edificio allo stato attuale, per cui è necessario integrarli con materiali compatibili ai mattoni pieni per accrescere la loro dimensione e le performance meccaniche. Oltretutto l'aggiunta di uno strato isolante esterno è necessaria per aumentare le performance meccaniche in termini di trasmittanza. Gli stessi interventi di integrazione devono essere anche implementati per le partizioni interne. L'edificio è vincolato e il RUE di Argelato non ha permesso di intervenire più di tanto sull'edificio.

Come detto in precedenza, gli edifici sono sottoposti a un vincolo storico-documentale e la normativa vigente al momento della presentazione del progetto (Regolamento Urbanistico Edilizio, RUE - Comune di Argelato, Bologna) [51] non consentiva la realizzazione di interventi significativi sulle facciate. Le modifiche progettate e realizzate in facciata sono state eseguite seguendo i principi di circolarità di DRIVE 0 ma, naturalmente, le condizioni particolarmente compromesse dell'edificio storico e le barriere legislative che hanno limitato le scelte progettuali, impedendo di raggiungere il più elevato grado di circolarità che era stato originariamente ipotizzato. Questo è un tema molto importante in quanto, non sempre la teoria trova diretto riscontro con

la realtà, che spesso si dimostra più complessa e articolata. **L'applicazione di strategie e sistemi tecnologici circolari innovativi al patrimonio edilizio esistente, sottoposti a vincoli legislativi, rappresenta una grande sfida.**

È stato interessante analizzare due tipologie di rivestimento murario per l'isolamento esterno. I materiali isolanti sono differenti, così come le tipologie costruttive. Questo ci ha permesso di **confrontare i due casi** e avere dei risultati diversi da analizzare. Nello specifico, sono stati analizzati due diversi sistemi costruttivi di efficientamento energetico dell'involucro edilizio, basati sull'utilizzo di materiali diversi:

- **Soluzione ALIVA DEMO:** le pareti esposte a Nord e a Ovest sono state isolate grazie all'installazione di un'innovativa tecnologia (non ancora brevettata durante la scrittura della seguente tesi) per la facciata realizzata dall'azienda ALIVA. Tale sistema prevede la combinazione di un pannello prefabbricato composto da lana di roccia (spessore di 12 cm), accoppiato ad un pacchetto sandwich realizzato in lana di vetro (spessore di 8 cm) tenuto insieme da due laminati in acciaio di circa 1 mm. Per donare resistenza meccanica al pacchetto troviamo all'esterno pannello di fibrocemento (di tipo Aquapanel). Lo spessore totale del sistema è di 20 cm.



*Figura 27 Fotografie scattate in cantiere durante l'applicazione del pannello ALIVA DEMO in cantiere dalla Prof.ssa C. Mazzoli*

- **Soluzione ETICS:** le pareti orientate a Sud e a Est sono state rivestite da un più tradizionale sistema a cappotto, ossia External Thermal Insulation Composite System (ETICS), composto da pannelli isolanti di polistirene espanso (EPS), per uno spessore totale di 20 cm, pari a quello del sistema ALIVA usato per le altre due facciate.

Le analisi riguardanti il livello di circolarità secondo il metodo proposto sono state svolte considerando esclusivamente lo strato aggiuntivo per l'efficientamento dell'involucro, trascurando lo strato del pacchetto murario esistente. Non è stata considerata quindi la finitura interna e la struttura portante (di spessore pari a 29 cm) che peraltro, essendo costituito da un sistema costruttivo "a umido" in muratura a due teste,

avrebbe apportato una riduzione uniforme del livello di circolarità sugli indici ottenuti per tutte le soluzioni costruttive.

Essendo il pannello ALIVA DEMO prefabbricato e applicato esclusivamente con connessioni meccaniche a secco, senza l'utilizzo di colle, ci si attende che le analisi forniscano un indice di circolarità superiore per questa soluzione rispetto a quella del tradizionale ETICS, applicato mediante l'utilizzo di malta adesiva.

## 5.1 IL PROCESSO SU REVIT (I PARAMETRI, LE FAMIGLIE, I SINGOLI ELEMENTI)

Fino a questo momento siamo rimasti fuori dal Software che si è utilizzato per lo studio da effettuare. Come anticipato precedentemente la relazione tra Bim e Dfd rimane tutt'oggi complicata.

1. Per prima cosa sono stati realizzati i singoli **elementi costruttivi delle soluzioni analizzate**. Ci troviamo quindi con una serie di "Famiglie" di Revit del tipo "Generic Model". Le "Famiglie" sono delle raccolte di tutti gli oggetti e gli elementi che si possono inserire in un progetto, con attributi informativi e relazioni specifiche. La varietà di queste raccolte permette a Revit di essere performante e adattabile a diversi ambiti della progettazione. Questo tipo di file permette di avere grande libertà, infatti non siamo vincolati in nessun modo a schemi preimpostati dal software. Sono famiglie parametriche in cui possono essere inseriti i parametri di tipo dimensionali o semplicemente informativi. Il processo seguito è figlio di una modalità di gestione dei dati propria dell'ambiente BIM, che si riporta di seguito per completezza e replicabilità. Selezionando l'oggetto, andando nel tool "Create" e cliccando sull'icona "Family types" si apre la schermata che si vede in figura 29:

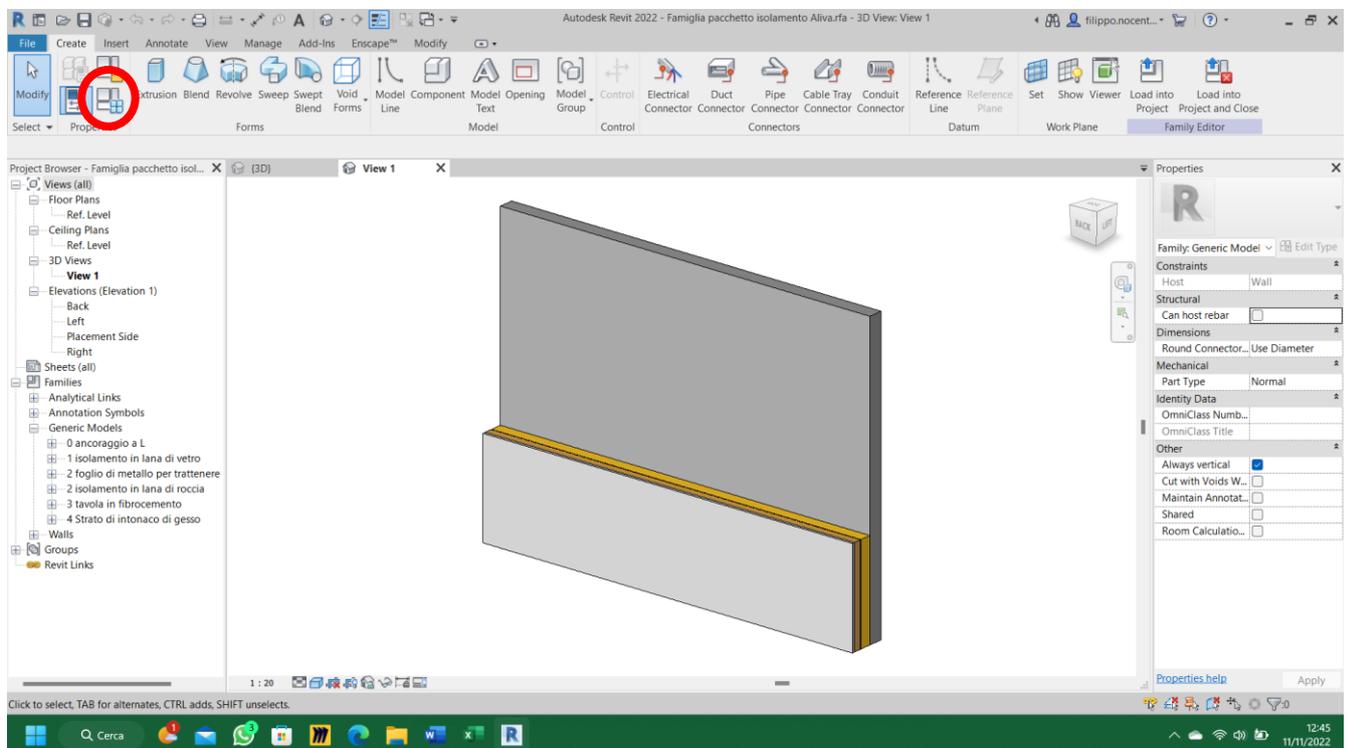


Figura 28 Visualizzazione generica di una "Famiglia" su Revit

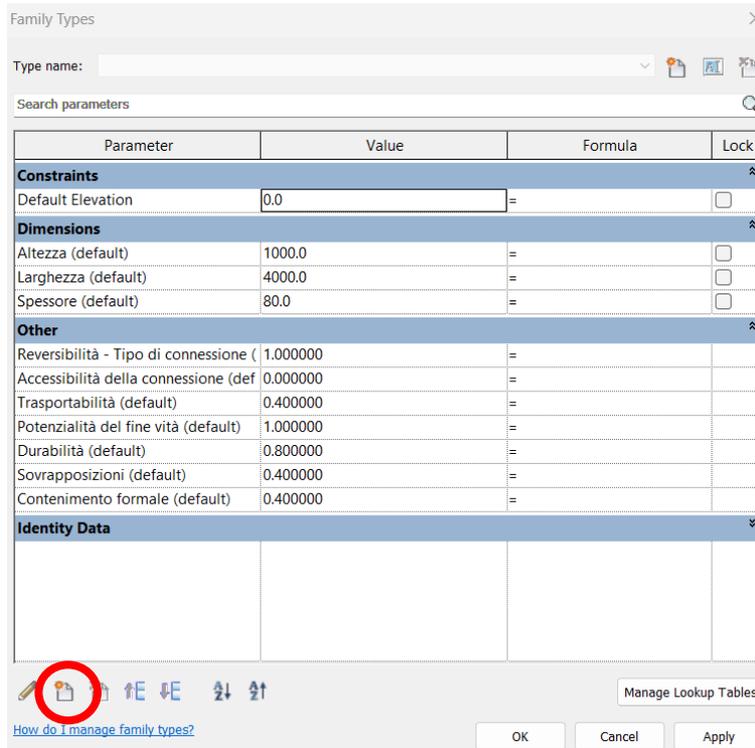


Figura 29 Tabella impostata da Revit in cui vengono indicati i parametri per l'elemento selezionato

Per aggiungere un parametro su Revit è necessario selezionare l'icona "New Parameter" (indicato con il cerchio rosso nella figura 29) da cui si apre la seguente finestra:

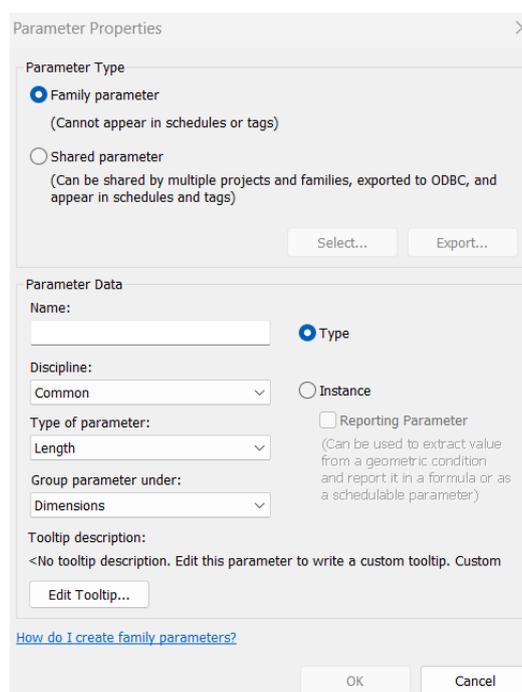


Figura 30 Dalla seguente schermata è possibile creare il parametro

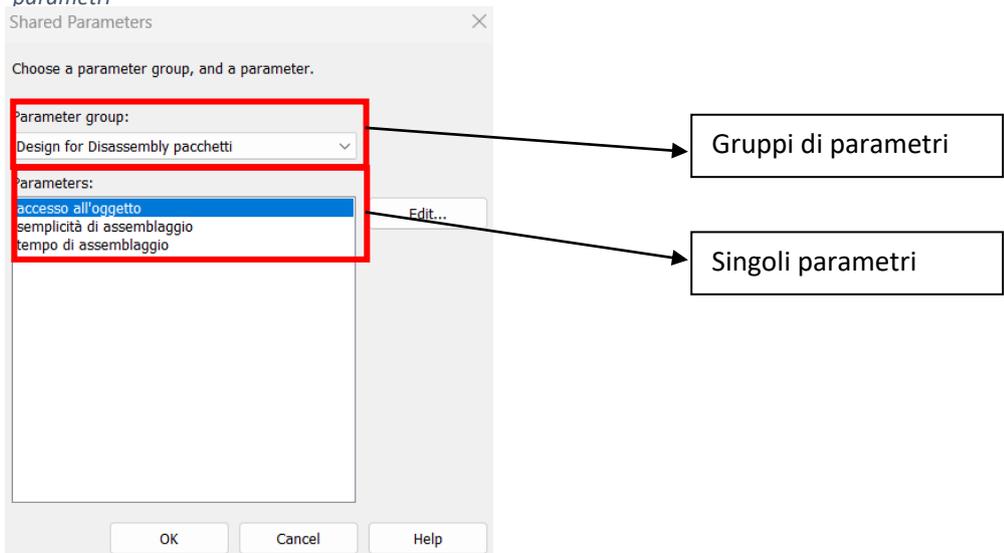
I parametri in questione sono “**parametri condivisi**” utilizzabili solamente per le “famiglie caricabili” come quelle con cui abbiamo a che fare. Considerata la finalità di rendere l'archivio dei dati interoperabile, vale a dire disponibile nel tempo anche per software pertinenti a discipline diverse, con questo strumento i dati vengono esportati in un file con estensione “txt”. È quindi possibile salvare questa estensione, che il programma legge, per cui i parametri possono essere condivisi e riutilizzati in qualsiasi progetto. All’interno del “txt” le informazioni sono presenti sotto forma di codice, è infatti importante non modificare i parametri nella casella di testo, ma farlo solamente una volta esportato in Revit. Aprendo l’estensione “txt” ci si trova di fronte alla seguente schermata:

```
# This is a Revit shared parameter file.
# Do not edit manually.
*META VERSION      MINVERSION
META 2            1
*GROUP            ID      NAME
GROUP 1           Design for Disassembly singoli oggetti
GROUP 2           Design for Disassembly pacchetti
GROUP 3           Parametri Fibrocemento
GROUP 4           Parametri lana di vetro
GROUP 5           Parametri lana di roccia
GROUP 6           parametri intonaco di gesso
GROUP 7           parametri finitura esterna
GROUP 8           Parametri foglio di metallo
GROUP 9           Parametri rete fibra di vetro
GROUP 10          Parametri EPS
GROUP 11          Parametri tassello di plastica
GROUP 12          Parametri vite metallica
GROUP 13          Parametri strato adesivo di cemento
GROUP 14          Parametri Gres
GROUP 15          Parametri Gres
*PARAM            GUID    NAME    DATATYPE    DATACATEGORY    GROUP    VISIBLE    DESCRIPTION    USERMODIFIABLE    HIDEWHENNOVALUE
PARAM bb133900-8bf1-49c6-9acf-1ea93f2d790b    sovrapposizione tassello di plastica    NUMBER    12    1    1    0
PARAM c7a80207-d65d-4017-ad7a-e7c45903c96d    sovrapposizioni EPS    NUMBER    11    1    1    0
PARAM 0aa78108-f6b6-4e94-9e76-41c5bbfb2166    Durabilità rete di metallo rete di metallo    NUMBER    9    1    1    1
PARAM f3413d0b-9655-4ee9-b6b4-a99d46fa82b7    Trasportabilità lana di vetro    NUMBER    5    1    1    0
PARAM 1a1ff80c-499d-4ce7-9877-c3f17782285a    reversibilità/tipo di connessione finitura esterna    NUMBER    8    1    1    1
```

Figura 31 Schermata di visualizzazione aprendo il file estensione txt.

Per inserire un nuovo parametro si procede andando su “shared parameter” e si preme sul pulsante “select”: si entra in un'altra finestra in cui sono elencati i gruppi di parametri realizzati, dove ognuno di questi gruppi contiene i singoli parametri. Nel caso di questa tesi sono stati realizzati tanti gruppi quanti erano gli elementi presenti nel progetto. Il numero di parametri all’interno di ogni gruppo era sempre lo stesso in quanto si è fatto riferimento a quelli analizzati precedentemente ovvero per i singoli elementi: reversibilità/tipo di connessione, accessibilità, trasportabilità, potenzialità di fine vita, durabilità, interdipendenza tra gli elementi e contenimento formale. Mentre per l’insieme di più elementi troviamo: accessibilità, semplicità di assemblaggio, tempo di assemblaggio.

Figura 32 Finestra in cui sono indicati i gruppi di parametri realizzati che contengono i singoli parametri



Una volta selezionato il parametro che si desidera inserire si torna alla figura 30 e si seleziona la casella "Instance". In questo modo il contenuto del parametro non sarà uguale per tutti gli elementi poi effettivamente utilizzati nei modelli, ma sarà possibile diversificare i valori da istanza a istanza. Come si vede in figura 33 il parametro inserito sarà visibile tra quelli del singolo elemento.

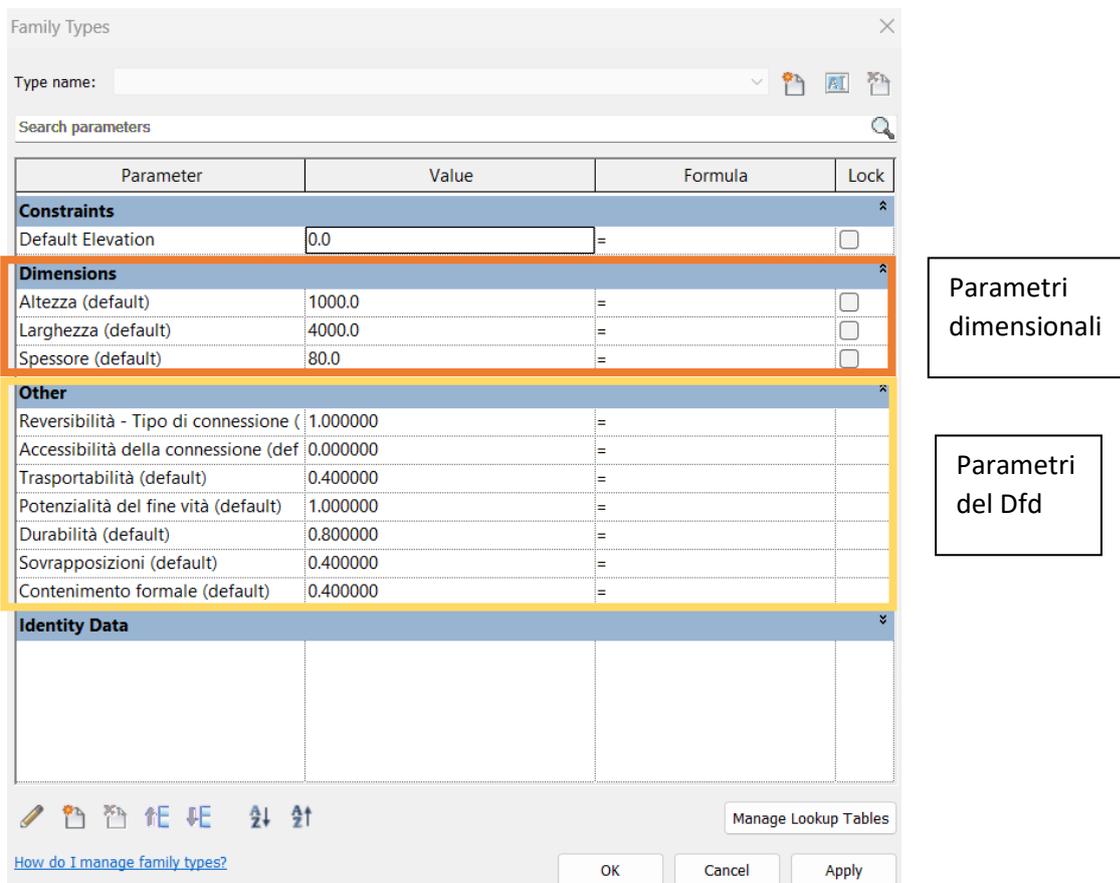
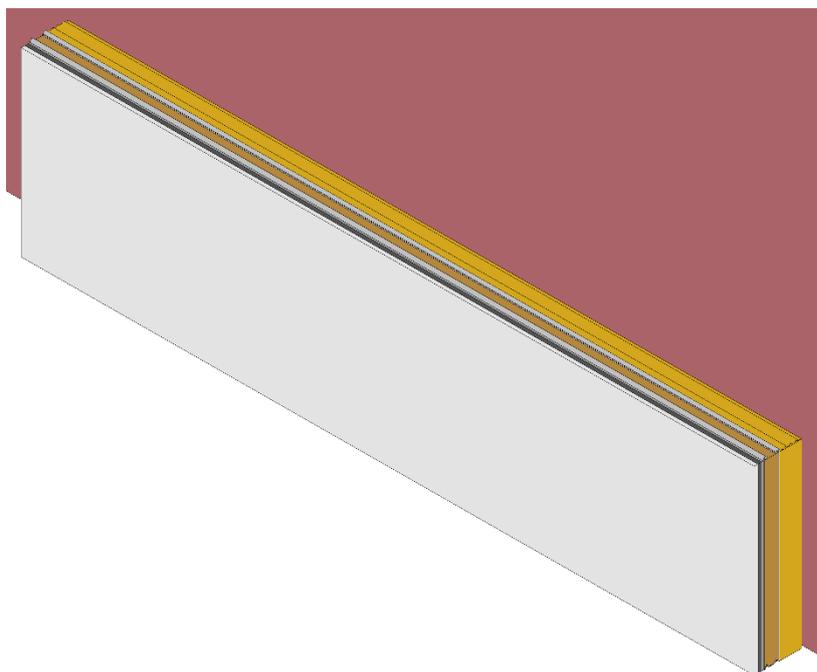


Figura 33 Visualizzazione complessiva dei parametri dell'oggetto

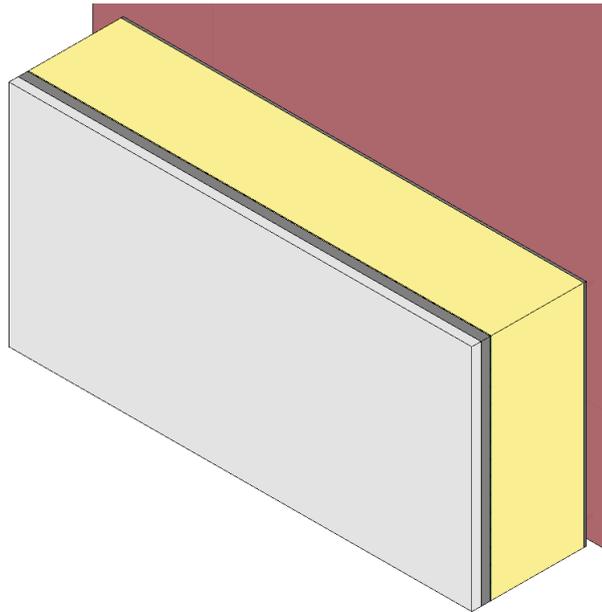
A questo punto si apre un'altra famiglia di Revit "Generic Model" in cui poter **aggregare le famiglie dei singoli elementi che formano la soluzione di facciata**. Nel nostro caso come detto precedentemente abbiamo due tipi di completamento della struttura muraria: ALIVA DEMO e ETICS. Per quanto riguarda la soluzione ALIVA DEMO comprende due famiglie composite: nella prima troviamo gli elementi che compongono il pannello prefabbricato quindi: lana di roccia, lana di vetro, tavola in fibrocemento, laminato che compone il sandwich e gli ancoraggi metallici a L attaccati al muro e al pannello. La seconda famiglia composta è composta da intonaco di biocalce e finitura esterna. La facciata ETICS, invece, comprende tre famiglie così divise: la prima è formata da uno strato di malta adesiva per permettere l'incollaggio dei pannelli in EPS. La seconda è formata dal pannello EPS insieme agli elementi di fissaggio, ovvero, la vite metallica e il tassello in plastica Fisher. Infine, la terza famiglia composta è formata da: intonaco di biocalce più finitura esterna (come nel caso ALIVA DEMO), più la rete di fibra di vetro per far sì che l'intonaco aderisca alla superficie del pannello in EPS. La divisione dei pacchetti composti è stata fatta per poter assegnare alle seguenti famiglie i tre parametri che prendono in considerazione l'insieme di più elementi. Seguendo lo stesso procedimento di prima per aggiungere i parametri si arriva alla seguente schermata:

2. A questo punto si è proceduto aprendo un file di progetto di Revit, scegliendo fra quelli proposti il "Metric Architectural Template", che ha le opzioni dimensionali già impostate secondo gli standard Europei. Si sono caricate tutte le famiglie composite andando a ricomporre lo strato della parete definitivo. Il risultato è il seguente:



*Figura 34 Soluzione di parete ALIVA DEMO completa realizzata su Revit*

Si vedono in ordine la lana di roccia, la lana di vetro e il fibrocemento a comporre il pannello prefabbricato. Questo è fissato alla struttura tramite due elementi ad L uno attaccato alla parete con un foro in cui sarà alloggiata la vite dell'altro elemento ad L attaccato al pannello sandwich. Infine più esternamente troveremo l'intonaco di gesso e la finitura esterna.



*Figura 35 Soluzione di parete ETICS completa realizzata su Revit*

Si vedono in ordine lo strato di malta adesiva che serve per attaccare i pannelli EPS al muro. Dopodiché è presente il pannello isolante in EPS di 20 cm con i suoi 7 tasselli in plastica Fischer in cui inserire i tasselli metallici. Infine, troviamo sempre l'intonaco di biocalce, ma per poterlo applicare al pannello è necessario utilizzare una rete in fibra di vetro. Per concludere troviamo lo strato di finitura esterna.

3. Il passaggio successivo è stato quello di estrapolare i parametri del DfD in una **“schedule”** da poter esportare al di fuori del programma. Si procede andando nel menù a sinistra **“Project Browser”** e si crea una nuova Schedule/Quantities scegliendo di quale categoria sono gli elementi di cui ci stiamo occupando (nel nostro caso Generic model). Si apre la schermata riportata in figura 38. Come si può vedere sono rappresentati tutti parametri dei singoli elementi che abbiamo inserito nel file di progetto. Le schedule in Revit permettono di raccogliere un gran numero di informazioni. Un altro motivo per cui abbiamo usato i **“parametri condivisi”** ed abbiamo selezionato l'opzione **“instance”** è che solo in questo modo i dati sono estrapolabili in una **“schedule”**.

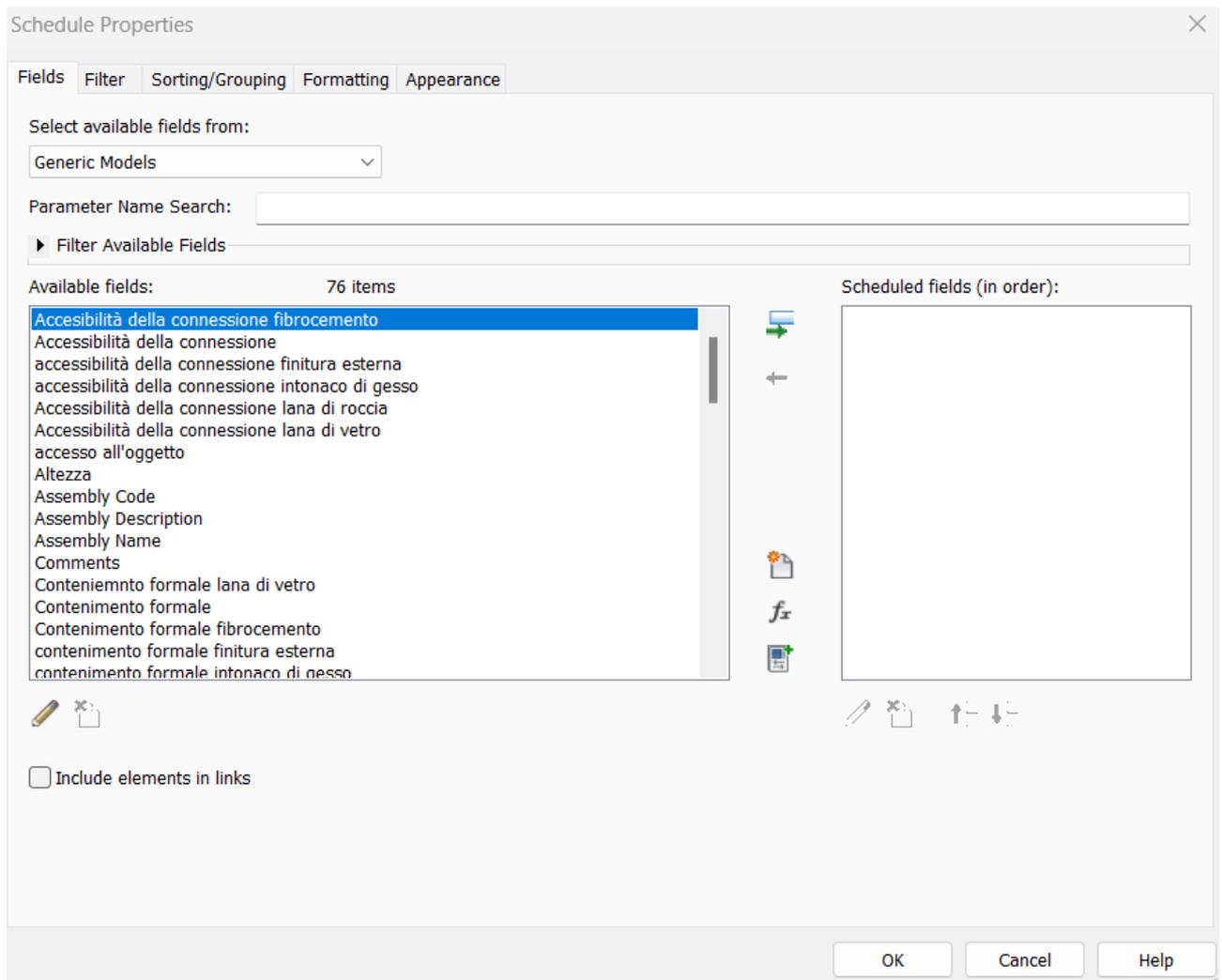


Figura 36 Schermata per la creazione di una "Schedule" su Revit

Dalla colonna di sinistra si riportano tutti i parametri che si vogliono inserire nella colonna di destra, ordinandoli a piacimento. Posso in qualsiasi momento ordinarli in maniera diversa con le frecce, cancellarli o aggiungerli.

Nella figura 39 vediamo il risultato delle operazioni riportate sopra. Troviamo nella prima riga i parametri mentre in colonna tutti gli elementi del progetto con i relativi dati. Da questo è stato possibile realizzare una tabella in Excel come vedremo nel capitolo seguente.

Family and Type	semplicità di assem	accesso all'oggetto	tempo di assemblaggi	Access
Famiglia pacchetto isolamento Aliva: Type 1	0.8	0.1	0.8	
Famiglia pacchetto finitura esterna: Famiglia pacchetto finitura esterna	0.4	0.4	0.1	
0 ancoraggio a L attaccato al pannello: 0 ancoraggio a L attaccato al pannello				0.4
0 ancoraggio a L attaccato al muro portante: 0 ancoraggio a L attaccato al muro port				0.4
0 ancoraggio a L attaccato al pannello: 0 ancoraggio a L attaccato al pannello				0.4
0 ancoraggio a L attaccato al muro portante: 0 ancoraggio a L attaccato al muro port				0.4
0 ancoraggio a L attaccato al pannello: 0 ancoraggio a L attaccato al pannello				0.4
0 ancoraggio a L attaccato al muro portante: 0 ancoraggio a L attaccato al muro port				0.4
0 ancoraggio a L attaccato al pannello: 0 ancoraggio a L attaccato al pannello				0.4
0 ancoraggio a L attaccato al muro portante: 0 ancoraggio a L attaccato al muro port				0.4

Figura 37 Esempio del risultato finale di creazione della "schedule"

Per estrapolare i parametri, poterli analizzare, e calcolare un indicatore finale si è proceduto realizzando delle schedule su Revit esportabili in Excel e quindi consultabili anche da chi non avesse accesso al software di modellazione. Per fare ciò si è proceduto andando su File, e per poter esportare si va su "Export". A questo punto scorrendo in basso il menù si arriva su "Reports" e viene data la possibilità di esportare "Schedule" e "Room/Area". Selezionando le "Schedule" viene semplicemente chiesto dove salvare il file. Aprendo il file ci accorgeremo che i dati sono stati esportati in modo disordinato, in questo modo non è possibile lavorarci. Questo perché il formato CSV rappresenta uno dei modi più semplici per rappresentare dati in forma tabellare all'interno di un semplice file di testo. Per avere un file editabile e su cui poter lavorare si procede andando su "Dati" e selezionando l'opzione da testo/CSV. In questo modo verrà creato un altro file excel con i dati su righe e colonne. Come prima troveremo nella prima riga tutti i parametri e sulle colonne i vari elementi con a seguire i valori assegnati.

I dati presenti non sono ordinati, infatti troviamo una lunghissima riga con tutti i parametri aggiunti. In un grande progetto potrebbero essere centinaia avendo molti elementi. Sarà quindi necessario **ordinarli manualmente o utilizzando un ambiente di programmazione visuale integrato in Revit, chiamato Dynamo**. Il suo utilizzo tuttavia non è banale, e richiede molto tempo di studio. Potrebbe non essere alla portata di tutti i professionisti soprattutto in un primo momento. Si è comunque scelto di procedere, lasciando Dynamo da parte vista la validità del risultato, senza l'utilizzo del plug in.

Un modo di esportare i dati in modo ordinato esiste. Infatti, portando in un file di progetto, direttamente le famiglie dei singoli elementi senza aggregarli nelle famiglie dei pacchetti, l'output sarebbe ordinato. Troveremmo nella prima colonna tutte le famiglie mentre i parametri sarebbero nominati univocamente per ogni elemento e quindi in colonna. Il problema che non ha permesso di continuare su questa strada è che, per inserire i tre parametri che riguardano i pacchetti, l'unica soluzione sarebbe stata inserirli manualmente o tramite un file separato vista l'impossibilità di agire con un unico file.

## 5.2 LE SOLUZIONI ANALIZZATE

### 5.2.1 ETICS

#### 5.2.1.1 *Valutazione dei parametri*

Come già accennato precedentemente, un limite che caratterizza questo e gli altri metodi presentati per valutare il livello di circolarità di soluzioni costruttive riguarda il metro di giudizio che si ha nell'assegnare i valori numerici (in questo caso, compresi tra 0.1 e 1) ai singoli elementi. Diventa dunque essenziale motivare adeguatamente i criteri di assegnazione di tali valori numerici, anche attraverso l'esempio dei sistemi costruttivi di facciata applicati all'edificio oggetto di studio. Si riporta di seguito la tabella riassuntiva del caso ETICS.

presentazione della soluzione adottata	Stratigrafie	Parametri dei singoli oggetti											Parametri dei gruppi di elementi								
		Reversibilità / Tipo di connessione		Accessibilità		Trasportabilità		Potenzialità del fine vita		Durabilità		Interdipendenza fra gli elementi		Contenimento formale		semplicità di assemblaggio		Accessibilità		tempo di assemblaggio (sup standard di 10m <sup>2</sup> di facciata)	
Sistema ETICS usato nelle pareti sue e est: tradizionale isolamento esterno in polistirene espanso per un totale di 20 cm	strato di malta adesiva	legante chimico	0,1	non accessibile	0,1	trasportato in sacchi	0,8	non riutilizzabile	0,1	non è riutilizzabile dopo la prima applicazione	0,1	completa integrazione fra gli oggetti	0,1	chiuso da strato di muratura interno e isolamento EPS	0,4	strato gettato da operai con strumenti semplici	1	è il primo strato della soluzione	0,1	circa un giorno considerando anche l'asciugatura	0,4
	isolamento EPS (200mm)	pannello giuntato a secco e con la malta adesiva	0,4	accessibile con azioni che causano danni riparabili	0,4	Facile da trasportare perché separato in blocchi	1	riutilizzabile in quanto non si degrada	1	è un isolante che non si deteriora	1	sovrapposizione tra uno o più oggetti	0,8	chiuso dagli altri pannelli	0,4	assemblaggio meccanico fatto da un operatore	1	chiuso ai lati dagli altri pannelli mentre dietro ha la muratura e davanti ha la finitura esterna	0,1	il pacchetto si presenta in pezzi di dimensione 50x100 per cui per gli operai è di veloce montaggio	0,8
	ancoraggi di metallo	elementi di connessione semplici	1	accessibile liberamente	1	Facile da trasportare perché di piccole dimensioni e peso	1	riutilizzabili	1	non si deteriora se non esposto ad acqua e umidità	0,8	zonizzazione modulare	1	nessuna inclusione	1						
	tasselli di plastica tipo fischer	elemento applicato a secco ma non reversibile	0,1	accessibile una volta smontato tutto il pannello senza danni	0,8	Facile da trasportare perché di piccole dimensioni e peso	1	raccolta differenziata della plastica	0,4	è per il singolo utilizzo	0,1	completa integrazione fra gli oggetti	0,1	incastrato nella muratura portante	0,1						
	rete di fibra di vetro	connessione chimica	0,1	non accessibile	0,1	Facile da trasportare perché organizzato in rotoli	1	differenziabile	0,4	se pulita e tirata fuori integra può essere riutilizzata	0,8	si integra completamente con lo strato di intonaco	0,1	bloccata da pannello in EPS e finitura esterna	0,1	assemblaggio chimico fatto da un operatore	0,4	è lo strato più esterno	1	necessario più giorni per asciugatura e posizionamento degli strati superiori	0,1
	strato di intonaco di biocalce	connessione chimica	0,1	non accessibile	0,1	Facile da trasportare perché diviso in sacchi	1	discarica	0,1	molto bassa	0,1	completa integrazione con finitura esterna	0,1	chiuso su un lato	0,4						
	finitura esterna 1 cm	connessione chimica	0,1	non accessibile	0,1	Facile da trasportare perché diviso in sacchi	1	discarica	0,1	molto bassa	0,1	completa integrazione con intonaco	0,1	libero verso l'esterno	1						

Tabella 13 Indicazione dei valori scelti per i dieci parametri con descrizione delle scelte per la soluzione ETICS

La lista degli strati che formano la parete ETICS dall'interno verso l'esterno è la seguente

1. Strato di malta adesiva;
2. Pannello isolante in EPS 200 mm;
3. Elementi per fissaggio del pannello (Fischer di plastica + vite di metallo);
4. Rete in fibra di vetro;
5. Intonaco di biocalce;
6. Finitura esterna.

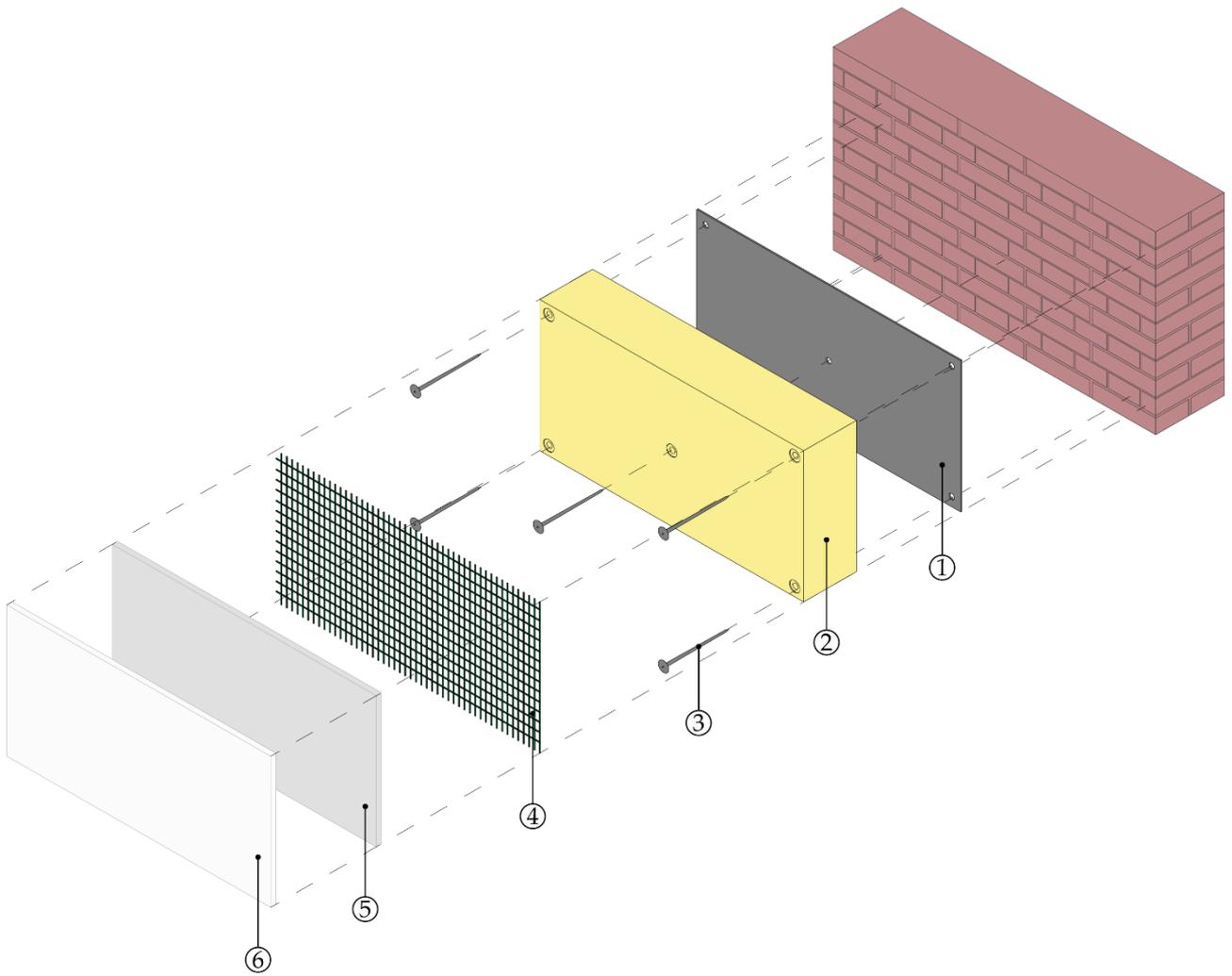


Figura 38 Esploso realizzato tramite il software Revit della soluzione di facciata ETICS

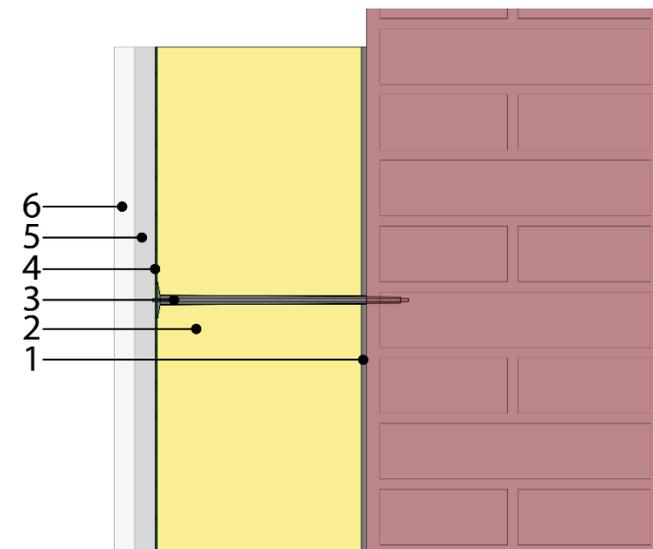


Figura 39 Sezione della soluzione ETICS realizzata con il software Revit

Si procede spiegando nel dettaglio le scelte che hanno portato all'ottenimento dei seguenti valori.

- **Strato di malta adesiva:** [52] adesivo cementizio a letto sottile a base di cemento grigio o bianco, riempitivi, resine sintetiche e additivi selezionati. Quando si mescola con l'acqua si ottiene una malta morbida che si indurisce per idratazione e asciugatura. È impermeabile e resistente alle intemperie già pochi giorni dopo la posa. Aderisce perfettamente sui supporti abituali nell'edilizia, come calcestruzzo, massetti di cemento, massetti di anidrite, gesso, intonaco, muratura e supporti simili, creando una solida adesione tra i diversi materiali da costruzione. È perfetta per interni, esterni, pavimenti e muri. Può essere utilizzato per la preparazione e la posa di piastrelle di ceramica, piastrelle, gres, gres porcellanato, mosaico vetroso, porcellana, pannelli da costruzione e pannelli di isolamento termico adatti. L'incollaggio avviene a letto sottile, infatti, lo spessore massimo dell'adesivo è di 5 mm in incollaggio singolo. Essendo un materiale chimico le sue caratteristiche sono pessime per quanto riguarda i parametri del DfD. Se consideriamo la reversibilità è pari a 0,1 in quanto una volta indurito non sarà più possibile manipolarlo. Questo influisce ovviamente sulla potenzialità del fine vita in cui la unica opzione è la discarica. È durevole se si fa riferimento alle sue caratteristiche intrinseche ma una volta tolto il pannello in caso di smontaggio non serve più. L'unico lato positivo è che viene portato in sacchi e miscelato in cantiere; quindi, ha una buona trasportabilità e semplicità di assemblaggio. Il tempo di stesa considerato 10 m<sup>2</sup> è buono e un operaio da solo riesce agevolmente a svolgere il lavoro;
- **Isolamento termico in EPS:** [53] Il polistirene si presenta allo stato naturale come un materiale trasparente, incolore, brillante ma può anche essere offerto traslucido, opaco o colorato. La forma è quella dei granuli con dimensione variabile a seconda degli impieghi. Ha buone caratteristiche meccaniche anche a bassissime temperature, alta resistenza alla trazione, eccezionali proprietà dielettriche, inodore, non igroscopico, ha un basso peso specifico, eccellente stampabilità ed ottima stabilità dimensionale. Il polistirene ha una bassa conducibilità termica e per questo viene usato anche come isolante del calore. Ha un alto indice di rifrazione alla luce e quindi i suoi manufatti sono molto brillanti e trasparenti. Dal punto di vista chimico resiste agli alcali, agli acidi diluiti, alle soluzioni saline e alla maggior parte dei composti organici; si scioglie però nei solventi aromatici e clorurati. L'EPS ha una conduttività termica ridotta grazie alla sua struttura cellulare chiusa, formata per il 98% di aria. Questa caratteristica gli conferisce un'ottima efficacia come isolante termico. Il "cappotto" in EPS, più precisamente denominato ETICS per pareti verticali opache è la soluzione più utilizzata in Europa per la coibentazione degli edifici civili, industriali, di servizio, nuovi o preesistenti. Viene utilizzato per isolare senza discontinuità dal freddo e dal caldo, per proteggere le facciate dagli agenti atmosferici, per porre in condizioni stazionarie termometriche l'involucro e la struttura degli edifici; Per il recupero e la manutenzione straordinaria di edifici esistenti, l'installazione di un sistema a "cappotto" in EPS genera i seguenti vantaggi:
  - immediato ottenimento di forte risparmio energetico, quindi di costi;
  - immediato raggiungimento di condizioni interne confortevoli;
  - eliminazione della causa dei difetti generati dai ponti termici, quali crepe, infiltrazioni, muffe, fastidiosi moti convettivi interni ai locali;
  - abbattimento, con tutti gli altri vantaggi citati, degli interventi manutentivi pesanti, quali rifacimenti di intonaci, interventi su spacchi, crepe e muffe, infiltrazioni, ecc.

Per quanto riguarda il fissaggio avviene tramite la tassellatura. Questa operazione è necessaria quando il supporto presenta una superficie o strati sottostanti con scarsa resistenza meccanica. Dopo almeno 24 ore dalla posa dello strato isolante, si procede con forature, in dima di profondità, con idoneo trapano. I tasselli devono inserirsi nella muratura portante per un minimo di 3 cm. Successivamente andremo a descrivere i tasselli con i valori assegnati ai parametri.

Tornando all'EPS troviamo i suoi principali punti di forza nella reversibilità in quanto non degradandosi, quindi avendo una ottima durabilità, è riutilizzabile in seguito allo smantellamento

dell'edificio. È facilmente trasportabile arrivando in cantiere in pannelli di dimensioni abbastanza piccole da poter essere trasportato da un solo operaio. È molto leggero e facile da manovrare. È sovrapposto frontalmente da tutti gli strati sovrastanti, tuttavia, per il disassemblaggio si può procedere da qualsiasi pannello nella parete il che prevede una rimozione in parallelo poiché i pannelli non sono incastrati tra di loro. Geometricamente, oltre i tasselli, non viene bloccato da niente. Il suo più grande difetto è che per questioni di sicurezza prima di essere tassellato è necessario applicare lo strato di malta adesiva, il che abbassa notevolmente l'appeal di questa tecnologia di isolamento per il DfD;

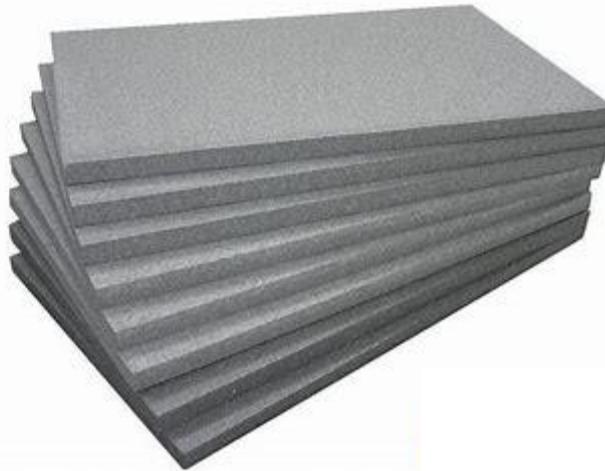


Figura 40 Tipologia di pannello in EPS

- **Ancoraggi metallici e tasselli in plastica (di tipo Fisher):** Questi due elementi sono strettamente legati anche se alcune loro caratteristiche fanno sì che i valori dei parametri differiscano. Entrambi sono facilmente trasportabili perché di piccole dimensioni e accessibili solo una volta che lo strato di protezione esterna è stato asportato. La loro più grande differenza è che l'elemento metallico può essere riutilizzato, mentre il tassello di plastica è usa e getta. È possibile solamente riciclarlo tra gli elementi in plastica. Questo fa sì che i risultati di durabilità e reversibilità siano pessimi. Quindi nonostante si tratti di un meccanismo di connessione a secco in questo caso non è ideale in quanto una parte dell'elemento non può essere riutilizzato. Possiamo aggiungere che anche l'ancoraggio di metallo se dovesse entrare in contatto con acqua e umidità potrebbe in parte perdere le sue caratteristiche meccaniche in quindi sarebbe necessario un suo riciclo o almeno una pulizia della superficie per poterlo riutilizzare;

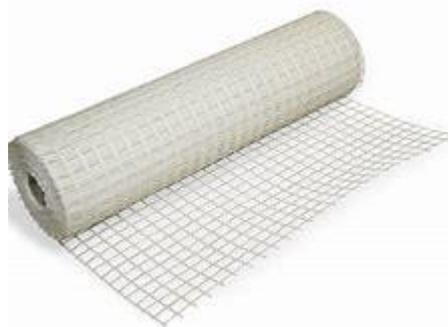


Figura 41 Tassello in plastica e vite metallica

- **Rete in fibra di vetro per rasature esterne:** [54] questa sottostruttura serve perché sono diversi i fenomeni strutturali e di degrado che possono causare distacchi e formazioni di crepe sia su vecchi che su nuovi intonaci. Queste reazioni possono dipendere da una cattiva esecuzione dell'intonaco, dall'utilizzo di materiali scadenti oppure dal ritiro eccessivo in fase di asciugatura e soprattutto,

dovute ai movimenti di assestamento della struttura. Per questo motivo, frequentemente si utilizza la rete porta intonaco, che fa da sostegno all'intonaco armato. Viene posizionata in fase esecutiva e, grazie al suo inserimento tra il supporto murario e l'intonaco, questa rete a maglie fitte diventa una vera e propria armatura. Le reti porta intonaco e l'intonaco armato costituiscono, infatti, una proficua soluzione ai distacchi e alla formazione di crepe sui muri. La sua particolare struttura quadrangolare, con maglie molto fitte, si presta all'azione contenitiva e di contrasto alla formazione di crepe. L'incremento di resistenza si ottiene, quindi, collegando trasversalmente le reti di armatura sulle facce mediante l'utilizzo di connettori, in numero di 3-4 al mq. Le aziende operanti nel settore hanno sviluppato una vasta gamma di reti porta intonaco sempre più performanti e, soprattutto, non soggette a ossidazione. Vengono realizzate reti con prodotti plastici o derivanti dal vetro, il tutto a beneficio della resa funzionale ed estetica della parete, abbandonando quelle che erano le reti metalliche, o elettrosaldate, tanto utilizzate negli anni '80 e '90. Il fatto che non arrugginiscono le fa preferire alle vecchie soluzioni di reti metalliche e ne permette l'utilizzo anche in ambienti umidi o soggetti a infiltrazioni e attacchi chimici.

Purtroppo, il materiale non è molto flessibile per cui la reversibilità del prodotto è abbastanza scarsa. È probabile, infatti, che in fase di smantellamento la rete si frantumi e non sia più utilizzabile. La cosa positiva è che può essere riciclata tra i materiali plastici e vetrosi per creare nuovi prodotti. Bisogna aggiungere che la rete viene annegata nell'intonaco di gesso per cui andrà pulita da ogni impurità. È facilmente trasportabile perché raccolta in rotoli di modeste dimensioni, ed altamente resistente nel tempo vista la sua composizione meccanica e chimica. La rete si integra completamente con lo strato di biocalce quindi i suoi valori di sovrapposizione e interdipendenza sono pessimi. Complessivamente è un materiale non ottimale per il risultato del DfD, in quanto, si utilizza per una protezione esterna chimica che ha delle pessime caratteristiche;



*Figura 42 Rete in fibra di vetro*

- **Intonaco di biocalce:** [55] L'intonaco di biocalce è un materiale da costruzione che presenta proprietà simili alla malta o al cemento. Viene creato riscaldando il gesso, un minerale morbido e naturale, a circa 300 gradi Fahrenheit (150 ° C), quindi mescolandolo con acqua. La pasta risultante si indurisce mentre si raffredda, formando un prodotto finito relativamente morbido e flessibile. A differenza della malta o del cemento, che si asciugano molto più duramente, l'intonaco di gesso può essere levigato o altrimenti manipolato una volta indurito, rendendolo una buona opzione per scopi estetici e non portanti. L'intonaco di gesso si caratterizza per il suo effetto anti ritiro e di regolazione dell'umidità.

Anche in questo caso parliamo di un legante chimico, poco adatto alle caratteristiche che si cercano nei materiali quando parliamo di DfD. Non è reversibile, di conseguenza non riutilizzabile. La sua durabilità è molto scarsa in quanto è il primo materiale che si degrada in facciata in seguito all'usura

dovuta dal tempo. È completamente coeso con la finitura esterna e la rete in fibra di vetro, per cui è completamente integrato dagli altri strati. L'unica nota positiva è la trasportabilità visto che viene venduta in sacchi da miscelare con acqua. Occorre aggiungere che è stato utilizzato questo tipo di soluzione in quanto è stato imposto dalla soprintendenza che lo strato protettivo esterno fosse uguale a quello originale. In assenza di questo vincolo si sarebbe potuto utilizzare un sistema di rivestimento a secco (come sperimentato a livello teorico nelle soluzioni ipotizzate più avanti), più congeniale allo scopo della seguente tesi;

- **Finitura esterna:** [56] gli intonaci da esterno sono delle malte, cioè delle miscele costituite da acqua, materiali inerti (ad esempio la sabbia) e agenti leganti. Si applicano sui muri esterni degli edifici e hanno la delicatissima funzione di preservare la struttura dalle intemperie: precipitazioni, vento, sole estivo o forti escursioni termiche. Le caratteristiche dell'intonaco dipendono molto dagli agenti leganti che si utilizzano. I principali sono:
  - calce. Consente alle pareti una buona traspirazione e garantisce al tempo stesso una valida protezione dagli agenti atmosferici;
  - gesso. Questo materiale si rivela ottimale dal punto di vista dell'isolamento acustico del fabbricato;
  - cemento. Aderisce nel migliore dei modi alla muratura ed evita il formarsi della condensa, pericolosa per la struttura.

In commercio si possono trovare sia composti tradizionali da miscelare, sia intonaci premiscelati, già pronti per l'applicazione. Questi ultimi costano di più e per loro natura non sono personalizzabili, ma sono assolutamente affidabili. Gli intonaci per esterno non sono tutti uguali. Le loro proprietà variano a seconda degli inerti, dei leganti e anche di ulteriori additivi che vengono utilizzati. Scopriamo le tipologie più comuni:

- termoisolanti. Migliorano l'isolamento termico dell'edificio;
- ignifughi. Assicurano anche una protezione dal rischio di incendi;
- naturali. Non contengono additivi chimici e sono ideali per la bioedilizia;
- rasanti. Per pareti perfettamente lisce;
- fibro-rinforzati. Potenziano la resistenza della struttura;
- decorativi. Possono essere colorati, oppure caratterizzati da una texture più grossolana che conferisce un effetto rustico.

Nel nostro caso si parla di un intonaco da esterno rasante che per quanto riguarda i valori dei parametri sono molto simili a quelli dell'intonaco di biocalce, infatti è strettamente legato ad esso. È sempre un composto chimico, non riutilizzabile e molto poco durevole essendo esposto verso l'esterno. È il primo materiale che necessita di manutenzione durante la vita di un edificio. Non è contenuto da nulla affacciandosi all'esterno ma è comunque strettamente legato chimicamente con l'intonaco di gesso. Anch'esso è trasportato in sacchi e miscelato in cantiere quindi di peso e dimensioni moderate;

Successivamente si è passati a valutare con gli stessi criteri i **3 parametri che riguardano gli insiemi di più elementi**. Di seguito si riportano le motivazioni delle scelte effettuate. Nel progetto troviamo tre tipi di agglomerati di elementi:

- **strato malta adesiva:** è un solo elemento che si contraddistingue in quanto è applicato come prima cosa sulla parete esistente. È necessario per applicare i pannelli in EPS. È semplice da applicare ma il basso punteggio è dato dal fatto che è un legante chimico, per cui nonostante sia applicabile da un solo operaio con strumenti facili, non è ottimale per la decostruzione. È il primo strato della parete

per cui non è facile accedervi e il tempo di assemblaggio considerando 10 m<sup>2</sup> è di mezza giornata considerando anche il tempo per l'applicazione dei pannelli;

- **isolamento EPS, compresi gli ancoraggi:** questo insieme di elementi è molto interessante in quanto andiamo a considerare il pannello in EPS con gli ancoraggio di metallo e i tasselli di plastica Fisher. È necessario considerarli insieme in quanto strettamente collegati per avere un lavoro finito. È semplice come assemblaggio tanto da poter essere svolto da una sola persona, si svolge a secco, ed una volta eliminato lo strato di finitura esterna è possibile rimuovere gli ancoraggi metallici per riutilizzare il pannello. L'EPS si presenta in pezzi di dimensioni 50x100 cm per cui è facilmente manovrabile da un solo operaio che in mezza giornata riesce a montare i pannelli per ricoprire l'intera area di 10 m<sup>2</sup>;
- **strato di protezione esterna comprensivo di rete di fibra di vetro, finitura esterna e intonaco di bio-calce:** Anche in questo caso gli strati sono stati considerati insieme perché, strettamente legati gli uni agli altri anche da un punto di vista fisico. Anche in questo caso come detto per lo strato adesivo in cemento, è applicabile da un semplice operaio ma è un composto chimico quindi non ideale ai fini della nostra ricerca. È legato al pannello in EPS ed è lo strato più esterno. Per quanto riguarda le tempistiche, è necessario più tempo per poter svolgere tutte le operazioni, a causa del periodo di asciugatura degli strati. Infatti, senza che lo strato di intonaco di gesso sia asciutto non si potrà procedere con la finitura esterna;

## 5.2.2 ALIVA DEMO

Allo stesso modo andremo a presentare la seconda soluzione di facciata realizzata nelle pareti nord e ovest.

Di seguito si riporta la tabella con i valori espressi per ogni parametro:

Parete dell'edificio	stratigrafie	Parametri singoli oggetti								Parametri dei gruppi di elementi										
		Reversibilità / Tipo di connessione	Accessibilità	Trasportabilità (peso e dimensioni)	Potenzialità del fine vita	Durabilità (nel tempo)	Interdipendenza fra gli elementi	Contenimento formale	semplicità di assemblaggio	Accessibilità	tempo di assemblaggio (sup standard di 10m <sup>2</sup> di facciata)									
Sistema ALIVA DEMO usata nelle pareti nord e ovest. Pannelli prefabbricati composti da lana di vetro per 12 cm e un pacchetto sandwich esterno di 8 cm composto da lana di roccia per un totale di 20 cm	isolamento di lana di vetro 120 mm Knauf	connessione secca tramite viti alla lamiera metallica	1	accessibile con azioni addizionali che non causano danni	0,8	pannello prefabbricato pesante è necessario un mezzo leggero	0,4	riutilizzabile se non esposto all'acqua	1	resiste diversi anni se ben protetto	1	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	bloccato da pacchetto sandwich	0,4	assemblaggio meccanico fatto da più operatori e un mezzo di movimentazione	Accessibile con azioni che causano danni allo strato di protezione esterna ma non ai suoi componenti interni	0,8	sapendo che ci sono volute 70 ore per montare 190 m <sup>2</sup> sappiamo che ci vogliono 3 ore per 10m <sup>2</sup> circa	0,8
	lamiera metallica 0.5 mm Isoparfire di Lattenedil	connesso con altri elementi per via meccanica	0,8	accessibile con azioni addizionali che causano danni riparabili	0,4	pannello prefabbricato pesante è necessario un mezzo leggero	0,4	riutilizzabile se separato dal pannello	1	piccolo spessore e degrada se esposto all'acqua	0,8	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	attaccato all'isolamento in lana di roccia	0,4					
	isolamento in lana di roccia 80 mm Isoparfire di Lattenedil	connessione secca	1	accessibile con azioni addizionali che causano danni riparabili	0,8	pannello prefabbricato pesante è necessario un mezzo leggero	0,4	riusabile facilmente scollandolo dalla lamiera	1	riqualificarlo dallo scollamento dalla lamiera	0,8	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	bloccato da lamiera metalliche	0,1					
	lamiera metallica 0.5 mm Isoparfire di Lattenedil	connesso con altri elementi per via meccanica	0,8	accessibile con azioni addizionali che causano danni riparabili	0,4	pannello prefabbricato pesante è necessario un mezzo leggero	0,4	riutilizzabile se separato dal pannello	1	piccolo spessore e degrada se esposto all'acqua	0,8	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	attaccato all'isolamento in lana di roccia	0,4					
	tavola di fibrocemento 12.5 mm Acqua-panel	connessione secca	1	accessibile con azioni addizionali che causano danni riparabili	0,4	pannello prefabbricato pesante è necessario un mezzo leggero	0,4	riusabile se slegato scollato dalla lamiera	1	resiste diversi anni se ben protetto	1	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	bloccato da isolamento in lana di roccia	0,4					
	ancoraggi metallici attaccato lamierino metallico	elementi di connessione a secco	1	levato lo strato di finitura esterno gli ancoraggi sono facilmente raggiungibili	1	pannello prefabbricato pesante è necessario un mezzo leggero	0,4	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un piccolo elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	bloccati dai pannelli sandwich	0,4					
	ancoraggi metallici attaccati alla muratura portante	elementi di connessione a secco	1	una volta levato il pannello prefabbricato sono facilmente raggiungibili	1	diviso in piccoli elementi facilmente trasportabile	1	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un piccolo elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	bloccati dai pannelli sandwich	0,4					
	strato di intonaco di bio-calce	connessione chimica	0,1	non accessibile	0,1	Facile da trasportare perché diviso in sacchi	1	discarica	0,1	molto bassa	0,1	completa integrazione con finitura esterna	0,1	chiuso su un lato	0,4					
finitura esterna 1 cm	connessione chimica	0,1	non accessibile	0,1	Facile da trasportare perché diviso in sacchi	1	discarica	0,1	molto bassa	0,1	completa integrazione con intonaco	0,1	libero verso l'esterno	1						

Tabella 14 Indicazione dei valori scelti per i dieci parametri con descrizione delle scelte per la soluzione ALIVA DEMO

La lista degli strati che formano la parete ALIVA DEMO dall'interno verso l'esterno è la seguente

1. Isolamento Lana di vetro 120mm;
2. Laminato in acciaio di circa 1 mm;
3. Pannello in lana di roccia 80mm;
4. Tavola di fibrocemento;
5. Ancoraggio di metallo attaccato al laminato;
6. Ancoraggio di metallo attaccato al muro portante;
7. Intonaco di biocalce;
8. Finitura esterna.

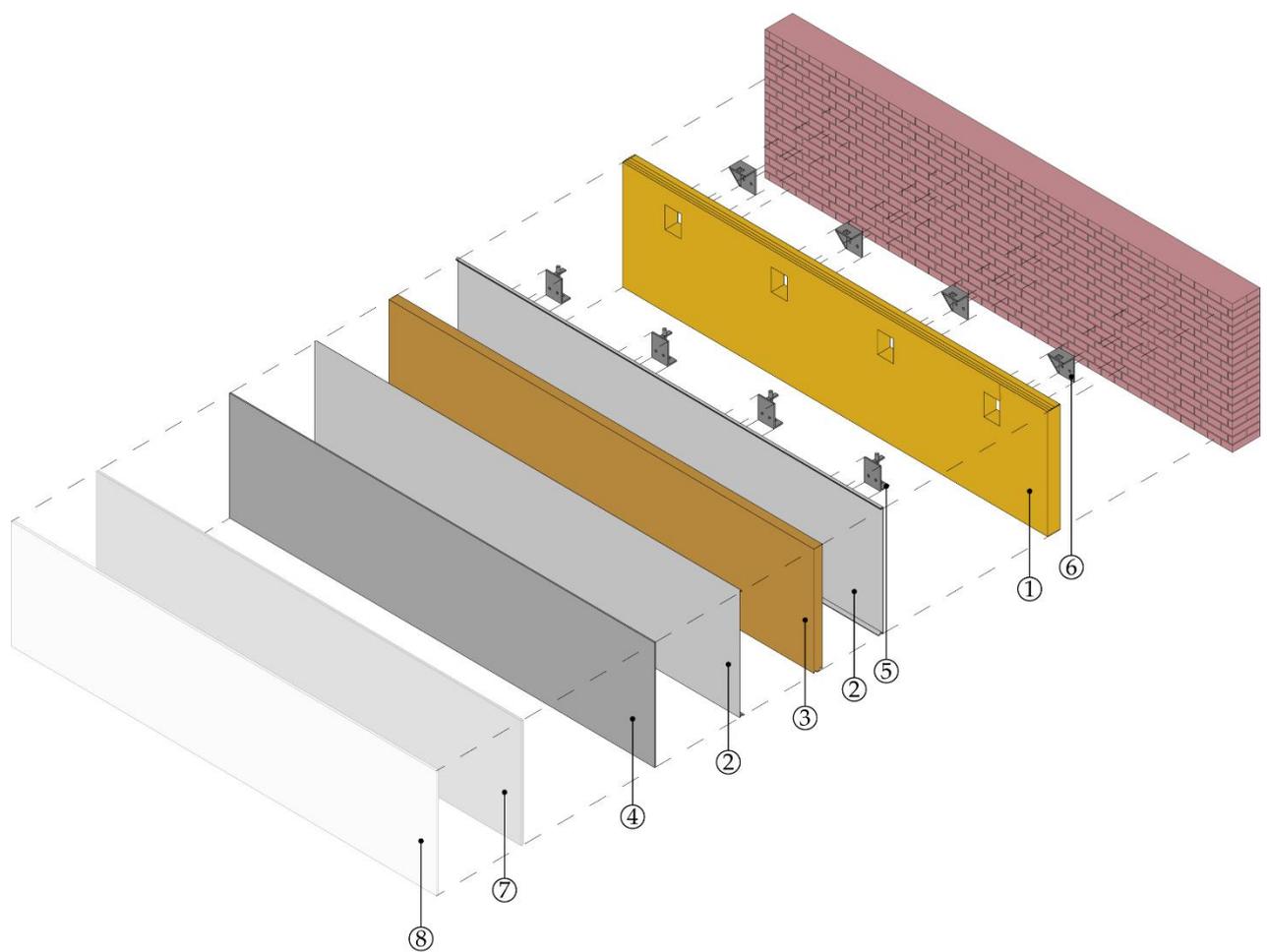


Figura 43 Esploso realizzato tramite il software Revit della soluzione di facciata ALIVA DEMO

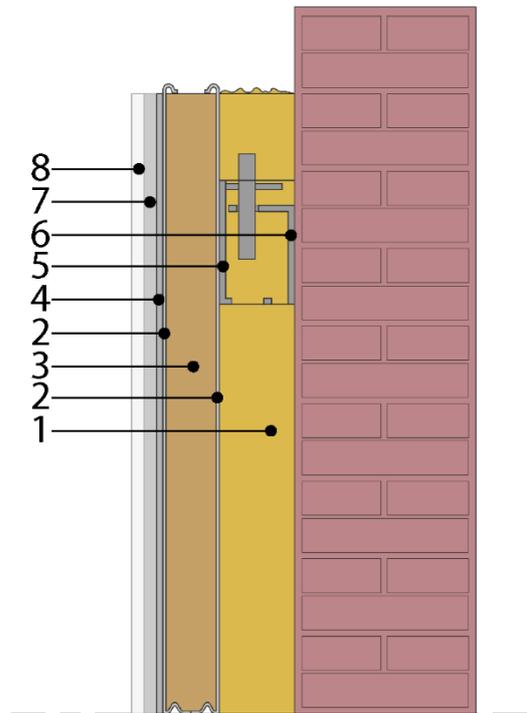


Figura 44 Sezione della soluzione ALIVA DEMO realizzata con il software Revit

Si procede spiegando nel dettaglio le scelte che hanno portato all'ottenimento dei seguenti valori:

- Isolamento in lana di vetro:** [57] tra i prodotti isolanti di origine minerale uno dei più utilizzati nel settore delle costruzioni è la lana di vetro, che appartiene al gruppo delle fibre artificiali vetrose. Quest'ultime, indicate anche con l'acronimo MMVFs (Man Made Vitreous Fibers, TIMA 1991), conosciute anche come fibre vetrose sintetiche o fibre minerali artificiali, sono un grande sottogruppo di fibre inorganiche e costituiscono attualmente il gruppo di fibre commercialmente più importante. Sul piano più strettamente commerciale le fibre vetrose sono rappresentate dalle lane di vetro per isolamento e dai filati di vetro quali elementi di rinforzo, impiegati prevalentemente nel settore delle materie plastiche. La fibra è definita, al di là della composizione chimica, come una qualsiasi particella che abbia dimensioni tali che la sua lunghezza superi di almeno tre volte il suo diametro. Le fibre, infatti, presentano una forma allungata con un rapporto lunghezza/diametro superiore a tre, in particolare le fibre respirabili per il WHO (World Health Organisation, 1988), e presentano una lunghezza maggiore di 5 micron e un diametro minore di 3 micron. Le fibre minerali artificiali si distinguono dalle fibre minerali naturali per l'impossibilità di separarsi longitudinalmente in fibrille di più piccolo diametro. La loro differenza sostanziale risiede nel comportamento meccanico. Le fibre minerali naturali, infatti, si frammentano sia longitudinalmente sia trasversalmente mentre, quelle artificiali solo trasversalmente producendo frammenti più corti. Le ridotte dimensioni e la forma sono poi alla base delle caratteristiche aerodinamiche delle particelle fibrose e della loro bio-persistenza. La composizione chimica delle fibre minerali commercialmente più diffuse è a base di silice e contiene quote variabili di altri ossidi inorganici. I componenti non a base di silice includono anche ossidi alcalino terrosi, alcali, alluminio, boro, ferro e zirconio. Le proprietà tecniche prestazionali risultano strettamente legate alle loro caratteristiche chimico – fisiche. All'interno della famiglia delle lane minerali, la lana di vetro è prodotta con materie prime

naturali e riciclate (silice e vetro riciclato selezionato) e, per la quota restante, resine termoindurenti. Il vetro è un silicato amorfo dotato di una elevata stabilità chimica e fisica. La fibra di vetro non presenta impurità, non è infiammabile grazie alla sua natura totalmente inorganica, non è attaccabile da agenti chimici corrosivi, non è degradabile dai microorganismi e non essendo cava non veicola l'acqua per capillarità.

Per quanto riguarda la proprietà chimiche, l'intreccio delle fibre realizzato in sede di produzione delle lane e dei manufatti a base di lane conferisce a questi prodotti una elevatissima capacità di isolamento, sia termico che acustico. L'aria trattenuta all'interno di questa articolata e complessa porosità, realizzata dall'intreccio, impedisce scambi di temperature da una superficie all'altra degli elementi di lana di vetro. Come pure, questa tipologia di porosità, accompagnata da una apprezzabile elasticità degli elementi, permette di smorzare le onde sonore e di isolare quindi dai rumori aerei, dai rumori da calpestio e di eseguire una correzione acustica dei locali. I prodotti in lana di vetro sono stabili e mantengono le proprie dimensioni pur in presenza di variazioni di temperatura e di umidità a cui possono essere esposti. Uno dei difetti è il fatto di non essere idrofili, tuttavia in caso di contatto con l'acqua, riacquistano tutte le loro proprietà termiche ed acustiche dopo essersi asciugati. Ai leganti possono essere aggiunte particolari sostanze destinate a migliorare il comportamento all'acqua ed a migliorare la manipolabilità.

Per le proprietà meccaniche invece, La densità (espressa in kg nell'unità di volume in m<sup>3</sup>) e la quantità di legante (espressa in %, fatto 100 il peso del prodotto finito) forniscono un'indicazione relativa alle prestazioni meccaniche dei manufatti e quindi al loro impiego.

- Densità inferiori a 20 kg/m<sup>3</sup> e basse quantità di legante (< 6%) caratterizzano i prodotti flessibili, detti a bassa densità;
- densità comprese fra i 20 e i 50 kg/m<sup>3</sup> e basse quantità di legante (< 6%) caratterizzano i prodotti rigidi, detti a medio/alta densità;
- densità superiori ai 50 kg/m<sup>3</sup> ed alte quantità di legante (> al 6%) caratterizzano prodotti, detti ad alta densità, aventi performance meccaniche più elevate.

In commercio, prodotti con densità superiore a 35 kg/m<sup>3</sup> si presentano solo in pannelli. La scelta del prodotto più idoneo è funzionale alla specifica applicazione per la quale saranno individuate le caratteristiche prestazionali del prodotto stesso e la sua densità, la quale non costituisce quindi, di per sé, indice di qualità. Inoltre, sono state individuate tecnologie capaci di incrementare la resistenza alla compressione meccanica attraverso un pre-orientamento delle fibre.

Una volta analizzata la lana di vetro si possono individuare le scelte dei valori assegnati ai parametri. È un prodotto reversibile, riutilizzabile e duraturo come si evince dalle caratteristiche meccaniche e chimiche sopradette. Non è idrofobo ma se asciugato riacquisisce tutte le proprietà chimico/fisiche. Per quanto riguarda gli altri parametri si è tenuto conto del fatto che in questo caso la lana di vetro arriva in cantiere su un pannello prefabbricato. La trasportabilità non è eccellente in quanto il pannello è di notevoli dimensioni e per la movimentazione sarà necessario un montacarichi. È integrato con lana di rocca e fibrocemento per cui non isolabile in poco tempo, se non dopo aver smontato l'intero pannello. La lana di vetro si trova chiusa tra la muratura esistente e il pannello sandwich, quindi, è schiacciata da questi due elementi. È posizionato nella struttura adagiando il pannello facendolo calare dall'alto, per questo sarà necessario partire dalla sommità per smontare l'intera parete. Tutte le giunzioni avvengono a secco;



Figura 45 Rotolo di lana di vetro a media densità

- **Foglio di lamiera per trattenere il materiale isolante 0.5:** Questo sottile strato di acciaio sagomato per resistere a degli sforzi notevoli serve per proteggere il materiale isolante e permette che si possano unire tra di loro gli elementi. Nel nostro caso, ad esempio, gli elementi di giunzione con la parete portante sono attaccati al foglio di metallo. Questo componente è giuntato con il resto tramite dei componenti meccanici, quindi è reversibile e riutilizzabile. È accessibile con azioni che non causano danni e molto duraturo. L'oggetto viene trasportato prefabbricato insieme al pannello di isolamento quindi essendo di grande dimensioni non è facilmente trasportabile, ma è posizionato in modo modulare. È bloccato verso l'esterno sempre dalla finitura esterna e dal fibrocemento;
- **Isolamento in lana di roccia:** [58] La lana di roccia è un materiale isolante naturale che si ottiene grazie alla fusione di alcune rocce e minerali. dal punto di vista chimico e fisico il materiale si costituisce da vetro fuso e pietre: in alcuni casi, invece, si compone di scarti industriali definite come scorie. per quanto riguarda la composizione chimica, si trovano dolomite, basalto e diabase. L'uso della lana di roccia si presta innumerevoli applicazioni, dalle tubature ai cappotti delle abitazioni. Dalla performance duratura, c'è da sottolineare che è un materiale pensato per resistere nel tempo. La moderna applicazione della fibra minerale è protagonista di pannelli per uso industriale, in quanto offre doti isolanti elevate. Preziosa per le abitazioni per risparmiare le risorse energetiche la lana di roccia impedisce la dispersione del calore lo mantiene inalterato. In ambito edilizio, presenta delle caratteristiche tecniche da non trascurare: le proprietà della fibra minerale è ad oggi tra i materiali ecocompatibili più interessanti, estremamente funzionale. Presenta le seguenti caratteristiche:
  - isolamento termico: il livello di isolante della lana di roccia è indubbiamente ideale, sia dal punto di vista del caldo che del freddo. la struttura interna della fibra minerale permette di regolare la temperatura ed evita di incamerare aria al suo interno;
  - isolamento acustico: molto utilizzata negli ambienti musicali, è il materiale ideale per prevenire i rumori esterni e per preservare una tranquillità casalinga. Ideale da sfruttare negli appartamenti di un condominio per evitare di avere rumore tra gli appartamenti e per attenuare le vibrazioni;
  - elevata resistenza al fuoco: il punto di fusione del materiale è elevatissimo. Secondo le stime si attesta sugli oltre mille gradi. Di conseguenza questo aspetto rende la lana di roccia potenzialmente ignifuga e adatta ai capannoni industriali e alle abitazioni private;
  - idrorepellente: la grande caratteristica della lana di roccia da non sottovalutare è che non assorbe l'umidità; pertanto, è un materiale che offre grande capacità idrorepellente;

Prima di scegliere il materiale edile, è importante comprendere quali sono i pregi e i difetti: nel caso della lana di roccia sappiamo che possiamo ricavare un'enorme isolante termico, acustico e dall'elevata resistenza al fuoco. Sono tre i vantaggi principali del materiale, ed è il motivo per cui viene enormemente impiegato su larga scala per la protezione offerta. Negli anni, si è perfezionato

il materiale, fino ad ottenere una fibra minerale di qualità: tra le sue caratteristiche essenziali, infatti, si trovano la sua purezza, oltre ad essere bio-solubile. Per quanto riguarda i difetti, la lana di roccia è leggermente irritante per la pelle umana: di conseguenza, la sua messa in posa deve avvenire osservando piccoli ma fondamentali accorgimenti.

Per i valori dei parametri molti di questi si sovrappongono alla lana di vetro, facendo parte dello stesso pannello prefabbricato e avendo caratteristiche simili. Anch'essa, infatti, è reversibile, riutilizzabile e duratura. Le sue caratteristiche chimiche e fisica sono addirittura migliori della lana di vetro, con la sua ottima resistenza al fuoco e la totale idrorepellenza. Per quanto riguarda trasportabilità, sovrapposizione e contenimento formale, si ripetono le cose scritte sopra. Infatti, arriva in cantiere in pannelli prefabbricati di grandi dimensioni per cui servirà un mezzo leggero per la movimentazione. È contenuta all'interno del sandwich formato dai due laminati in acciaio per cui è necessario separarli per riottenere il materiale. Solitamente per accedere al singolo elemento verrà prima smontato l'intero pannello e successivamente smontato in pezzi singoli.



*Figura 46 Pannelli di lana di roccia*

- **Laminato in acciaio sagomato:** La sua funzione è quella di contenere il pacchetto sandwich composto dalla lana di roccia. La sua funzione è di irrigidimento e consente la connessione tra i vari elementi. Essendo sagomato ad hoc per questo tipo di pannello le sue funzioni sono limitate. È possibile riutilizzare il sandwich complessivamente. Separarlo dalla lana di roccia non è troppo facile in quanto sono legati chimicamente; tuttavia, una volta pulito può essere riutilizzato a patto che se ne trovi l'utilizzo. In generale segue gli stessi principi del pannello prefabbricato, per cui è difficoltoso il trasporto, è applicato in modo modulare dall'alto al basso e
- **Pannello di fibrocemento (tipo Aquapanel):** [59] È costituito da una matrice a base di cemento caricata con sabbia, fibre organiche naturali e agenti riempitivi minerali. Resiste molto bene alle intemperie, agli agenti atmosferici, ai cicli di gelo e disgelo; ha un basso rigonfiamento idrico (0,03%) ed un'ottima resistenza al fuoco (Classe 0). Inoltre, è impermeabile all'acqua, permeabile al vapore, fonoassorbente e manifesta proprietà dielettriche. Queste tavole sono utilizzate come pareti di rivestimento per la costruzione o per il restauro di edifici. Le sue proprietà sono: traspirante, impermeabile, elastico, resistente all'abrasione, resistente all'impatto, resistente al graffio, ignifugo, isolante elettrico, dielettrico, fonoisolante.

Per i parametri abbiamo nuovamente una ridondanza di valori con lana di roccia e lana di vetro. Infatti, ha ottime caratteristiche di durabilità, reversibilità e riuso. Fa parte dello stesso pannello prefabbricato anche se è lo strato più esterno che protegge gli strati isolanti più interni. È legato al pacchetto sandwich a secco con delle chiodature e dovrà essere separato dalla lamiera metallica per essere riutilizzato singolarmente. È accessibile con azioni che non causano danni se non per lo strato di finitura esterna.

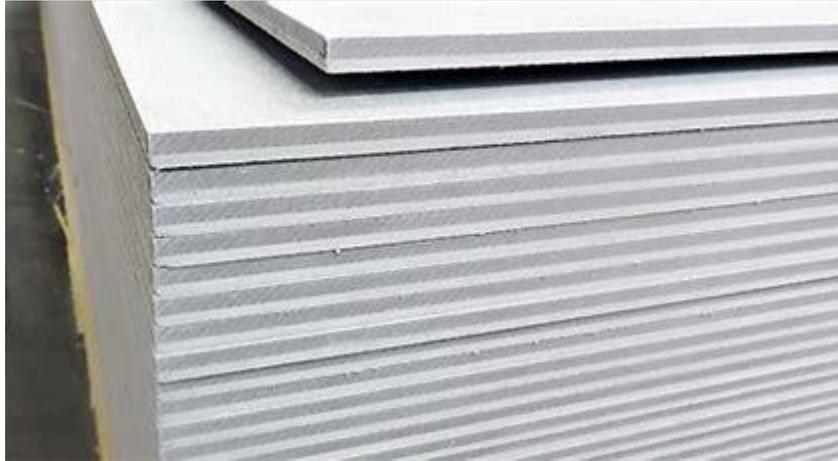


Figura 47 Tavole di fibrocemento

- **Ancoraggi metallici del pannello alla muratura portante:** Ancoraggi metallici di questo tipo sono spesso realizzati ad hoc dalle aziende o dai produttori per una finalità specifica. In questo caso il fissaggio è composto da due piastre fissate a 90 gradi in cui la vite dell'elemento fissato alla struttura portante possa penetrare nel buco della piastra orizzontale dell'elemento fissato al pannello prefabbricato. L'ancoraggio fissato alla parete con due viti è rinforzato da un triangolo laterale visto il notevole momento che dovrà sopportare. Una volta posizionato il pannello basterà stringere la vite per concludere la giunzione.

Essendo due elementi simili di acciaio i parametri non differiscono. Sono elementi reversibili perché composti di tutte giunzioni a secco, accessibili una volta che la finitura esterna della parete è smantellata e riusabili se ne si trova l'utilizzo. Sono strettamente legati al pannello sandwich per quanto riguarda l'accessibilità anche se sono facilmente individuabili procedendo con lo smontaggio della parete dall'alto verso il basso in quanto visibili. Per conseguire una giusta progettazione nell'ambito del DfD si dovranno indicare i punti di ancoraggio degli elementi in prospetto per poterli raggiungere facilmente in fase di smontaggio;



Figura 48 Foto degli ancoraggi del pacchetto prefabbricato utilizzati nel caso studio (fotografia scattata in cantiere da C. Mazzoli)

Per quanto riguarda intonaco di biocalce e finitura esterna si rimanda a quanto scritto per la soluzione ETICS Successivamente si è passati a valutare con gli stessi criteri i **3 parametri che riguardano gli insiemi di più elementi**. Di seguito si riportano le motivazioni delle scelte effettuate. Nel progetto troviamo quattro tipi di agglomerati di elementi:

- **pannello prefabbricato composto da, lana di vetro, lana di roccia, tavola di fibrocemento, e i relativi ancoraggi:** è l'insieme di elementi più corposo che comprende cinque elementi. Come già detto in precedenza è un pannello prefabbricato che arriva in cantiere già assemblato. Non era possibile non considerare gli elementi tutti insieme. La prefabbricazione è un ottimo strumento per Dfd, soprattutto se poi non vengono usati collegamenti chimici per il montaggio. L'assemblaggio del pannello non è banale perché di grandi dimensioni. Serve infatti l'utilizzo di un macchinario di sollevamento per la messa in posizione ed operai che giuntino i vari elementi. L'accesso al pacchetto avviene dall'alto una volta che è stata smantellata la finitura esterna. I pannelli si smonteranno quindi dall'alto verso il basso procedendo in verticale. Essendo i pannelli molto grandi e le giunzioni in numero non eccessivo, in mezza giornata si riesce a ricoprire la superficie di 10 metri quadri;
- **strato di protezione esterna comprensivo di finitura esterna e intonaco di biocalce:** Anche in questo caso gli strati sono stati considerati insieme perché, strettamente legati gli uni agli altri anche da un punto di vista fisico. Anche in questo caso come detto per lo strato adesivo in cemento, è applicabile da un semplice operaio ma è un composto chimico quindi non ideale ai fini della nostra ricerca. È legato al fibrocemento ed è lo strato più esterno. Per quanto riguarda le tempistiche, è necessario più tempo per poter svolgere tutte le operazioni, a causa del periodo di asciugatura degli strati. Infatti, senza che lo strato di intonaco di gesso sia asciutto non si potrà procedere con la finitura esterna;

### 5.2.3 ALIVA DEMO 2.0

In fase progettuale era stata valutata un'altra ipotesi, dotata di un grado ancora maggiore di circolarità, in termini di DfD. Tale soluzione è stata valutata e inserita nel presente lavoro di tesi per far vedere come realisticamente, con pochi accorgimenti, il cambio della finitura esterna avrebbe permesso un miglioramento notevole del valore complessivo della facciata. Si ricorda che tale soluzione costruttiva non è stata applicabile per via dei vincoli a cui l'edificio storico è sottoposto, oltre che per l'insufficiente tenuta strutturale della struttura muraria portante esistente, che avrebbe necessitato di interventi significativi di miglioramento strutturale.

La facciata in questione è realizzata riprendendo il pannello prefabbricato precedentemente descritto, legato al sistema ventilato ALI GLASS S [60]. La grandissima differenza la troviamo nello strato di protezione esterna, costituita da pannelli di ceramica sostenuti da una sottostruttura metallica. La struttura è composta da montanti verticali in lega di alluminio riciclato, trasversi legati ai montanti verticali, modellato ad hoc per la giunzione di elementi a clip che permettono al pannello di incastrarsi e ancorarsi al traverso. Gli elementi sono tutti prefabbricati e sagomati in fabbrica, realizzati con alluminio riciclato. In questo caso le giunzioni meccaniche risultano ridotte al minimo e le connessioni chimiche quasi inesistenti. Dalle figure seguenti è possibile capire la stratigrafia e la composizione del pacchetto.

La composizione delle stratigrafie è la seguente:

1. Isolamento Lana di vetro 120mm;
2. Laminato in acciaio di circa 1 mm;
3. Pannello in lana di roccia 80mm;
4. Ancoraggio di metallo attaccato al laminato;
5. Ancoraggio di metallo attaccato al muro portante;

6. Montanti verticali in alluminio riciclato;
7. traversi in lega di alluminio riciclato;
8. Clip di aggancio del pannello di ceramica;
9. lastra di ceramica.

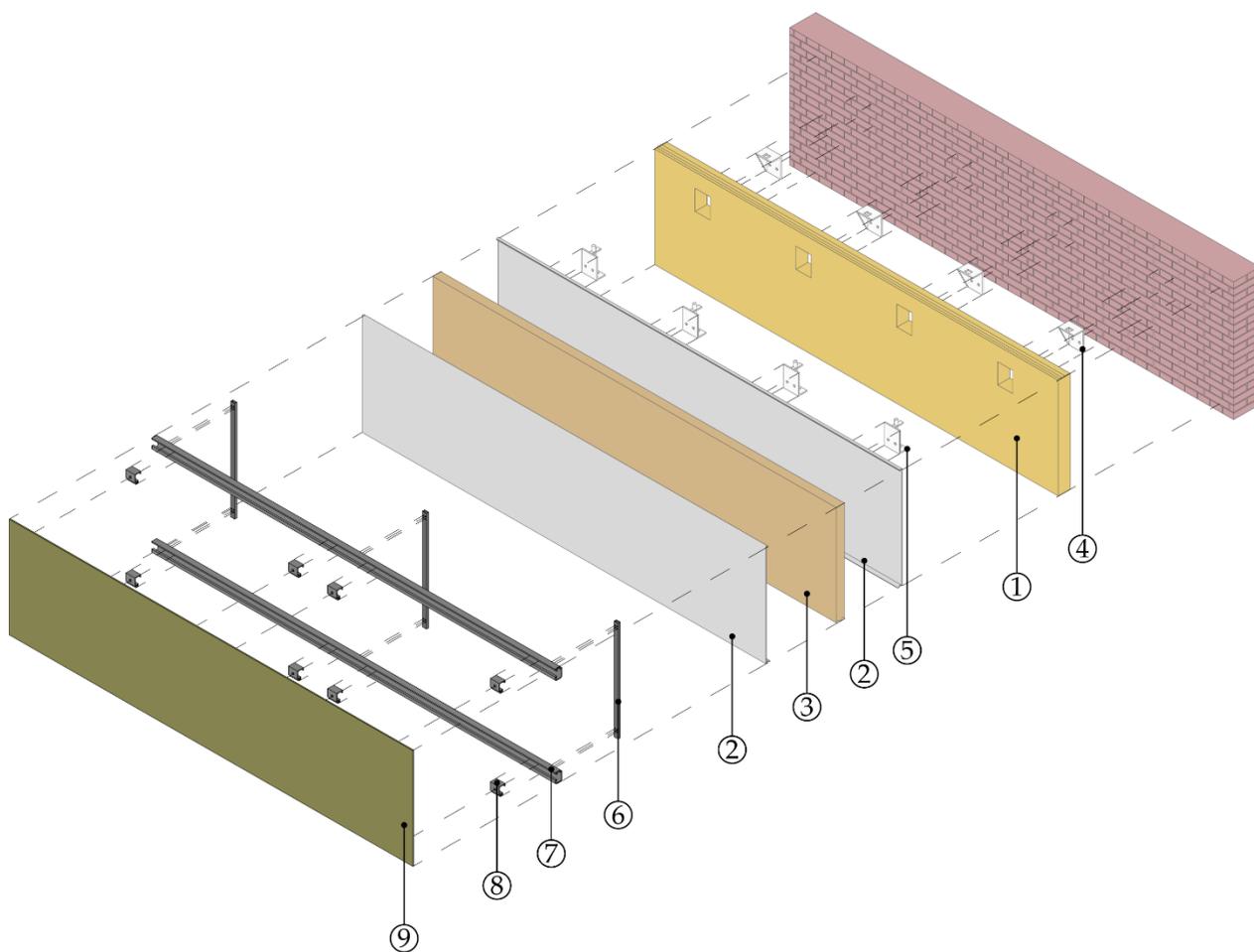


Figura 49 Esploso della soluzione ALIVA DEMO 2.0 realizzata con il software Revit

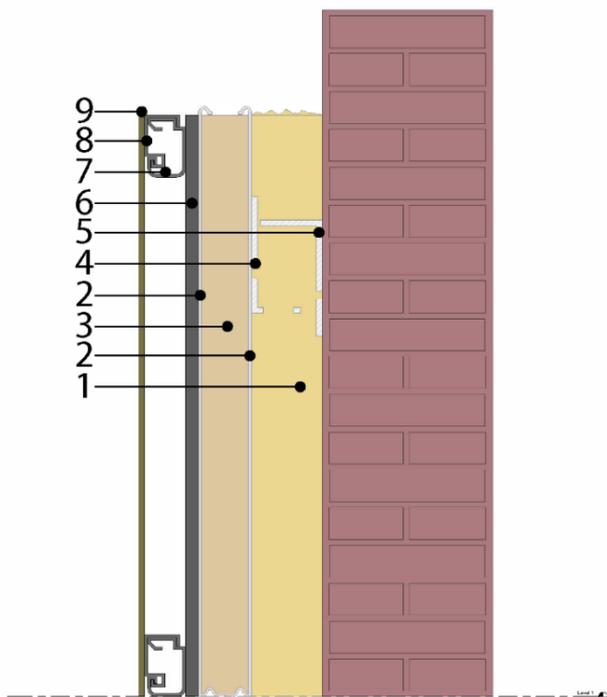


Figura 50 Sezione della soluzione ALIVA DEMO 2.0 realizzata con il software Revit

### 5.2.3.1 Valutazione dei parametri

Come per i casi precedenti andiamo a studiare nel dettaglio l'assegnazione dei parametri ai vari elementi. Nella tabella troviamo i valori complessivi di ogni parametro con una breve descrizione.

presentazione della soluzione adottata	stratigrafie	Parametri singoli oggetti								Parametri dei gruppi di elementi										
		Reversibilità / Tipo di connessione	Accessibilità	Trasportabilità (peso e dimensioni)	Potenzialità del fine vita	Durabilità (nel tempo)	Interdipendenza fra gli elementi	Contenimento formale	semplicità di assemblaggio	Accessibilità	tempo di assemblaggio (sup standard di 10m <sup>2</sup> di facciata)									
ALIVA DEMO 2.0: Sistema composto da pannello prefabbricato ALIVA DEMO con protezione esterna fatta da montanti e traversi in alluminio e finitura in porcellana	Isolamento di lana di vetro 120 mm Kniauf	connessione secca tramite viti alla lamiera metallica	1	accessibile con azioni aggiuntive che non causano danni	0,8	pannello prefabbricato pesante e necessario un mezzo leggero	0,4	riutilizzabile se non esposto all'acqua	1	resiste diversi anni se ben protetto	1	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	bloccato da pacchetto sandwich	0,4	assemblaggio meccanico fatto da più operatori e un mezzo di movimentazione	0,8	Accessibile con azioni che causano danni allo strato di protezione esterna ma non ai suoi componenti interni	0,8	Ipotizzando come per il caso ALIVA DEMO prefabbricato l'impiego di 70 ore per montare 190 m <sup>2</sup> sappiamo che ci vogliono 3 ore per 10m <sup>2</sup> circ.
	lamiera metallica 0.5 mm Isoparfire di Lattonedil	connesso con altri elementi per via meccanica	0,8	accessibile con azioni aggiuntive che causano danni riparabili	0,4	pannello prefabbricato pesante e necessario un mezzo leggero	0,4	riutilizzabile se separato dal pannello	1	piccolo spessore e degrada se esposto all'acqua	0,8	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	attaccato all'isolamento in lana di roccia	0,4					
	isolamento in lana di roccia 80 mm Isoparfire di Lattonedil	connessione secca	1	accessibile con azioni aggiuntive che causano danni riparabili	0,8	pannello prefabbricato pesante e necessario un mezzo leggero	0,4	riusabile facilmente scollandolo dalla lamiera	1	riqualificarlo dallo scollamento dalla lamiera	0,8	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	bloccato da lamiere metalliche	0,1					
	lamiera metallica 0.5 mm Isoparfire di Lattonedil	connesso con altri elementi per via meccanica	0,8	accessibile con azioni aggiuntive che causano danni riparabili	0,4	pannello prefabbricato pesante e necessario un mezzo leggero	0,4	riutilizzabile se separato dal pannello	1	piccolo spessore e degrada se esposto all'acqua	0,8	Sovrapposizione tra 1 o più oggetti pianificata	0,8	attaccato all'isolamento in lana di roccia	0,4					
	ancoraggi metallici attaccato lamierino metallico	elementi di connessione a secco	1	levato lo strato di finitura esterno gli ancoraggi sono facilmente raggiungibili	1	pannello prefabbricato pesante e necessario un mezzo leggero	0,4	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un piccolo elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	bloccati dai pannelli sandwich	0,4					
	ancoraggi metallici attaccati alla muratura portante	elementi di connessione a secco	1	una volta levato il pannello prefabbricato sono facilmente raggiungibili	1	diviso in piccoli elementi facilmente trasportabile	1	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un piccolo elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	bloccati dai pannelli sandwich	0,4					
	montanti in lega di alluminio tubolare verticali per fissaggio alla muratura	elementi di connessione semplici a secco	1	accessibile liberamente	1	diviso in piccoli elementi facilmente trasportabile	1	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	libero accesso togliendo il pannello	0,8					
	Traversi in lega di alluminio legati al tubolare verticale	elementi di connessione semplici a secco	1	accessibile liberamente	1	diviso in piccoli elementi facilmente trasportabile	1	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	libero accesso togliendo il pannello	0,8					
	Traversi in lega di alluminio a clip legati al pannello	elementi di connessione semplici a secco	1	accessibile liberamente	1	diviso in piccoli elementi facilmente trasportabile	1	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	libero accesso togliendo il pannello	0,8					
	pannelli in ceramica	applicati giuntandole a secco	1	accessibile liberamente	1	peso moderato per cui trasportabile da un singolo operatore	1	uno dei materiali che meno si degrada	1	esposto all'esterno ma riutilizzabile nel tempo	1	oggetto posizionato in modo modulare	1	nulla lo prelude	1					

Figura 51 Indicazione dei valori scelti per i dieci parametri con descrizione delle scelte per la soluzione ALIVA DEMO 2.0

Di seguito si riporta la valutazione degli elementi della protezione esterna, che rappresentano gli unici elementi innovativi rispetto alle soluzioni costruttive precedentemente illustrate. Tali elementi possono essere suddivisi in due categorie, ovvero gli elementi in lega di alluminio e il pannello ceramico.

- **montanti e traversi in lega di alluminio:** Utilizzare un materiale riciclato è di per sé un'azione virtuosa in termini di impatto ambientale e di riduzione degli agenti inquinanti. Tuttavia, questo procedimento non viene considerato nel calcolo dei parametri. Nonostante questo, i valori sono molto alti in quanto questi elementi sono reversibili, collegati tramite elementi meccanici o meglio incastrati gli uni agli altri geometricamente. Il sistema è appositamente studiato per essere il più accessibile possibile, posizionato in modo modulare e con libero accesso a tutti gli elementi semplicemente togliendo il pannello di ceramica che chiude la struttura. Gli elementi in alluminio sono facilmente trasportabili da un solo operaio e duraturi nel tempo viste le alte prestazioni chimiche e meccaniche. Per la potenzialità del fine vita è possibile riutilizzare tutti gli elementi o altresì riciclarli nuovamente;
- **pannelli di rivestimento ceramico:** [61] la produzione della ceramica si deve a popoli molto antichi. Al giorno d'oggi la ceramica viene utilizzata in moltissimi ambiti, tra cui quello edilizio. I pannelli utilizzati per coprire la facciata sono fatti industrialmente in serie e quindi hanno determinate caratteristiche riportate di seguito:
  - caratteristiche chimico fisiche:
    - porosità;
    - colore (da rossastro a bianco);
    - refrattarietà;
    - capacità di produrre acqua durante l'essiccamento.
  - proprietà meccaniche:
    - durezza;
    - resistenza alla penetrazione;
    - resistenza all'abrasione.
  - proprietà tecnologiche:
    - plasticità;
    - lavorabilità;
    - proprietà antibatteriche;
    - proprietà antinquinanti.

La ceramica industriale è definita "ceramica seriale" e viene realizzata, a differenza di quella artigianale, attraverso processi di lavorazione automatizzati. Se la ceramica artigianale, difficile da riprodurre, può vantare caratteristiche uniche, la ceramica industriale ha dalla propria parte la possibilità di possedere caratteristiche tecnologiche vincenti. Parliamo delle proprietà antinquinamento e antibatteriche. La salute umana e dell'ambiente, nell'ambito ceramico, sono ritenuti più che mai oggi due "temi caldi" ed estremamente importanti. Attualmente le aziende ceramiche possono produrre prodotti finiti dal bassissimo impatto ambientale grazie alle soluzioni contro il problema delle emissioni nocive nell'ambiente.

Secondo quanto è stato analizzato precedentemente, la ceramica è un materiale durevole e facilmente trasportabile in lastre, è possibile riutilizzarlo più volte. La tecnologia di collegamento è realizzata esclusivamente a secco, tramite gli elementi a clip, che permettono di non avere nessuna barriera per raggiungere gli elementi sotto. Le lastre sono i primi elementi che si incontrano nella parete e, quindi, sono facilmente raggiungibili e asportabili.

Successivamente si è passati a valutare con gli stessi criteri i **3 parametri che riguardano gli insiemi di più elementi**. Di seguito si riportano le motivazioni delle scelte effettuate. Nel progetto troviamo due tipi di agglomerati di elementi:

- **pannello prefabbricato composto da, lana di vetro, lana di roccia, e i relativi ancoraggi:** è l'insieme di elementi più corposo che comprende cinque elementi. Come già detto in precedenza è un pannello prefabbricato che arriva in cantiere già assemblato. Non era possibile non considerare gli elementi tutti insieme. La prefabbricazione è un ottimo strumento per Dfd, soprattutto se poi non vengono usati collegamenti chimici per il montaggio. L'assemblaggio del pannello non è banale perché di grandi dimensioni. Serve infatti l'utilizzo di un macchinario di sollevamento per la messa in posizione ed operai che giungono i vari elementi. L'accesso al pacchetto avviene dall'alto una volta che è stata smantellata la finitura esterna. I pannelli si smonteranno quindi dall'alto verso il basso procedendo in verticale. Essendo i pannelli molto grandi e le giunzioni in numero non eccessivo, in mezza giornata si riesce a ricoprire la superficie di 10 metri quadri;
- **strato di protezione esterna comprensivo di montanti verticali e trasversi in alluminio riciclato, clip di aggancio del pannello di ceramica e la lastra di ceramica:** I valori della seguente protezione esterna sono molto alti poiché si tratta di una soluzione reversibile, facilmente smontabile e accessibile. Si può notare che l'incastro per il pannello di ceramica avviene per via geometrica, quindi, non sarà necessario utilizzare alcun attrezzo da lavoro. Questo fatto inficerà anche nel tempo di montaggio che sarà molto rapido.

#### 5.2.4 ALI KL

È possibile, infine, prevedere un caso migliorativo che consenta di ottenere valori di EBCI nettamente superiori, in relazione ai parametri del DfD. Ricordiamo tuttavia che non è stato possibile adottare tale soluzione sull'edificio oggetto di analisi, per via del vincolo storico-documentale a cui esso è sottoposto.

Tenendo sempre presente che la struttura portante rimane quella in muratura storica, un prodotto che presenta le caratteristiche di reversibilità ricercate è il sistema ventilato dell'azienda ALIVA: ALI KL. Il sistema si discosta da quello Plug&Play realmente impiegato, e consente di massimizzare i concetti del DfD.

La stratigrafia complessiva è composta da due parti principali:

- lastra di isolante in lana di roccia condensata di spessore variabile in funzione delle esigenze di efficientamento energetico perseguite applicata con un sottilissimo strato di colla alla parete portante e per il fissaggio vengono utilizzati ancoraggi di metallo e tasselli in plastica di tipo Fisher come nel caso sopra descritto ETICS;
- come strato di protezione esterno troviamo un sistema realizzato da ALIVA denominato ALI KL, che è composto da: sistema con montanti verticali, realizzate in lega di alluminio riciclato, ed elementi

ad L per il fissaggio alla muratura portante. Sui montanti verticali vengono applicate delle placche in acciaio di piccole dimensioni con clips per il fissaggio di lastre o pannelli;



*Figura 52 Immagine della soluzione ALI KL presa dal sito ufficiale ALIVA [60]*

Con lo stesso procedimento espresso precedentemente si sono realizzati i vari elementi su revit per avere un output diretto dal software. Nel complesso ci aspettiamo dei valori molto più alti dei singoli elementi (e quindi anche dell'EBCI) in quanto tutti gli elementi sono applicati a secco, tramite semplici strumentazioni e in modo del tutto reversibile.

Visto l'utilizzo dello strumento BIM, si sono riportati i diversi strati su revit per riprodurre l'intera sovrastruttura, a cui poter applicare i diversi parametri. Nella figura sottostante possiamo vedere l'esploso della soluzione di facciata e la stratigrafia realizzato nel software.

La stratigrafia degli elementi è così composta:

1. Strato adesivo di malta adesiva;
2. Isolamento in lana di roccia Frontrock Max Plus (Rockwool) 200mm;
3. Elementi per fissaggio del pannello (Fischer di plastica e vite di metallo);
4. Montanti in lega d'alluminio riciclato a T;
5. Elemento di fissaggio ad L;
6. Pannelli in gres porcellanato 10mm.

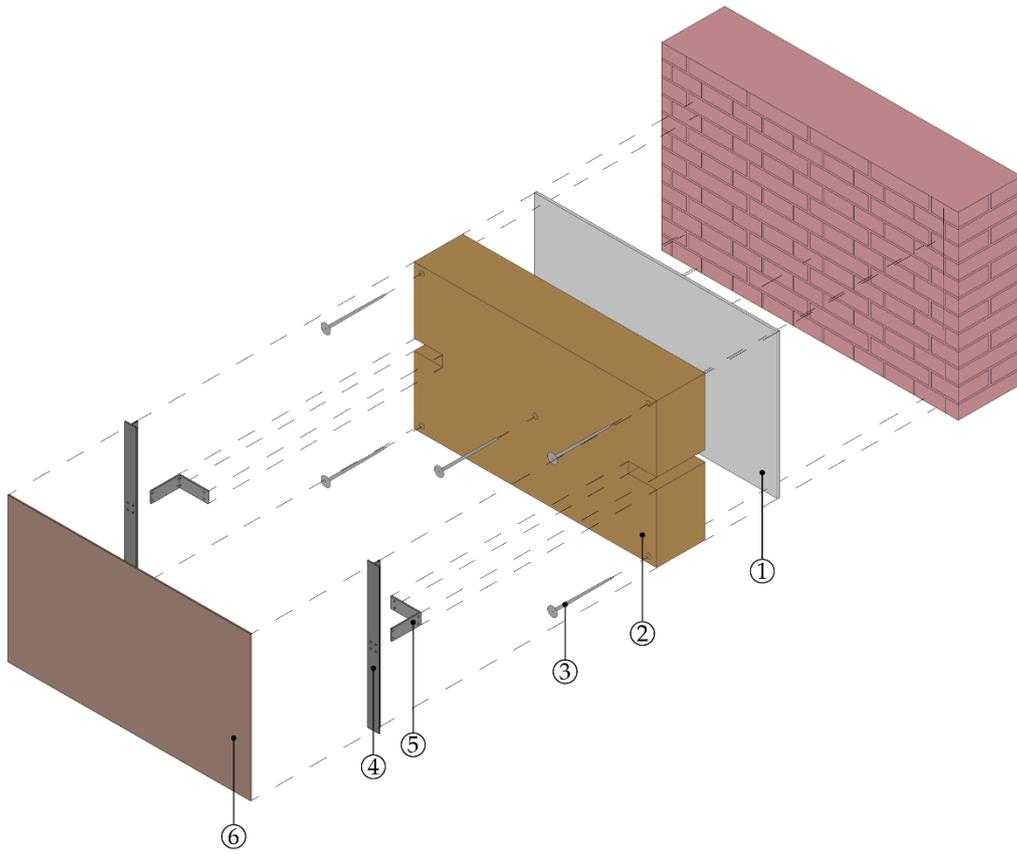


Figura 53 Esploso della soluzione ALI KL realizzata con il software Revit

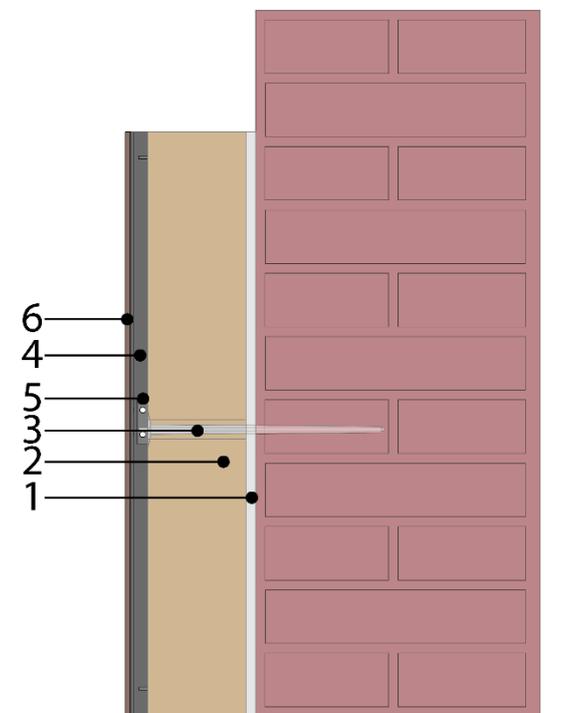


Figura 54 Sezione della soluzione ALI KL realizzata con il software Revit

### 5.2.4.1 Valutazione dei parametri

Come per i casi precedenti andiamo a studiare nel dettaglio l'assegnazione dei parametri ai vari elementi. Nella tabella troviamo i valori complessivi di ogni parametro con una breve descrizione.

presentazione della soluzione adottata	Stratigrafie	Parametri singoli oggetti										Parametri dei gruppi di elementi									
		Reversibilità / Tipo di connessione		Accessibilità		Trasportabilità (peso e dimensioni)		Potenzialità del fine vita		Durabilità (nel tempo)		Interdipendenza fra gli elementi		Contenimento formale		semplicità di assemblaggio		Accessibilità		tempo di assemblaggio (sup standard di 10m*2 di facciata)	
ALI KL - Sistema composto da isolante in lana di roccia condensata di spessore 20 cm, protetto da un sistema di montanti e elementi di fissaggio per uno strato protettivo in gres	strato di malta adesiva	legante chimico	0,1	non accessibile	0,1	trasportato in sacchi	0,8	non riutilizzabile	0,1	non è riutilizzabile dopo la prima applicazione	0,1	completa integrazione fra gli oggetti	0,1	chiuso da strato di muratura interno e isolamento EPS	0,4	strato gettato da operai con strumenti semplici	1	è il primo strato della soluzione	0,1	circa un giorno considerando anche l'asciugatura	0,4
	isolamento in lana di roccia Frontröck Max Plus della rockwool	pannello giuntato a secco e con la malta adesiva	0,4	accessibile con azioni che causano danni riparabili	0,4	Facile da trasportare perché separato in blocchi	1	riutilizzabile in quanto non si degrada	1	è un isolante che non si deteriora	1	sovrapposizione e tra uno o più oggetti	0,8	chiuso dagli altri pannelli	0,4	assemblaggio meccanico fatto da un operatore	1	chiuso ai lati dagli altri pannelli mentre dietro ha la muratura e davanti ha la finitura esterna	0,1	il pacchetto si presenta in pezzi di dimensione 50x100 per cui per gli operai è di veloce montaggio	0,8
	ancoraggi di metallo	elementi di connessione semplici	1	accessibile liberamente	1	Facile da trasportare perché di piccole dimensioni e peso	1	riutilizzabili	1	non si deteriora se non esposto ad acqua e umidità	0,8	zonizzazione modulare	1	nessuna inclusione	1						
	tasselli di plastica tipo fischer	elemento applicato a secco ma non reversibile	0,1	accessibile una volta smontato tutto il pannello senza danni	0,8	Facile da trasportare perché di piccole dimensioni e peso	1	raccolta differenziata della plastica	0,4	è per il singolo utilizzo	0,1	completa integrazione fra gli oggetti	0,1	incastrato nella muratura portante	0,1	assemblaggio meccanico fatto da un semplice operatore	1	accessibile liberamente dall'esterno	1	considerando che l'assemblaggio è solo meccanico i tempi non sono lunghi	0,8
	montanti in lega di alluminio verticali per fissaggio a parete	elementi di connessione semplici a secco	1	accessibile liberamente	1	diviso in piccoli elementi facilmente trasportabile	1	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un piccolo elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	libero accesso semplicemente togliendo il pannello	0,8						
	Elementi ad L per fissaggio dei pannelli	elementi di connessione semplici a secco	1	accessibile liberamente	1	diviso in piccoli elementi facilmente trasportabile	1	riutilizzabile in quanto non si degrada facilmente	1	è un piccolo elemento di metallo che se non esposto all'acqua difficilmente si deteriora	0,8	oggetto posizionato in modo modulare	1	libero accesso semplicemente togliendo il pannello	0,8						
	pannelli in gres porcellanato	applicate giuntandole a secco	1	accessibile liberamente	1	peso moderato per cui trasportabile da un singolo operaio	1	uno dei materiali che meno si degrada quindi riutilizzabile	1	esposto all'esterno ma riutilizzabile nel tempo	1	oggetto posizionato in modo modulare	1	nulla lo preclude	1						

Figura 55 Indicazione dei valori scelti per i dieci parametri con descrizione delle scelte per la soluzione ALI KL

Di seguito andiamo a spiegare le valutazioni dei vari parametri per questa soluzione di facciata.

- Isolamento termico in lana di roccia (Frontröck Max Plus dell'azienda Rockwool):** Pannello rigido in lana di roccia non rivestito a doppia densità, per isolamento termico e acustico, specificamente concepito per sistemi termoisolanti a cappotto. Il pannello viene sottoposto ad un trattamento specifico nel processo produttivo che lo rende idoneo alle severe condizioni di utilizzo tipiche dell'isolamento dall'esterno. Il prodotto correttamente installato presenta il lato a densità superiore, caratterizzato da apposita marchiatura, rivolto verso l'esterno. Le principali proprietà sono le seguenti:
  - prestazioni termiche: grazie al valore di conduttività, il pannello è ideale per la realizzazione di involucri edilizi ad alta efficienza;
  - facilità e rapidità di installazione: il pannello, leggero e maneggevole, consente una maggior facilità di posa ed inoltre, grazie al formato, permette di velocizzare la fase d'installazione;
  - proprietà acustiche: la struttura a celle aperte della lana di roccia contribuisce significativamente al miglioramento delle prestazioni fonoisolanti della parete su cui il pannello viene installato;
  - permeabilità al vapore: il pannello, grazie ad un valore di  $\mu$  pari a 1, consente di realizzare pacchetti di chiusura "traspiranti";

- stabilità dimensionale: il pannello non subisce variazioni dimensionali o prestazionali al variare delle condizioni termiche e igrometriche dell'ambiente (caratteristica estremamente importante per la durabilità del sistema a cappotto);
- comportamento al fuoco: il pannello, incombustibile, in caso di incendio non genera né fumi né gocce; aiuta inoltre a prevenire la propagazione del fuoco e contribuisce ad incrementare le prestazioni di resistenza al fuoco dell'elemento costruttivo in cui è installato;

La lana di roccia è un materiale che è già stato valutato nel caso del pacchetto sandwich ALIVA DEMO precedentemente discusso. Tuttavia, i valori cambiano, in quanto, in questo caso si tratta di una lastra di isolamento trattata in autonomia e separata dagli altri elementi. Il sistema di fissaggio è costituito da un sottile strato di colla, combinato a tasselli in plastica e ad ancoraggi di metallo analoghi a quelli già analizzati in precedenza per la soluzione ETICS. Il pannello è reversibile e duraturo se non esposto costantemente all'acqua, e quindi riutilizzabile. Il prodotto si presenta sotto forma di lastre di diverse dimensioni che, grazie al loro peso contenuto, possono essere trasportate facilmente anche da un singolo operaio. Lo strato isolante così costituito è posizionato in maniera modulare, senza interagire con altri elementi, e risulta accessibile mediante azioni che non causano danni ad altri materiali, semplicemente togliendo protezione esterna in grès.

- **staffe e montanti verticali in alluminio riciclato:** oltre che essere in materiale riciclato, che rende ancora più virtuoso il loro utilizzo, questi elementi sono, leggeri, montati a secco ed estremamente reversibili. Accessibili semplicemente disincastrando i pannelli in gres, svitando questi elementi possono essere riutilizzati. Sono molto resistenti e duraturi, e applicati in modo modulare senza alcuna interdipendenza con altri elementi;
- **pannelli in grès porcellanato:** il grès porcellanato è uno dei materiali più moderni e adatti ad essere utilizzato come paramento nei sistemi di facciata ventilata, grazie alle sue ottime caratteristiche meccaniche ed estetiche. Grazie alla forte pressatura a cui è sottoposto inizialmente e all'elevata temperatura di cottura, presenta le seguenti caratteristiche meccaniche:
  - elevata compattezza;
  - alta resistenza a compressione;
  - ottima sopportazione del calpestio;
  - alta resistenza all'abrasione;
  - marcata durezza e resistenza all'usura;

Tutte queste caratteristiche sopra elencate rendono il gres porcellanato per esterni un materiale in grado di resistere e gestire senza il minimo affanno sollecitazioni esterne importanti, frequenti e protratte nel tempo.

Detto ciò, il pannello è applicato a secco, facilmente trasportabile se si utilizzano lastre di dimensioni ridotte ed estremamente duraturo. È accessibile liberamente dall'esterno infatti nulla lo preclude. Per essere smontato bisognerà solamente sganciarlo dai clip. In conclusione, rappresenta a tutti gli effetti un materiale e un sistema costruttivo perfetto per le caratteristiche si ricercano per il DfD.

Successivamente si è passati a valutare con gli stessi criteri i **3 parametri che riguardano gli insiemi di più elementi**. Di seguito si riportano le motivazioni delle scelte effettuate. Nel progetto troviamo tre tipi di agglomerati di elementi:

- **strato malta adesiva:** è un solo elemento che si contraddistingue in quanto è applicato come prima cosa sulla parete esistente. È necessario per applicare i pannelli in lana di roccia. È semplice da applicare ma il basso punteggio è dato dal fatto che è un legante chimico, per cui nonostante sia applicabile da un solo operaio con strumenti facili, non è ottimale per la decostruzione. È il primo

strato della parete per cui non è facile accedervi e il tempo di assemblaggio considerando 10 m<sup>2</sup> è di mezza giornata considerando anche il tempo per l'applicazione dei pannelli;

- **isolamento in lana di roccia, compresi gli ancoraggi:** questo insieme di elementi è molto interessante in quanto andiamo a considerare il pannello di lana di roccia con gli ancoraggi di metallo e i tasselli di plastica Fisher. È necessario considerarli insieme in quanto strettamente collegati per avere un lavoro finito. È semplice come assemblaggio tanto da poter essere svolto da una sola persona, si svolge a secco, ed una volta eliminato lo strato di finitura esterna è possibile rimuovere gli ancoraggi metallici per riutilizzare il pannello. L'EPS si presenta in pezzi di dimensioni 50x100 cm per cui è facilmente manovrabile da un solo operaio che in mezza giornata riesce a montare i pannelli per ricoprire l'intera area di 10 m<sup>2</sup>;
- **strato di protezione esterna comprensivo di montanti in lega d'alluminio riciclato a T elemento di fissaggio ad L e pannelli in gres porcellanato:** I valori dello strato di protezione esterna in questione sono molto alti, questo perché è un sistema reversibile e duraturo, realizzato in alluminio riciclato. È facilmente accessibile e smontabile. L'assemblaggio è svolto da un solo operatore con semplici attrezzi da lavoro. I pannelli in gres sono di dimensioni ridotte quindi per coprire 10 m<sup>2</sup> sarà necessario impiegare almeno una giornata di lavoro.

### 5.3 INDICE DI VALUTAZIONE COMPLESSIVO

Per poter avere un'idea del livello di Design for Disassembly dei singoli elementi, della parete o dell'intero progetto, è stato necessario definire un indice di valutazione complessivo.

Il seguente metodo, elaborato da Cecilia Mazzoli et al. [5] è valido per ogni studio che, presi in considerazione diversi parametri con un valore assegnato, elabora un valore compreso tra 0,1 e 1 come output finale. Di seguito è riportata lo studio di tale indice svolto nell'ambito di precedenti ricerche, presso il Dipartimento di Architettura di UNIBO che ha portato alla definizione del metodo "EASY – Express methodology for the Assessment of the circularity level"

La valutazione della circolarità, per il loro progetto, è proceduta attraverso le seguenti fasi:

- una prima media ponderata dei quattro criteri di smontaggio (Tipo di Connessioni, Accessibilità delle Connessioni, Incroci, Contenimento della forma) che fornisce il parametro denominato DfD;
- una seconda media tra i parametri DfD, Material Origin e Reusability, che fornisce un indicatore della circolarità applicata a ciascun materiale: il PCI<sub>j</sub>

$$PCI_j = (DfD_j + MO_j + RU_j) / 3$$

- Il parametro finale rappresenta un coefficiente che deve essere moltiplicato per la massa, l'Embodied Energy (EE) ed Embodied Carbon (EC) di ciascun materiale elencato al fine di definire l'indicatore di circolarità del prodotto (PCI) per ciascun componente elencato.

Il PCI indica tre valori distinti:

1. Massa [kg]: corrispondente alla quantità di massa indicativamente riutilizzabile come a seguito di considerazioni di capacità di smontaggio, origine dei materiali e riutilizzabilità dei materiali;
2. EE [MJ]: corrispondente all'energia incorporata ancora nel materiale considerato;
3. EC [kgCO<sub>2</sub>/kg]: corrispondente al carbonio incorporato nel materiale considerato.

$$MassPCI_j = Mass_j \cdot PCI_j$$

$$EEPCI_j = EE_j \cdot PCI_j$$

$$ECPCI_j = EC_j \cdot PCI_j$$

Una volta determinato il PCI per ciascun materiale, è possibile valutare l'Express Building Circularity Indicator (EBCI), per l'intero edificio. **La formula utilizzata collega il PCI di ciascun materiale alla massa corrispondente al fine di ottenere un valore medio ponderato**, che rappresenta l'EBCI globale. L'EBCI è quindi composto da tre indicatori che sono:

- Massa [kg]: corrisponde alla massa ponderata del PCI per ogni prodotto diviso per la massa totale dell'edificio;
- EE [MJ]: corrisponde all'EE ponderato del PCI per ogni prodotto diviso per l'EE totale dell'edificio;
- EC [kgCO<sub>2</sub>/kg]: corrisponde alla EC ponderata per il PCI per ogni prodotto divisa per la CE totale dell'edificio.

$$EBCI_{Mass} = \sum_{j=1}^N MassPCI_j / \sum_{j=1}^N Mass_j$$

$$EBCI_{EE} = \sum_{j=1}^N EEPCI_j / \sum_{j=1}^N EE_j$$

$$EBCI_{EC} = \sum_{j=1}^N ECPCI_j / \sum_{j=1}^N EC_j$$

Infine, al fine di ottenere un **unico indicatore finale** globale che tenga conto della massa di materiali utilizzati, dell'EE e della EC, viene eseguita la media aritmetica dei tre indicatori sopra citati:

$$EBCI_{tot} = (EBCI_{Mass} + EBCI_{EE} + EBCI_{EC}) / 3$$

L'EBCI finale è espresso numericamente in un range da 0,1 a 1, per rappresentare il livello di circolarità di un intero edificio. Per rendere chiara la classificazione anche all'utente finale, può essere espressa nella seguente scala:

- EBCI < 0,60 basso livello di circolarità;
- EBCI ≥ 0,60 livello medio di circolarità;
- EBCI ≥ 0,80 alto livello di circolarità;

L'indice EBCI finale relativo a massa ( $EBCI_{Mass}$ ), all'energia incorporata ( $EBCI_{EE}$ ) e al carbonio incorporato ( $EBCI_{EC}$ ) fornisce una panoramica approssimativa della quantità di EE e EC che possono essere recuperati dai vari materiali e dalla quantità che finirà in discarica a causa della bassa circolarità dei materiali. Infatti, sebbene il metodo si basi sull'uso di coefficienti moltiplicativi che non consentono un valore di massa, EE e EC che rappresenti reali quantità residue all'interno dei materiali, **fornisce un'indicazione chiara e immediata della circolarità di ciascun materiale utilizzato e in atto nell'edificio**. Il potenziale recuperabile finale - in termini di massa, EE e CE - rappresenta un risultato importante, come parametro riassuntivo per valutare rapidamente l'impatto di una soluzione edilizia. La ricerca condotta nell'ambito del progetto DRIVE 0 ha dimostrato l'affidabilità di questo risultato, anche se **non si basa su un'analisi dei dati eccessivamente complessa o dispendiosa in termini di tempo**. Pertanto, il metodo può essere considerato un valido strumento di supporto decisionale per valutare l'impatto ambientale di un intervento. Questa metodologia può essere applicata all'intero edificio, al fine di valutare l'indicatore di circolarità complessiva dell'edificio, ma può anche essere limitata a soluzioni specifiche per valutare diverse alternative e scegliere quella più adatta, valutando così l'EBCI per un componente specifico. Questa valutazione è importante perché fornisce uno strumento per supportare scelte progettuali che intendono adottare una strategia circolare (eventualmente con il supporto di strumenti digitali).

Nel presente lavoro di tesi il procedimento seguito è stato molto simile. Come si può vedere dalla figura sotto, si è lavorato a partire dal file Excel che è stato estrapolato da Revit. Nelle prime due colonne sono riportate le medie dei valori dei parametri degli elementi e dei pacchetti. I valori sono compresi da 0,1 e 1 e da subito si può intuire quali elementi siano i più performanti per il DfD. Seguendo le indicazioni riportate nei file del progetto di Argelato (APPENDICE A) si è riportato il volume (V) di materiale utilizzato con la relativa densità (D). Per ottenere l'ammontare totale di materiale in kg ( $AM_{tot}$ ) si è moltiplicata la densità con la quantità in  $m^3$ . Tuttavia, per ottenere un valore che fosse confrontabile e il più possibile indipendente, si è diviso l' $AM_{tot}$  per la superficie della facciata (Il calcolo è stato effettuato su AUTOCAD come si può vedere dalla figura 50), così da ottenere un risultato espresso in  $kg/m^2$ . Moltiplicando l'ultimo numero trovato per la media dei valori degli oggetti, si ottiene il PCI dei singoli elementi. Per ricavare l'EBCI, e quindi l'indicatore finale di circolarità complessivo relativo alla soluzione di facciata in questione, si è calcolato l'ammontare totale del materiale utilizzato e si è moltiplicato per la somma della massa totale. Da questa operazione, ne deriva un valore compreso tra 0 e 1.

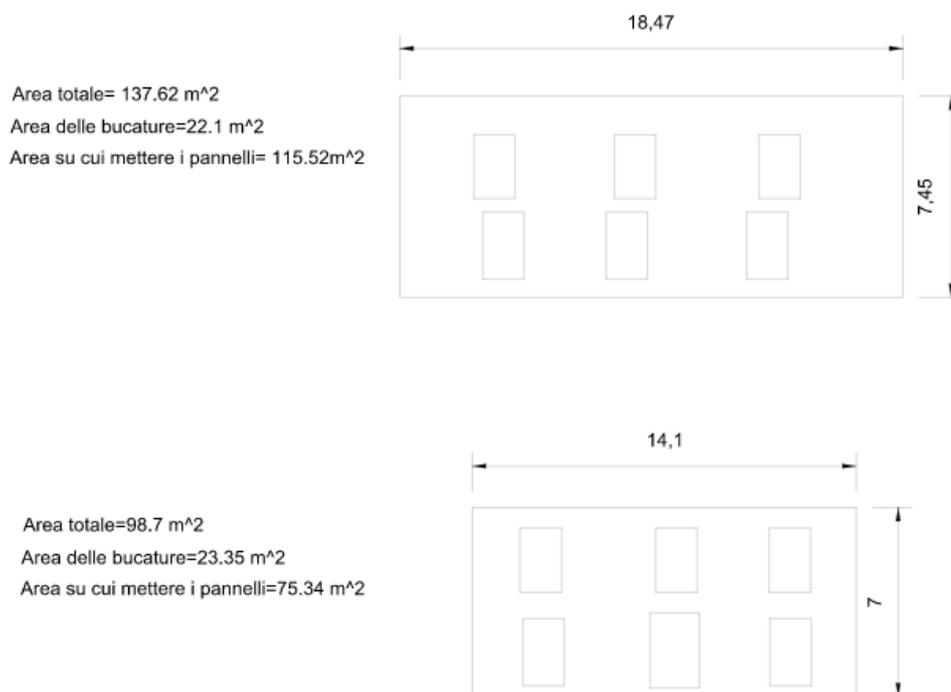


Figura 56 Calcolo dell'area della facciata in m<sup>2</sup>

STRATI DELLE SOLUZIONI ADOTTATE	MEDIE DEI VALORI DEGLI OGGETTI	MEDIE DEI VALORI DEI PACCHETTI	QUANTITA' in m <sup>3</sup>	DENSITA' (Kg/m <sup>3</sup> )	AMMONTARE TOTALE DI MATERIALE in kg	AMMONTARE TOTALE DI MATERIALE in kg/m <sup>2</sup>	(PCI)
strato malta adesiva	0,243	0,500	0,150	12,000	1,800	0,009	0,002
isolamento EPS (200mm)	0,714	0,633	45,360	17,500	793,800	4,178	2,984
ancoraggi di metallo	0,971		0,050	7850,000	392,500	2,066	2,007
tasselli di plastica tipo fischer	0,371		0,050	4,000	0,200	0,001	0,0004
rete di fibra di vetro	0,371	0,500	0,150	12,000	1,800	0,009	0,004
strato di intonaco di biocalce 1 cm	0,271		3,780	1440,000	5443,200	28,648	7,776
finitura esterna 1 cm	0,357		0,250	1600,000	400,000	2,105	0,752

Tabella 15 Dati di calcolo per la soluzione ETICS

STRATI DELLE SOLUZIONI ADOTTATE	MEDIE DEI VALORI DEGLI OGGETTI	MEDIE DEI VALORI DEI PACCHETTI	QUANTITA' in m <sup>3</sup>	DENSITA' (Kg/m <sup>3</sup> )	AMMONTARE TOTALE DI MATERIALE in kg	AMMONTARE TOTALE DI MATERIALE in kg/m <sup>2</sup>	(PCI)
isolamento di lana di vetro 120 mm Knauf	0,829	0,800	26,260	18,000	472,680	2,488	2,061
foglio di metallo per trattenere il materiale isolante 0.5 mm Isoparfire di Lattenedil	0,714		0,030	7850,000	235,500	1,239	0,885
isolamento in lana di roccia 80 mm Isoparfire di Lattenedil	0,700		17,500	100,000	1750,000	9,211	6,447
foglio di metallo per trattenere il materiale isolante 0.5 mm Isoparfire di Lattenedil	0,714		0,030	7850,000	235,500	1,239	0,885
tavola di fibrocementi 12.5 mm ACQUAPANEL	0,771		2,840	1150,000	3266,000	17,189	13,260
ancoraggi metallici attaccato lamierino metallico	0,800		0,060	7850,000	471,000	2,479	1,983
ancoraggi metallici attaccati alla muratura portante	0,886	0,060	7850,000	471,000	2,479	2,196	
strato di intonaco di biocalce 1 cm	0,271	0,300	3,280	1440,000	4723,200	24,859	6,747
finitura esterna 1 cm	0,357		0,220	1600,000	352,000	1,853	0,662

Tabella 16 Dati di calcolo per la soluzione ALIVA DEMO

Per calcolare i valori nel caso della soluzione ALIVA DEMO 2.0 non tutti i valori di volume e densità erano disponibili. Infatti, se per il pannello prefabbricato sopra descritto tutte le quantità erano presenti per i montanti, i traversi e i pannelli in ceramica i dati sono stati calcolati:

- Montanti in lega di alluminio: si è calcolato la lunghezza totale in metri delle aste presenti nella facciata. Considerando che i pannelli verranno posizionate ogni 0,6 m, dividendo la lunghezza delle pareti per 0,6

si ottiene quante aste verticali saranno necessarie (43). Moltiplicando questo numero per l'altezza della parete di 7,45 m si ottiene il valore lineare (320 m). Considerando ora l'area delle aste a forma di T che approssimativamente è di 0,0004 m<sup>2</sup>, si moltiplica questo valore per la lunghezza totale precedentemente trovata e si ricavano i metri cubi di materiale necessario che saranno circa 0,128 m<sup>3</sup>;

- Traversi in lega di alluminio sagomati: si è calcolato la lunghezza totale in metri dei traversi presenti nella facciata. Considerando che i pannelli verranno posizionate ogni 0,3 m, dividendo l'altezza delle pareti per 0,3 si ottiene quante aste orizzontali saranno necessarie (24). Moltiplicando questo numero per la lunghezza delle pareti di 18,47 e 14,1 m si ottiene il valore lineare delle aste in alluminio (781,68). Considerando che lo spessore dell'elemento è di circa 0,005 m allora l'area dei traversi sagomati approssimativamente è di 0,0012 m<sup>2</sup>. Se si moltiplica questo valore per la lunghezza totale precedentemente trovata si ricavano i metri cubi di materiale necessario che saranno circa 0,937 m<sup>3</sup>;
- Elementi in lega di alluminio a Clip: Considerando che il numero dei pannelli è approssimativamente 1055 (dividendo l'area totale delle facciate per l'area del pannello). Se consideriamo che ci saranno 4 clip a pannello allora ci saranno 4220 clip. La lunghezza del clip è approssimativamente di 0,088 m e la sua area è di 0,0011 m<sup>2</sup>. Il volume di un singolo clip è di 0,00009 m<sup>3</sup> che moltiplicato per il numero dei clip totali mi darà il volume totale da noi ricercato (0,4 m<sup>3</sup>).
- Pannelli in ceramica: considerando lo spessore del pannello di 0,01 m (ovvero 1 cm), questo valore è stato moltiplicato per l'area totale della facciata, risultante 190 m<sup>2</sup>. Il totale è di 1,9 m<sup>3</sup>.

STRATI DELLE SOLUZIONI ADOTTATE	MEDIE DEI VALORI DEGLI OGGETTI	MEDIE DEI VALORI DEI PACCHETTI	QUANTITA' in m <sup>3</sup>	DENSITA' (Kg/m <sup>3</sup> )	AMMONTARE TOTALE DI MATERIALE in kg	AMMONTARE TOTALE DI MATERIALE in kg/m <sup>2</sup>	(PCI)
isolamento di lana di vetro 120 mm Knauf	0,657	0,800	26,260	18,000	472,680	2,488	1,635
foglio di metallo per trattenere il materiale isolante 0.5 mm Isoparfire di Lattonedil	0,543		0,030	7850,000	235,500	1,239	0,673
isolamento in lana di roccia 80 mm Isoparfire di Lattonedil	0,629		17,500	100,000	1750,000	9,211	5,789
foglio di metallo per trattenere il materiale isolante 0.5 mm Isoparfire di Lattonedil	0,543		0,030	7850,000	235,500	1,239	0,673
ancoraggi metallici attaccato lamierino metallico	0,757		0,060	7850,000	471,000	2,479	1,877
ancoraggi metallici attaccati alla muratura portante	0,886		0,060	7850,000	471,000	2,479	2,196
montanti in lega di alluminio tubolare verticali per fissaggio alla muratura	0,829	0,933	0,128	7850,000	1004,800	5,288	4,382
Traversi in lega d'alluminio legati al tubolare verticale	0,829		0,937	7850,000	7355,450	38,713	32,076
Traversi in lega d'alluminio a clip legati al pannello	0,829		0,400	7850,000	3140,000	16,526	13,693
pannelli in ceramica	0,829		1,900	1400,000	2660,000	14,000	11,600

Tabella 17 Dati di calcolo per la soluzione ALIVA DEMO 2.0

Seguendo lo stesso procedimento dei casi precedenti si sono calcolati i valori per la soluzione ALI KL. In questo caso, tuttavia, alcuni dati non erano presenti. Infatti, il calcolo per la quantità di grès, di staffe e montanti verticali in alluminio non era specificato. I dati necessari erano la densità, trovata dal sito [62], mentre il calcolo dei m<sup>3</sup>, necessari sono stati svolti nel seguente modo:

- pannelli in grès: considerando lo spessore del pannello di 0,01 m (ovvero 1 cm), questo valore è stato moltiplicato per l'area totale della facciata, risultante 190 m<sup>2</sup>. Il totale è di 1,9 m<sup>3</sup>;
- montanti in alluminio: si è calcolato la lunghezza totale in metri delle aste presenti nella facciata. Considerando che i pannelli verranno posizionate ogni 0,6 m, dividendo la lunghezza delle pareti per 0,6 si ottiene quante aste verticali saranno necessarie (43). Moltiplicando questo numero per l'altezza della parete di 7,45 m si ottiene il valore lineare (320 m). Considerando ora l'area delle aste a forma di T che approssimativamente è di 0,0004 m<sup>2</sup>, si moltiplica questo valore per la lunghezza totale precedentemente trovata e si ricavano i metri cubi di materiale necessario che saranno circa 0,128 m<sup>3</sup>;
- Elementi ad L per la giunzione del pannello: considerando che possiamo calcolare l'area dell'elemento ad L che è di circa 0,0012 m<sup>2</sup> moltiplicando questo valore per la lunghezza dell'elemento si ottiene il volume che è di circa 0,000054 m<sup>3</sup>. Calcolando che ci vorranno 2 elementi ad L per ogni pannello si otterrà come volume totale 0,11 m<sup>3</sup>.

STRATI DELLE SOLUZIONI ADOTTATE	MEDIE DEI VALORI DEGLI OGGETTI	MEDIE DEI VALORI DEI PACCHETTI	QUANTITA' in m <sup>3</sup>	DENSITA' (Kg/m <sup>3</sup> )	AMMONTARE TOTALE DI MATERIALE in kg	AMMONTARE TOTALE DI MATERIALE in kg/m <sup>2</sup>	(PCI)
strato malta adesiva	0,414	0,500	0,150	12,000	1,800	0,009	0,004
isolamento in lana di roccia Frontrock Max Plus della rockwool	0,714	0,633	45,360	100,000	4536,000	23,874	17,053
ancoraggi di metallo	0,971		0,050	7850,000	392,500	2,066	2,007
tasselli di plastica tipo fischer	0,586		0,050	4,000	0,200	0,001	0,001
montanti in lega di alluminio verticali per fissaggio a parete	0,943	0,933	0,128	2700,000	345,600	1,819	1,715
Elementi ad L per fissaggio dei pannelli	0,943		0,110	7850,000	863,500	4,545	4,285
pannelli in gres porcellanato	1,000		1,900	1400,000	2660,000	14,000	14,000

Tabella 18 Dati di calcolo per la soluzione ALI KL

In conclusione, si riporta una tabella riassuntiva dell'ammontare totale del materiale, della massa totale e il relativo EBCI:

	TOTALE DELL'AMMONTARE TOTALE DEL MATERIALE (Kg/m <sup>2</sup> )	MASSA TOTALE	EBCI
ETICS	37,02	13,53	0,37
ALIVA DEMO	63,04	38,07	0,60
ALIVA DEMO 2.0	93,66	74,59	0,80
ALI KL	46,31	39,06	0,84

Tabella 19 Tabella riassuntiva dei valori dell'EBCI per ogni soluzione analizzata

Come descritto sopra per calcolare l'EBCI dovremmo dividere la massa totale per il totale "dell'ammontare totale del materiale". Per rendere chiara la classificazione anche all'utente finale, può essere espressa nella seguente scala:

- EBCI < 0,60 basso livello di circolarità;
- EBCI ≥ 0,60 livello medio di circolarità;
- EBCI ≥ 0,80 alto livello di circolarità;

L'EBCI della soluzione ETICS è risultato decisamente basso, pari a 0,37, indicando un basso grado di circolarità, secondo i parametri utilizzati. Il valore dell'EBCI si alza a 0,6 per la soluzione di facciata ALIVA DEMO: l'ottenimento di un livello medio di circolarità è reso possibile dall'utilizzo di materiali e tecniche costruttive maggiormente conforme ai concetti di reversibilità espressi in precedenza. Come si può vedere il valore è notevolmente più alto nelle soluzioni ipotizzate non realmente applicabili. Questo è principalmente dovuto al cambiamento della protezione esterna con un sistema a secco e reversibile. L'ALIVA DEMO 2.0 risulta leggermente più basso a causa della scarsa trasportabilità del pannello prefabbricato e della giunzione tra gli elementi all'interno.

## 6 CONCLUSIONI

---

### 6.1 UTILITÀ DEL PROCESSO

Come abbiamo precedentemente visto, gli studi in letteratura in ambito di circolarità e DfD sono numerosissimi. I risultati in termini di definizione degli indicatori di circolarità e di elaborazione di metodi per la valutazione del grado di circolarità sono molteplici, anche se nessuno di questi è ancora stato, purtroppo, implementato all'interno dei processi progettuali comunemente adottati dai professionisti e dalle aziende. Uno dei principali obiettivi di questa tesi riguarda l'approfondimento dell'ampio tema del Dfd, cercando di evidenziarne le peculiarità. **Le tendenze in aumento di costo del lavoro e dell'energia** mostrano che gli edifici stanno diventando più complicati da costruire. Hanno bisogno di sempre più risorse per essere costruiti, e questo si traduce in un aumento del costo del ciclo di vita. Analogamente all'aumento dei costi aumentano anche le complessità di gestione del processo progettuale. Per stare al passo con le tendenze in crescita, occorre individuare metodologie efficienti per gestire i dati e le informazioni, controllare i processi di analisi e verifica e comunicare chiaramente con i soggetti coinvolti nel processo. **Il BIM** da questo punto di vista può essere molto utile. Nasce come strumento di semplificazione, che presenta grandi potenziali per l'implementazione delle nuove teorie legate alla circolarità, come il DfD. Nella sua ricerca, Elma Durmisevic et al. [1] asseriscono che, al fine di essere in grado di gestire un numero sempre crescente di dati necessari per la gestione circolare dei materiali all'interno dell'ambiente costruito, l'unico modo per andare oltre è attraverso la piena digitalizzazione degli strumenti di progettazione reversibile degli edifici (convalidati attraverso il Progetto Europeo "BAMB" [63] : Buildings as Material Banks: Integrating Materials Passports with Reversible Building Design to Optimise Circular Industrial Value Chains) e l'aggiornamento del BIM al "BIM reversibile". Nell'ottica di ottimizzare i processi, il BIM permetterebbe di arrivare a buoni risultati e di creare una base su cui poter lavorare. Il presente lavoro di tesi cerca infatti di suggerire un possibile metodo di implementazione sinergica del binomio BIM-DfD, cercando di legare la teoria (Crowther e Brad Guy) ad aspetti più pratici. La teorizzazione di 10 parametri che definiscano al meglio il livello di DfD al livello di componente o più complessivo di soluzione costruttiva, sono stati pensati per essere adatti al software così da poterli condividere e riutilizzare. In futuro si potrebbe pensare di elaborare un database open source, dunque accessibile a tutti, che indichi il **livello di riutilizzo degli elementi presenti**. Tramite il calcolo di un valore numerico come quello studiato in questa tesi, si potrebbero analizzare i componenti presenti sul mercato così da poter avere una base di scelta nel momento della progettazione più coerente con gli aspetti di riuso e circolarità. Al livello dell'edificio, Elma Durmisevic [1] indica con un punteggio la potenzialità di riutilizzo e, sulla base di tale punteggio, individua tre categorie di edifici: **edifici irreversibili, edifici parzialmente riutilizzabili, edifici reversibili**. In questo modo, per l'utente (proprietario immobiliare, committente, investitore o progettista) diventa più semplice scegliere se sia conveniente intervenire sul manufatto oggetto di analisi.

### 6.2 ACCESSIBILITÀ DEL PROCESSO

Un punto di forza di questo metodo è che la conoscenza di Revit si ferma alle basi. È infatti necessario conoscere come utilizzare i parametri e come lavorare nelle famiglie, ma il livello di difficoltà di questo strumento non è eccessivo. Non c'è bisogno di programmare o di approfondire l'utilizzo del programma in maniera eccessiva. La grande interoperabilità del software permette di estrapolare facilmente i dati, andando su programmi che ormai al giorno d'oggi sono conosciuti da tutti come Excel.

C'è un limite che consente fino ad un certo punto di lavorare in modo ottimale in software articolati come quelli Bim. Il primo è uno standard minimo di potenza del computer necessaria per poter usare programmi di questo tipo. Il secondo è il **Level of detail (LoD)**, ossia livello di dettaglio del progetto. La mancanza di un adeguato LoD per i modelli parametrici di disassemblaggio, non definiscono le corrette interfacce fisiche tra le parti dell'edificio [20]. Troviamo infatti nei modelli informativi as-designed, una significativa differenza di configurazione nei modelli di disassemblaggio. Per il quadro fondamentale del BIM, un intero edificio viene discretizzato in parti standardizzate e successivamente rappresentato con più livelli di dettaglio (multi-LoD) in un modello parametrico [29]. Questi livelli sono selezionati in base all'importanza dei requisiti nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio. Ad esempio, un LoD medio incentrato sugli attributi costruttivi è richiesto nella fase di costruzione. Mentre è richiesto un LoD elevato con enfasi sulle informazioni dell'interfaccia fisica nella fase di pianificazione dello smontaggio. Di conseguenza, è necessario un sistema di modellazione multi-LoD per supportare le diverse fasi del ciclo di vita di un edificio. Detto ciò, è importante fin dalla nascita di un edificio che al termine del progetto gli elaborati abbiano un livello di dettaglio molto alto se si vuole procedere con lo smantellamento alla fine del ciclo di vita degli edifici.

Il punto di partenza per un sistema esaustivo per l'utilizzo del Dfd e del BIM è stato tracciato; tuttavia, maggiore è il dettaglio strutturale che si va a realizzare più sarà possibile uno smantellamento dell'edificio. Allo stesso tempo però sono necessari più risorse per realizzare il modello nella fase precedente. Nel presente lavoro di tesi il LoD è elevato, ma riguarda solo una piccola porzione dell'edificio: di conseguenza la complessità non è elevata. Analizzare un intero edificio richiede uno studio approfondito e tempistiche molto superiori.

### 6.3 SVILUPPI FUTURI PER IL MIGLIORAMENTO DEL METODO

Secondo Akbarieh & Al [15], una limitazione di tutti questi prototipi e framework che utilizzano il BIM è il **loro uso di strumenti proprietari** (principalmente Revit) per dimostrare la loro implementazione di successo. Inoltre, nella maggior parte dei casi è necessario aggiungere strumenti, per calcolare gli indici (come proprietà generali aggiuntive) senza lavorare sulle potenziali proprietà specifiche che possono essere successivamente adottate dai fornitori di strumenti BIM. Pertanto, una maggioranza delle soluzioni si basano in primo luogo su un'API specifica, che riduce la possibilità di soluzioni universali. In secondo luogo, i risultati di questi studi sono specifici per un caso, il che porta a decisioni arbitrarie che non sono facilmente riproducibili.

Sarebbe necessario realizzare un **metodo che sia replicabile e utilizzabile da tutti**. In parte quello pensato in questo lavoro di tesi lo è, poiché si cerca di estrapolare i dati al di fuori di Revit, in fogli di calcolo come Excel, che ci si aspetta tutti abbiano la possibilità utilizzare nell'ambito dell'ingegneria edile e civile. Per rimanere all'interno del software BIM bisogna condividere con tutti gli stakeholder i parametri utilizzati. Per fare ciò bisogna condividere il file ".txt." in cui sono scritti i parametri, che una volta caricati nel software, permettono la loro lettura e il loro utilizzo. Questo accade in quanto i parametri utilizzati sono "parametri condivisi". Visto che gli elementi realizzati sono stati fatti con famiglie caricabili "generic model" non troppo specifiche e complesse, posso utilizzare questo tipo di parametro. Altrimenti se ci si fosse trovati nella situazione di dover usare "parametri di progetto", queste vivrebbero solo all'interno del progetto stesso e per esportarlo sarebbero stati necessari file IFC. I parametri di progetti non sono esportabili, quindi meno adatte ad un lavoro di collaborazione tra più professionisti e per la realizzazione di un database di informazioni generale. Tuttavia, **i file IFC** potrebbero essere una strada da percorrere per migliorare il binomio Dfd e BIM. IFC è uno standard internazionale aperto per i dati BIM che viene utilizzato per lo scambio di informazioni tra software [64]. Come descritto da Benjamin Sanchez & Al [20] lo standard comprende descrizioni che hanno informazioni essenziali per le fasi del ciclo di vita dei progetti di costruzione (ISO 16739-1: 2018, 2020). Una varietà di studi ha applicato IFC per combinare il BIM con altre aree. La combinazione prevede l'adattamento

semantico a strutture specifiche (ad esempio, sistemi informativi geografici [GIS], Facility Management [FM], analisi energetica degli edifici [BEA]) mentre IFC porta connettività tra i dati relativi alla costruzione BIM e altri ambienti. Secondo loro, con lo sviluppo del BIM come strumento universale, è possibile generare una tecnologia aggiuntiva per completare le informazioni mancanti per la pianificazione dello smontaggio dei progetti di costruzione e per supportare il processo decisionale.

Un'altra problematica riguarda il fatto che i **valori agli elementi sono assegnati soggettivamente** e arbitrariamente da un addetto ai lavori, che per quanto specializzato sia, potrebbe compiere degli errori o essere non troppo preciso. Più i parametri saranno chiari e facilmente leggibili, maggiormente il metodo funzionerà bene e sarà facile analizzare il progetto.

I parametri sono stati scelti in seguito ad uno studio di bibliografia e legando tra di loro altri studi che hanno cercato di approfondire la tematica. Tuttavia, la mancanza di un metodo altamente efficiente per determinare automaticamente i parametri fa sì che potrebbero esserci delle incomprensioni in chi assegna i valori e quindi non funzionali. Come spiega Benjamin Sanchez & Al [65] l'acquisizione dei parametri è alla base della creazione di un modello di disassemblaggio accurato. Alcuni di questi parametri sono legati alle informazioni degli attributi e dimensioni geometriche degli oggetti BIM, il che è un compito relativamente banale. Tuttavia, altri parametri richiedono lo sviluppo di tecniche sofisticate per la determinazione di semantiche di ordine superiore (ad es. relazioni topologiche, interdipendenza degli elementi edilizi). Questa è stata considerata una sfida in molti ambiti dell'industria delle costruzioni. A questo proposito, i linguaggi di programmazione visiva (VPL) per il BIM possono essere utilizzati come un modo efficiente per sviluppare soluzioni software personalizzate per l'industria delle costruzioni.

Per migliorare al livello esteso il metodo analizzato in questa tesi, sarebbe necessario poter raccogliere i dati necessari per l'analisi dei parametri sopra analizzati in modo semplice e univoco. **Le banche dati** presenti sui materiali ad oggi presenti non sono sufficienti per un'analisi completa e approfondita. Esempio lampante è la difficoltà di analizzare il tempo di montaggio di un elemento. Per il Dfd il parametro "tempo di assemblaggio" è fondamentale per definire i costi e fare delle scelte tra le diverse scelte costruttive. Inoltre, il tentativo di velocizzare il processo, passando attraverso un software come Revit, potrebbe permettere la selezione dei parametri quasi in autonomia tramite plug-in direttamente installabili nel software.

## 6.4 IL LIVELLO DELLE SOLUZIONI ANALIZZATE

Trovare un valore finale, definito come EBCI, ha permesso un rapido confronto tra le soluzioni analizzate. Come detto precedentemente la migliore soluzione tra quelle analizzate ALI KL. È bastato eliminare la finitura esterna con intonaco di biocalce per poter liberare gli strati sottostanti che non hanno un blocco chimico che li preclude. Il punto centrale del Dfd è eliminare ogni tipo di componente che sia irreversibile e che quindi una volta applicato deve essere smaltito in discarica e che rischia di incidere negativamente anche altri elementi. In questo senso il calcestruzzo è un pessimo sistema strutturale da utilizzare. Anche se ponendo l'attenzione sulle 6 S di cui parla S. Brand [13], quello strutturale è quello che rimane più a lungo e quindi su cui si deve intervenire di meno. Avere una facciata o degli spazi interni che siano disassemblabili, permette di eseguire una manutenzione e una sostituzione evitando sprechi di materiale e potendo riutilizzare gli stessi. Tra le soluzioni applicate al caso studio, il pannello prefabbricato ALIVA DEMO ha permesso di mitigare alcuni aspetti negativi del pannello in EPS. Ad esempio, la rete in fibra di vetro utilizzata nella situazione con l'EPS abbassa di molto l'attrattiva verso questa soluzione in quanto è un materiale fragile che viene del tutto inglobato dalla finitura esterna. Allo stesso modo lo strato di malta adesiva, che non viene utilizzato nel caso di ALIVA DEMO, abbassa il coefficiente finale essendo un legante chimico. I valori di EBCI sono migliorati di molto una volta utilizzato come finitura esterna elementi applicabili con semplici strumenti e maneggevoli

tramite applicazione meccanica o ancora meglio ad incastro. È il caso, ad esempio, della soluzione con le lastre di ceramica "ALIVA DEMO 2.0", materiale riciclabile e riusabile, molto resistente e applicabile tramite dei clip a incastro. Nonostante non sia sempre possibile scegliere quella che sarebbe la strada più vantaggiosa per l'ambiente e il DfD, questo semplice metodo permette di individuare le criticità e, di conseguenza, di guidare, nei limiti del possibile, la fase progettuale.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] E. Durmisevic, A. Guerriero e C. Boje, «Development of a conceptual digital deconstruction platform with integrated Reversible BIM to aid decision making and facilitate a circular economy,» 2021.
- [2] E. Durmisevic, «WP3 Reversible Building Design guidelines,» Twente, 2018.
- [3] ISPRA, «ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca,» [Online]. Available: <https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/eventi/2021/12/presentazione-del-rapporto-rifiuti-urbani-edizione-2021>.
- [4] F. Denis, C. Vandervaelen and N. De Temmerman, "Using Network Analysis and BIM to Quantify the Impact of Design for Disassembly," *Buildings*, 2018.
- [5] C. Mazzoli, R. Conticelli, L. Dragonetti, A. Ferrante, J. v. Oorschot e R. M. , «Assessing and developing circular deep renovation interventions towards decarbonisation: the Italian pilot case of "Corte Palazzo" in Argelato,» 2022.
- [6] E. McArthur, «The Ellen Mac Arthur Foundation,,» [Online]. Available: <https://ellenmacarthurfoundation.org/>.
- [7] E. Krygiel e B. Nies, *Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modelling*.
- [8] B. Guy e N. Ciarimboli, «DfD Design for Disassembly in the built environment,» 2005.
- [9] OECD, «oecd,» [Online]. Available: <https://www.oecd.org/environment/extended-producer-responsibility.htm>.
- [10] EUR-lex, «EUR-lex,» [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/LSU/?uri=CELEX:32000L0053>.
- [11] biblus, «biblus.acca,» [Online]. Available: <https://biblus.acca.it/focus/costi-manodopera-e-sicurezza/>.
- [12] P. Crowther, «Design for Disassembly - Themes and principles,» 2005.
- [13] S. Brand, «How buildings learn: What happens after they're built.,» 1995.
- [14] C. Eastman, R. Sacks, G. Lee e P. M. Teicholz, *BIM Handbook: A Guide to BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*, 2018.
- [15] A. Akbarieh, F. N. Teferle, L. B. Jayasinghe e D. Waldmann, «BIM- based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review,» 2020.
- [16] A. Akbarnezhad, K.C.G.Ong e L. Chandra, «Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling,» *Automation in Construction*, 2013.

- [17] D. Densley Tingley e B. Davison, «Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits,» *Build. Environ.*, pp. 387-395, 2012.
- [18] O. Akinade, L. Oyedele, S. Ajayi, M. Bilal, H. Alaka, H. Owolabi, S. Bello e B. Jaiyeoba, «Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills.,» *Waste Manag.*, pp. 3-13, 2017.
- [19] Y.-C. Kim, W.-H. Hong, J.-W. Park e G.-W. Cha, «An estimation framework for building information modeling (BIM)-based demolition waste by type,» *Waste Manag.*, pp. 1285-1295, 2017.
- [20] B. Sanchez e C. Haas, «A novel selective disassembly sequence planning method for adaptive reuse of buildings,» *J. Clean. Prod.*, pp. 998-1010, 2018.
- [21] C. Rose e J. Stegemann, «From waste management to component management in the construction industry.,» *Sustainability*, p. 229, 2018.
- [22] M. Bilal, L. Oyedele, J. Qadir, K. Munir, O. Akinade, S. Ajayi, H. Alaka e H. Owolabi, «Analysis of critical features and evaluation of BIM software: Towards a plug-in for construction waste minimization using big data,» *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.*, pp. 211-228, 2015.
- [23] A. Tibaut e D. Zazula, « Sustainable management of construction site big visual data.,» *Sustain. Sci.* , pp. 1311-1322, 2018.
- [24] M. Bilal, L. Oyedele, O. Akinade, S. Ajayi, H. Alaka, H. Owolabi, J. Qadir, M. Pasha e S. Bello, «Big data architecture for construction waste analytics (CWA): A conceptual framework.,» *J. Build.*, pp. 144-156, 2016.
- [25] O. Akinade, L. Oyedele, M. Bilal, S. Ajayi, H. Owolabi, H. Alaka e S. Bello, «Waste minimisation through deconstruction: A BIM based deconstructability assessment score (BIM-DAS).,» *Resour. Conserv. Recycl.*, pp. 167-176, 2015.
- [26] R. Volk, T. Luu, J. Mueller-Roemer, N. Sevilimis e F. Schultmann, «Deconstruction project planning of existing buildings based on automated acquisition and reconstruction of building information.,» *Autom. Constr.*, pp. 226-245, 2018.
- [27] L. Akanbi, L. Oyedele, O. Akinade, A. Ajayi, M. Davila Delgado, M. Bilal e S. Bello, «Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator.,» *Resour. Conserv. Recycl.*, pp. 175-186, 2018.
- [28] W. Lu, C. Webster, K. Chen, X. Zhang e X. Chen, «Computational Building Information Modelling for construction waste management: Moving from rhetoric to reality.,» *Renew. Sustain. Energy Rev.* , pp. 587-595, 2017.
- [29] Z. Liu, M. Osmani, P. Demian e A. Baldwin, «A BIM-aided construction waste minimisation framework.,» *Autom. Constr.*, pp. 1-23, 2015.
- [30] F. Denis, C. Vandervaeren e N. De Temmerman, «Using Network Analysis and bim to Quantify the Impact of Design for Disassembly,» *Buildings*, 2018.

- [31] D. Cottafava, M. Ritzen e J. Van Oorschot, «D6.1 Report on benchmarking on circularity and its potentials on the demo,» 2020.
- [32] B. Corona, L. Shen, D. Reike, J. R. Carreón e E. Worrell, «“Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics,”», *Resour. Conserv. Recycl.*, 2019.
- [33] Epa, «united states enviromental protection agency,» [Online]. Available: <https://www.epa.gov/e3/about-e3-economy-energy-environment>.
- [34] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel e A. Kendall, «“A taxonomy of circular economy indicators,”», *J. Clean. Prod.*, pp. 542-559, 2019.
- [35] A. Parchomenko, D. Nelen, J. Gillabel e H. Rechberger, «“Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics,”», *J. Clean. Prod.*, pp. 200-216, 2019.
- [36] J. Verberne, «“Building circularity indicators - an approach for measuring circularity of a building,”», p. 165, 2016.
- [37] T. Ramesh, R. Prakash e K. K. Shukla, «“Life cycle energy analysis of buildings: An overview,”», *Energy Build*, pp. 1592-1600, 2010.
- [38] Schaik e C. W. Van, «“Circular building foundations,”», 2019.
- [39] M. Niero e P. P. Kalbar, «“Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level,”», *Resour. Conserv. Recycl*, pp. 305-312, 2019.
- [40] C. J. Y. Park e a. M. R., «“Establishing and testing the ‘reuse potential’ indicator for managing wastes as resources,”», *J. Environ. Manage.*, pp. 45-53, 2014.
- [41] F. Di Maio, P. C. Rem, K. Baldé e M. Polder, «“Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach,”», *Resour. Conserv. Recycl.*, pp. 163-171, 2017.
- [42] E. Franklin-Johnson, F. Figge e L. Canning, «“Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance,”», *J. Clean. Prod.*, pp. 589-598, 2016.
- [43] T. Dorsthorst e B. Kowalczyk, «“Design for recycling. Design for deconstruction and materials reuse,”», *Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building Construction*, pp. 70-80, 2002.
- [44] T. F. Go, D. A. Wahab e H. Hishamuddin, «“Multiple generation life-cycles for product sustainability: The way forward,”», *J. Clean. Prod*, pp. 16-29, 2015.
- [45] P. Russell e S. Moffat, «“Assessing the adaptability of buildings,”», *Int. Energy Agency Annex*, pp. 1-13, 2001.
- [46] R. Geraedts, «“FLEX 4 . 0 , a practical instrument to assess the adaptive capacity of buildings,”», *Energy Procedia*, pp. 568-579, 2016.

- [47] E. Durmisevic, «“DESIGN ASPECTS OF DECOMPOSABLE BUILDING STRUCTURES,”», *Proc. CIB Task Gr.*, 2002.
- [48] I. I. Issa, D. C. A. Pigosso, T. C. McAloone e H. Rozenfeld, «“Leading product-related environmental performance indicators: a selection guide and database,”», *J. Clean. Prod.*, pp. 321-330, 2015.
- [49] E. Kroll, B. Beardsley e A. Parulian, «“A methodology to evaluate ease of disassembly for product recycling,”», *IIE Trans. (Institute Ind. Eng.,)*, pp. 837-845, 1996.
- [50] J. Eagan e P. and Yarwood, «“Design for Environment Toolkit: a competitive edge for the future,”», *Matrix*, p. 72, 1998.
- [51] Comune di Argelato, «Urban Planning Regulation, RUE – Regolamento Urbanistico Edilizio, Comune di Argelato, Bologna.».
- [52] Cymper, [Online]. Available: <https://ardex-online.com/it/home/170279-ardex-4x4-adesivo-flessibile-multiuso-a-base-di-cemento-in-strato-sottile.html>.
- [53] Mister cappotto, [Online]. Available: <https://www.mistercappotto.it/professionisti-come-posare-il-cappotto-termico/>.
- [54] Lavori in casa, [Online]. Available: <https://www.lavorincasa.it/rete-porta-intonaco-in-fibra-di-vetro-per-evitare-microlesioni/>.
- [55] Espertocasaclima, [Online]. Available: <https://espertocasaclima.com/2021/11/08/intonaco-interno-base-gesso/>.
- [56] Guida Edilizia, [Online]. Available: <https://www.guidaedilizia.it/blog/intonaci-per-esterno-cosa-sono-quali-tipologie-esistono/#:~:text=Gli%20intonaci%20da%20esterno%20sono%20delle%20malte%2C%20cio%3%A8,precipitazioni%2C%20vento%2C%20sole%20estivo%20o%20forti%20escursioni%20termiche..>
- [57] A. Benini, D. Atzori e S. Nanni, «Le lane di vetro linee guida divulgativa e informativa,» 2017.
- [58] Ristrutturare casa, [Online]. Available: <https://www.ristrutturare-casa.org/blog/la-lana-di-roccia-in-edilizia-usi-e-caratteristiche/>.
- [59] R&D MATECH, [Online]. Available: <https://www.matech.it/materiali/tavole-in-fibrocemento/>.
- [60] ALIVA, «Rivestimenti facciata ventilata in vetro,» [Online]. Available: [https://www.aliva.it/rivestimenti/facciata-ventilata-in-vetro\\_3/](https://www.aliva.it/rivestimenti/facciata-ventilata-in-vetro_3/).
- [61] SICER, «Blog della Sicer,» [Online]. Available: <https://blog.sicer.it/origini-e-caratteristiche-ceramica/>.
- [62] Isostyle, [Online]. Available: <https://www.isolstyle.com/densita-peso-specifico-materiali.html>.
- [63] U. Europea, «Cordis risultati della ricerca in UE,» [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/642384/it>.
- [64] buildingsmart, «buildingsmart,» [Online]. Available: <https://www.buildingsmart.org/>.

- [65] B. Sanchez, C. Rausch, C. Haas e C. Hartmann, «A framework for BIM-based disassembly models to support reuse of building component,» *Resources, Conservation & Recycling*, 2021.
- [66] M. v. Vliet, «“Disassembling the steps towards Building Circularity,”,» 2018.
- [67] C. Vandervaeren, F. Denis, N. D. Temmerman e W. Galle, «MATRx: Development of a material flow assessment tool for Design for Disassembly,» 2018.
- [68] C. Cerdan, C. Gazulla, M. Raugei, E. Martinez e P. Fullana-i-Palmer, «“Proposal for new quantitative eco-design indicators: a first case study,”,» *J. Clean. Prod.*, pp. 1638-1643, 2009.

# APPENDICE A

Vengono riportate di seguito le tabelle Excel realizzate da Cecilia Mazzoli et al. [5], da cui sono stati estrapolati i dati necessari per realizzare la valutazione finale delle soluzioni costruttive analizzate. In particolare, il dato ricercato riguardava le quantità di materiale, espresse in m<sup>3</sup>, e le densità dei materiali utilizzati.

Materials	Recovering Potential	Quantity			Density	Total amount of materials	Data from ICE Inventory				Source	Circularity Indicators										Circularity Assessment				
		Amount	Unit of measure	Unit of measure			Unit of measure	Embodied Energy	Embodied Energy	Embodied CO <sub>2</sub>		Total Embodied CO <sub>2</sub>	Type of connections	Accessibility of concrete		Crackings	Form contamination		Materials origin		Re-usability		Average indicator	Mass	Embodied Energy	Embodied CO <sub>2</sub>
														Description	Weight		Description	Weight	Description	Weight	Description	Weight				
Internal thermal layer in glass wool (12 cm thick)	RECYCL	36,36	m <sup>3</sup>	18,00	4,2268	28,00	13.245,84	1,25	688,12	ICE dataset Insulation/Fiberglass (Glasswool)	Dry connection	1	Accessibility with additional actions	0,8	Modular zoning of objects	1	Closed on one side	0,4	Recycled	0,6	Reuse	0,8	0,73	346,63	9785,79	487,95
Steel sheet for embedding insulating material (0,5 mm) ("Chopstix" sandwich panel by Intercell)	REUSRD	6,93	m <sup>3</sup>	7,85000	235,50	22,60	5.322,30	2,03	478,07	ICE dataset Steel general	Connection with additional elements	0,8	Accessibility with additional actions that do not cause damage	0,8	Modular zoning of objects	1	Closed on one side	0,4	Recycled	0,6	Reuse	0,8	0,72	168,78	3814,32	312,61
External thermal brick in rock wool (5 cm) ("Chopstix" sandwich panel by Intercell)		1,26	m <sup>3</sup>	1,9000	1,75000	15,80	28.480,00	1,12	1.960,00	ICE dataset Insulation Rock/Wool														1754,17	7100,00	1406,67
Steel sheet for embedding insulating material (0,5 mm) ("Chopstix" sandwich panel by Intercell)		6,93	m <sup>3</sup>	7,85000	235,50	22,60	5.322,30	2,03	478,07	ICE dataset Steel general														168,78	3814,32	342,61
Fiber cement board outdoor (12,5 mm) (SIGAF 9484)	RECYCL	3,84	m <sup>3</sup>	1,15000	3,26640	16,40	35.966,40	1,09	3.508,94	ICE dataset Cement Fiber Cement Panels Uncoated	Dry connection	1	Accessibility with additional actions	0,8	Modular zoning of objects	1	Closed on one side	0,4	Recycled	0,5	Recycle	0,4	0,68	1959,60	29376,84	2133,96
Steel brace (16,200) for anchoring all the panels to the existing facade	RECYCL	6,66	m <sup>3</sup>	7,85000	47,100	20,10	94467,10	1,47	645,27	ICE dataset Steel general	Dry connection	1	Accessibility with additional actions	0,4	Modular zoning of objects	1	Closed on one side	0,4	Rehabilitated	0,5	Humanish	0,5	0,63	298,30	5995,83	488,67
Gypsum plaster (thickness 1 cm)	NOT RECOVERABLE	3,28	m <sup>3</sup>	1,44000	4,72320	1,80	8.581,76	0,17	566,78	ICE dataset Plaster general gypsum	Hard chemical connection	0,1	Freely accessible	1	Crackings between one or more objects	0,4	Open, no inclusion	1	Non bio-based virgin	0,1	Not recoverable	0,1	0,28	1298,80	2207,48	155,87
External finishing paint coat (1 cm)	NOT RECOVERABLE	0,22	m <sup>3</sup>	1,60000	352,00	20,00	24.640,00	2,40	8148,00	ICE dataset Paint general	Hard chemical connection	0,1	Freely accessible	1	Crackings between one or more objects	0,4	Open, no inclusion	1	Non bio-based virgin	0,1	Not recoverable	0,1	0,28	96,88	1560,33	333,04
		<b>TOTAL MASS</b>		<b>11.915,88</b>	<b>101441,1</b>	<b>126.854,60</b>	<b>9171,64</b>															<b>101441,1</b>	<b>5.501,93</b>	<b>67.723,31</b>	<b>5.793,39</b>	
																						<b>EBCI</b>	<b>0,49</b>	<b>0,64</b>	<b>0,63</b>	
																						<b>EBCI<sub>tot</sub></b>	<b>0,58</b>			
FRC/HPS expanded polystyrene insulation (20 cm)	RECYCL	9,36	m <sup>3</sup>	1,200	794,80	88,60	76.848,68	4,29	2411,60	ICE dataset Plastics	Connection with steel elements	0,8	Accessibility with additional actions	0,4	Crackings between one or more objects	0,4	Closed on one side	0,4	Recycled	0,6	Recycle	0,4	0,50	305,90	35165,34	1305,80
Structural fiberglass mesh	NOT RECOVERABLE	0,10	m <sup>3</sup>	12,00	1,80	28,00	56,16	1,51	2,27	ICE dataset Fiber Glass	Hard chemical connection	0,1	Not accessible	0,1	Full integration of objects	0,1	Closed on several sides	0,1	Non bio-based virgin	0,1	Not recoverable	0,1	0,10	0,10	5,04	0,78
Adhesive	NOT RECOVERABLE	0,15	m <sup>3</sup>	12,00	1,80	13,200	246,60	47,60	26,48	ICE dataset Epoxide Resin	Hard chemical connection	0,1	Not accessible	0,1	Full integration of objects	0,1	Closed on several sides	0,1	Non bio-based virgin	0,1	Not recoverable	0,1	0,10	0,16	21,55	7,67
Gypsum plaster (thickness 1 cm)	NOT RECOVERABLE	6,78	m <sup>3</sup>	1,44000	3,44320	1,80	9,797,76	0,17	633,18	ICE dataset Plaster general gypsum	Hard chemical connection	0,1	Freely accessible	1	Crackings between one or more objects	0,4	Open, no inclusion	1	Non bio-based virgin	0,1	Not recoverable	0,1	0,28	149,68	2694,38	170,63
External finishing paint coat (1 cm)	NOT RECOVERABLE	0,25	m <sup>3</sup>	1,60000	400,00	20,00	28.000,00	2,40	950,00	ICE dataset Paint general	Hard chemical connection	0,1	Freely accessible	1	Crackings between one or more objects	0,4	Open, no inclusion	1	Non bio-based virgin	0,1	Not recoverable	0,1	0,28	110,80	2080,00	96,90
		<b>TOTAL MASS</b>		<b>60.900,00</b>	<b>TOTAL EE</b>	<b>168.425,44</b>	<b>TOTAL EC</b>	<b>4.369,24</b>															<b>TOTAL</b>	<b>2.001,11</b>	<b>10.689,32</b>	<b>1.589,37</b>
																						<b>EBCI</b>	<b>0,30</b>	<b>0,38</b>	<b>0,37</b>	
																						<b>EBCI<sub>tot</sub></b>	<b>0,35</b>			

ALIVA SYSTEM

ETICS

Tabella 20 Tabelle realizzate su Excel nell'ambito del progetto [5] "Assessing and developing circular deep renovation interventions towards decarbonisation: the Italian pilot case of "Corte Palazzo" in Argelato

