



CENTRO SPERIMENTALE
DI SVILUPPO DELLE COMPETENZE
NELL'AREA DELLE COSTRUZIONI



Monografie Edil-lab

INNOVAZIONE
TECNOLOGIA E AMBIENTE

**Il Life Cycle Assessment
(LCA) nel settore delle
costruzioni e il BIM**

ITA

Il Life Cycle Assessment (LCA) nel settore delle costruzioni e il BIM

Il progetto è stato promosso dall'ATI Edil-lab: mandataria CFS Napoli; mandanti STAMPA Soc. Coop. a r.l., Istituto Tecnico Statale "Della Porta - Porzio", STRESS scarl, Consorzio TRE, AMRA – Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambiente S.c.ar.l., ACEN - Associazione Costruttori Edili di Napoli, S.I. Impresa – Azienda Speciale della CCIAA di Napoli, Brancaccio Costruzioni spa, Credendino Costruzioni spa, Edildovi snc, Iterga Costruzioni Generali Appalti spa, RR Costruzioni Generali spa.

L'ideazione dell'iniziativa "Monografie Edil-lab" è delle imprese Brancaccio Costruzioni spa, Credendino Costruzioni spa, Edildovi snc, Iterga Costruzioni Generali Appalti spa, RR Costruzioni Generali spa.

L'elaborazione della monografia è a cura dell'ing. Antonio Salzano, dell'ing. Domenico Asprone e del prof. Andrea Prota.

Elaborazioni grafiche: Edizioni Graffiti srl

Si ringraziano per gli apporti tecnici: Roberta Ajello, Federica Brancaccio, Aldo Checchi, Ester Chica, Antonio Credendino, Mattia D'Acunto, Giancarlo Di Luggo, Marco Ferra, Antonio Giustino, Angelo Lancellotti, Massimo Maresca, Gabriella Reale, Barbara Rubertelli, Gaetano Troncone, Francesco Tuccillo, Diego Vivarelli von Lobstein, nonché gli uffici dell'ANCE.

Si ringrazia, inoltre, il Comitato Tecnico Esecutivo di Edil-lab nelle persone di: Paola Marone, Ennio Rubino e Stefano Russo.

Si ringraziano inoltre: l'Assessore alla Formazione della Regione Campania, Chiara Marciani, il Dirigente dell'UOD Formazione Professionale, Prospero Volpe, il Funzionario Titolare di P.O., Gerardo de Paola, ed il coordinatore amministrativo del Progetto Valerio Iacono.

Indice

Introduzione	pag 07
1. Building Information Modeling	pag 10
1.1 La metodologia BIM	pag 10
1.1.1 BIM Maturity Levels	pag 17
1.2 Implementazione Oggetti Bim	pag 24
2. Il BIM a supporto della progettazione sostenibile	pag 27
2.1 Il BIM nella valutazione dell'impatto ambientale mediante l'integrazione di analisi LCA	pag 27
2.2 La sostenibilità e lo sviluppo sostenibile	pag 28
2.3 LCA nel settore delle costruzioni	pag 32
2.4 Life Cycle Assessment: metodologia	pag 36
2.4.1 Definizione degli obiettivi (Goal and scope definition)	pag 40
2.4.2 Analisi dell'inventario (LCI)	pag 43
2.4.3 Valutazione degli impatti ambientali potenziali	pag 45
2.4.4 Interpretazione dei risultati	pag 50
3. Integrazione di LCA nel BIM applicata a un caso studio	pag 51
3.1.1 Complessità delle LCA nel settore delle costruzioni	pag 51
3.1.2 Scopo dello studio e integrazione di LCA nel BIM	pag 53
3.1.3 Caso studio	pag 55
4. Life Cycle Assessment di strategie di adeguamento sismico	pag 64
4.1 Introduzione	pag 64
4.2 Definizione del caso studio	pag 66

4.2.1 Analisi della capacità strutturale	pag 69
4.3 Strategie di Consolidamento Strutturale	pag 71
4.4 LCA delle strategie di consolidamento	pag 74
4.4.1 Definizione degli obiettivi (Goal and scope definition)	pag 74
4.4.2 Analisi di impatto ambientale (Impact Assessment)	pag 79
4.5 Valutazioni conclusive sulla metodologia	pag 88
Conclusioni	pag 95
Bibliografia	pag 100

indice delle figure

Figura 1.1 Confronto tra l'effort richiesto nella fase di progettazione utilizzando un approccio di lavoro tradizionale e uno BIM-based (Fonte: Patrick MacLeamy, AIA/HOC)	pag 16
Figura 1.2 Maturity levels per l'utilizzo del BIM	pag 18
Figura 2.1 Triple Bottom Line Theory	pag 32
Figura 2.2 Fasi analisi LCA	pag 38
Figura 2.3 Fase di definizione di input/output	pag 45
Figura 2.4 Fase LCIA	pag 46
Figura 2.5 Categorie previste dal metodo Impact2002+ [22]	pag 48
Figura 2.6 Categorie intermedie e di danno, sostanze di riferimento, e unità di danno usate in Impact2002+ [22]	pag 49
Figura 3.1 Utilizzo della metodologia LCA [23]	pag 53
Figura 3.2 Modello BIM 3D dell'edificio oggetto del caso di studio	pag 56
Figura 3.3 Inventory Analysis mediante le schede del Prezzario	pag 60
Figura 3.4 Integrazione dei dati di LCA nel processo BIM	pag 61
Figura 3.5 Risultati di impatto ambientale del software Primusv100d – Beta LCA 1.00	pag 63
Figura 4.1 Viste 3D del modello BIM dell'edificio	pag 68
Figura 4.2 Modello strutturale SAP2000 dell'edificio	pag 69
Figura 4.3 Meccanismi di collasso di colonne per edifici in c.a. colpiti dal terremoto dell'Aquila, (fonte Reluis 2009) [32]	pag 70

Figura 4.4 Rappresentazione della capacità di un edificio esistente del piano (Capacità Resistente; Capacità Deformativa)	pag 71
Figura 4.5 Confini del sistema FRP	pag 77
Figura 4.6 Confini del sistema parete in c.a.	pag 78
Figura 4.7 Confini del sistema ringrosso in c.a.	pag 79
Figura 4.8 Risultati LCA FRP in carbonio (1 m2)	pag 80
Figura 4.9 Risultati LCA fase produzione materiali FRP in carbonio	pag 81
Figura 4.10 Risultati LCA parete in c.a.	pag 82
Figura 4.11 Risultati LCA fase produzione materiali parete in c.a.	pag 83
Figura 4.12 Risultati LCA ringrosso in c.a. pilastrata	pag 83
Figura 4.13 Risultati LCA fase produzione materiali ringrosso in c.a. pilastrata	pag 84
Figura 4.14 Risultati LCA adeguamento sismico con pareti in c.a.	pag 85
Figura 4.15 Risultati LCA adeguamento sismico misto con ringrossi in c.a. e FRP	pag 86
Figura 4.16 Risultati LCA comparativa tra le tre strategie di adeguamento sismico	pag 87
Figura 4.17 Risultati LCA comparativa tra miglioramento e adeguamento sismico	pag 88
Figura 4.18 Analisi comparativa tecniche di adeguamento sismico	pag 91

Figura 4.19 Analisi comparativa tra miglioramento e
adeguamento sismico

pag 92

indice delle tabelle

Tabella 3.1 Computo metrico dei materiali

pag 58

INTRODUZIONE

La presente pubblicazione deriva da un intenso lavoro di ricerca e di applicazioni pratiche avviate da diversi anni sulla metodologia Building Information Modeling (BIM). Attualmente il BIM è un valido e consolidato strumento a supporto della filiera delle costruzioni principalmente nelle fasi di pianificazione, progettazione e gestione delle opere civili.

Tuttavia, gli strumenti BIM, grazie alle loro potenzialità intrinseche, permettono lo sviluppo di applicazioni ingegneristiche finora trascurate a causa della loro complessità.

Questo volume si pone l'obiettivo di evidenziare come l'integrazione degli applicativi BIM con altre discipline possa offrire ai professionisti un più ampio spettro di "decision making", consentendo di compiere scelte ottimali sia nella fase di progettazione sia nelle successive.

In particolare sarà mostrato come la metodologia Building Information Modeling può essere integrata con tecniche complesse di valutazione di impatto ambientale.

In questo periodo storico, lo "sviluppo sostenibile del settore delle costruzioni" è un argomento nevralgico e fortemente sentito giacché la sostenibilità e l'eco-compatibilità dei materiali e dei processi produttivi dell'edilizia sono oggi criteri che influenzano tutto il settore.

L'industria delle costruzioni è, infatti, tra i principali settori che incidono sulla sostenibilità del pianeta e tra le principali cause dell'inquinamento globale.

Si stima che in Europa, nel 2000, circa il 45% dell'energia prodotta è utilizzata nel settore edilizio, il 55% dell'inquinamento atmosferico è prodotto da questo settore, il 50% delle risorse sottratte alla natura sono destinate all'edilizia, il 40% dei rifiuti prodotti annualmente proviene dall'edilizia (Fonte O.M.S.).

Tale aspetto è determinato dall'enorme e complesso sistema che gira intorno alla realizzazione di un manufatto o di un'opera civile in termini di produzione dei materiali, di consumo di risorse primarie, di occupazione del suolo e di impatti sull'ambiente generati da tutte le operazioni di produzione e realizzazione dei diversi processi edilizi [2].

Per chi opera in tale settore, stabilire l'impatto ambientale che un determinato intervento comporta, diviene senza dubbio una responsabilità dalla quale non si può più prescindere.

Il BIM è lo strumento adatto a rispondere a questa esigenza sia per progettare e gestire opere *ex novo* con modalità ecosostenibili sia per il monitoraggio, la gestione e l'adeguamento di opere esistenti che riducono al minimo l'impatto ambientale.

In questa prospettiva si inserisce la metodologia di Life Cycle Assessment (LCA), uno strumento che permette di valutare gli impatti sull'ambiente di un prodotto o un processo, durante tutto il suo ciclo di vita, tenendo conto della fase di estrazione dei materiali, della fase di produzione e/o realizzazione, della fase di uso e, infine, della fase di dismissione o riciclo.

Tale approccio alla valutazione degli impatti ambientali è anche noto come *"from cradle to grave"* (dalla culla alla tomba), espressione anglosassone che evidenzia in maniera esaustiva la filosofia *life cycle-oriented*. La metodologia LCA è molto diffusa per la

valutazione degli impatti sull'ambiente dei singoli materiali o dei processi produttivi industriali, ma non è ancora molto utilizzata per valutare gli impatti di sistemi complessi come le opere civili. Quest'aspetto, è determinato dalla forte complessità nel condurre tali analisi e dall'enorme quantità di dati e di informazioni da rinvenire e gestire.

Proprio in questa fase centrale interviene il BIM attraverso la propria capacità di gestire ed elaborare la mole di dati necessaria alle analisi di valutazione di impatto ambientale LCA.

Per una migliore comprensione del testo si rende necessaria una breve panoramica sulla metodologia BIM come strumento di gestione e digitalizzazione del processo edilizio per condurre, nei capitoli successivi, un'analisi accurata, e corredata di casi studio, dell'integrazione BIM nelle analisi LCA.

1. BUILDING INFORMATION MODELING

1.1 La metodologia BIM

Il Building Information Modeling (BIM), è una metodologia di progettazione e gestione delle opere civili nata dall'esigenza di integrare tutti i livelli di progettazione in un unico modello 3D centrale e condiviso.

Il modello volumetrico che si realizza è dunque unico e integrato e si fonda sulla definizione di oggetti parametrici che portano con sé, oltre l'informazione grafica, indicazioni di diversa natura circa il comportamento meccanico, le prestazioni termiche, il costo, il produttore e lo stato manutentivo del componente.

Il BIM è un modo innovativo di concepire l'opera edile. Non più ambienti separati e attori del processo incapaci di interagire ma piena integrazione tra le parti coinvolte che lavorano per mettere a punto un prodotto unico capace di rispondere alle più varieghe richieste degli stakeholders.

Il modello BIM diventa un documento dinamico portavoce dello stato di fatto della struttura e allo stesso tempo è in grado di descrivere il comportamento dell'opera lungo la vita nominale della stessa.

Nonostante la diffusione mondiale di tale termine, non è facile fornire una definizione univoca del BIM. Tale difficoltà nasce dal non poter definire in maniera univoca una metodologia che assolve contemporaneamente più compiti nell'ambito della progettazione e della gestione delle opere civili.

La definizione che forse, meglio di altre, spiega cosa rappresenta il BIM è quella del National BIM Standards Project Committee of the BuildingSMART Alliance, che afferma:

“Building Information Modeling (BIM) is the act of creating an electronic model of a facility for the purpose of visualization, engineering analysis, conflict analysis, code criteria checking, cost engineering, as-built product, budgeting and many other purposes”. (BIM è un processo di creazione di un modello elettronico di un’infrastruttura con lo scopo di visualizzarlo, realizzare un’analisi di ingegneria, un’analisi di conflitto, una verifica dei criteri normativi, una valutazione dei costi di ingegneria, un prodotto come costruito, un’analisi di budget e molto altro ancora) [3].

Probabilmente un’immagine più chiara si può ottenere fornendo una spiegazione dei singoli elementi che compongono l’acronimo:

La “B” di “*building*” (edificio) sta per *building oriented work* (lavoro orientato all’edificio). Il termine “*building*”, perciò, copre la dimensione quantitativa dell’edificio, la geometria, la forma.

La “I” di “*Information*” (informazione) riguarda la dimensione qualitativa dei singoli oggetti che costituiscono il modello digitale. Ciascun componente, infatti, è definito oltre che da un punto di vista geometrico anche in maniera qualitativa attraverso l’assegnazione di parametri su materiali, costi, proprietà, tempi di realizzazione, ecc.

La “M” di “*modeling*” fa riferimento al processo in corso. Essa spiega le modalità di creazione, gestione e distribuzione del modello e delle informazioni.

Inoltre, la lettura dell’acronimo BIM è duplice: con esso si può indicare sia l’insieme delle attività finalizzate alla creazione del modello digitale e all’utilizzo dello stesso per

valutare l'evoluzione dinamica dell'opera (building information modeling), sia il singolo oggetto del modello e i parametri, fisici, meccanici e funzionali che lo caratterizzano (building information model).

Il BIM consente di realizzare un modello tridimensionale dell'edificio e di condividere in tempo reale una moltitudine d'informazioni tra le figure coinvolte nel processo di sviluppo dell'opera.

Purtroppo capita che il modello BIM sia visto come una qualunque rappresentazione tridimensionale dell'opera conducendo al grave errore di confondere una metodologia con l'utilizzo sconsiderato di software. La rappresentazione dell'opera è solo uno degli output della metodologia BIM. Difatti la vera natura del BIM che dovrebbe emergere è quella che consente di svolgere analisi di natura diversa come la valutazione del costo dell'opera, dei tempi di realizzazione, della gestione delle attività di manutenzione o come analisi di impatto ambientale e molto altro ancora.

Se il BIM è utilizzato con questo scopo i benefici sono tali da considerare superfluo qualsiasi termine di paragone con le metodologie di progetto e gestione tradizionali. Di contro l'incapacità di sfruttare tale potenzialità lo rende uno strumento sterile che finisce solo per appesantire ulteriormente il lavoro del team di progetto.

Il modello 3D offerto da una progettazione BIM oriented non è solo una mera riproduzione grafica, come nel caso della progettazione CAD, bensì una rappresentazione tridimensionale che porta con sé tutte le informazioni che definiscono l'oggetto stesso.

La metodologia BIM consente un'efficiente *interoperabilità* tra le parti coinvolte nel progetto. Con questo termine si indica la possibilità di scambiare i dati senza una

perdita sostanziale di informazioni e nella maniera più semplice possibile. I singoli attori quali ingegneri, architetti, tecnici impiantistici e tutte le figure che svolgono un ruolo attivo nella definizione del modello hanno la possibilità di lavorare separatamente realizzando dei file locali. Affinché sia garantita l'interoperabilità è necessario operare secondo degli standard di lavoro condivisi dall'intero gruppo di progetto. In un approccio BIM le regole di scambio delle informazioni sono pensate per evitare rallentamenti e per migliorare il contenuto dei dati scambiati. I membri del team di progetto possono così interagire attraverso una possibile sovrapposizione dei singoli livelli progettuali creati.

Il modello creato in BIM è un “file sorgente”, unico e condiviso, dal quale le varie figure coinvolte possono attingere le caratteristiche necessarie al loro campo specialistico.

È evidente che i vantaggi associati all'interoperabilità sono notevoli.

Ogni modifica o integrazione, effettuata dal singolo, è contestualmente trasferita al modello unico centrale in modo da minimizzare la perdita d'informazioni e di valutare eventuali criticità tra i diversi livelli progettuali. Si evitano, così, perdite di tempo legate alla necessità di comunicare costantemente le modifiche apportate e gli errori derivanti dalla mancata o insufficiente comunicazione tra i soggetti coinvolti.

Inoltre il metodo cresce di affidabilità garantendo un controllo globale e in tempo reale del progetto e permette di migliorare, di conseguenza, l'efficacia e l'efficienza dell'intero processo edilizio.

Da un punto di vista pratico l'interoperabilità in fase di progettazione tra i diversi livelli di progetto e gli ambienti di calcolo è garantita dall'estrazione, dal modello centrale BIM, di file in un formato standard denominato IFC (*Industry Foundation Classes*).

L'IFC è un formato file basato sullo standard ISO 16739 (2013) ed è utilizzato a supporto del Building Information Modeling per facilitare l'interoperabilità tra le differenti piattaforme di lavoro. Nato nel 1995 per opera di un gruppo di lavoro americano ed europeo (AEC), lo standard racchiude informazioni e parametri che sono associati ai diversi oggetti di lavoro utilizzati nell'industria delle costruzioni.

La procedura consente, ad esempio, un'interazione bidirezionale tra ambiente BIM e software di verifica strutturale comportando un'elevata riduzione dei tempi associati alla fase di progetto. Per rendersi conto dei notevoli risparmi temporali si pensi a come possa variare un progetto strutturale al variare di quello architettonico. Tramite la metodologia BIM una variazione del progetto architettonico, già di per sé è immediata rispetto alla progettazione CAD tradizionale, si riflette immediatamente sul progetto strutturale.

Per ciò che concerne la possibilità di riduzione o annullamento delle incongruenze, all'atto della sovrapposizione dei singoli livelli di progetto (architettonico, strutturale e impiantistico), il software segnala le interferenze presenti, cosa che evidentemente non è controllabile in una progettazione tradizionale nella quale potrebbe addirittura non esservi un'interazione e un confronto tra gli output prodotti. Più in particolare è possibile, in un approccio BIM-based, definire due tipologie di controllo: il *Code Checking* e la *Clash Detection*. La prima valuta la rispondenza del progetto all'apparato normativo, la seconda è inerente al controllo geometrico tra i diversi modelli che costituiscono il progetto; in altre parole valuta le interferenze che vengono a crearsi tra il modello architettonico, quello strutturale e quello impiantistico. In realtà, oltre alla congruenza tra gli elaborati e all'osservazione delle norme, in fase di definizione del

modello, è possibile evidenziare altre tipologie di non conformità legate alla incompletezza degli elaborati progettuali prodotti [4].

A differenza di un tradizionale sistema CAD (*Computer Aided Design*) il modello BIM è in grado di contenere qualsiasi informazione riguardante l'edificio e le sue parti.

L'approccio BIM-based ha contribuito a modificare la concezione delle attività di progetto all'interno dell'economia complessiva dell'opera.

Se prima, infatti, non era immediato individuare delle relazioni tra la fase di progettazione e di realizzazione con la gestione dell'opera, ora attraverso la metodologia BIM, le tre fasi vanno a costituire tre anelli strettamente collegati di una stessa catena.

È innegabile che l'evoluzione del BIM sia conseguenza di una nuova concezione delle infrastrutture. Oggi, infatti, è sempre più richiesta la capacità di controllo e di monitoraggio dell'opera durante l'intero ciclo di vita. Poter disporre di informazioni qualitative e quantitative relative i singoli elementi del modello è, dunque, di fondamentale importanza, anche in un'ottica di valutazione di impatto ambientale come vedremo più avanti nel dettaglio.

Per quanto riguarda la fase di progettazione, è evidente che l'approccio BIM based comporta, rispetto a un progetto tradizionale, un impegno maggiore nella fase iniziale di definizione del modello a causa della minore fluidità di rappresentazione grafica degli elementi e della necessità di caricare le informazioni utili per le analisi associate [5] [6].

Superata questa fase, però, i vantaggi associati all'utilizzo della metodologia BIM sono evidenti e portano il team di progetto a poter impegnare risorse temporali ed

economiche su attività decisionali finalizzate a incrementare l'efficienza del progetto e il relativo ritorno economico.

In Figura 1.1 la curva in nero rappresenta l'andamento dell'impegno programmato per le attività di progettazione secondo un approccio tradizionale. La curva arancio è, invece, indicativa dell'andamento dello stesso parametro in un approccio BIM-based [7].

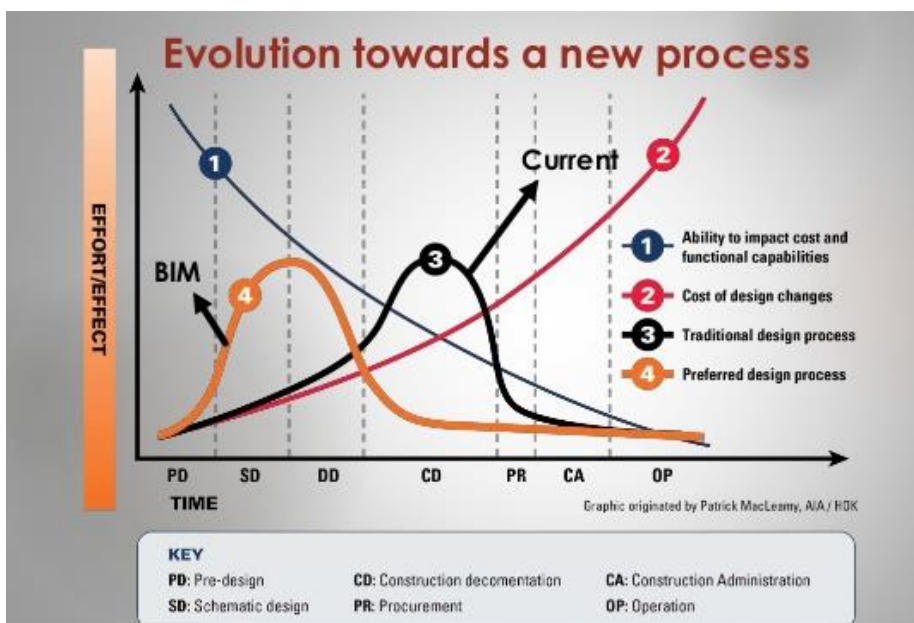


Figura 1.1 Confronto tra l'effort richiesto nella fase di progettazione utilizzando un approccio di lavoro tradizionale e uno BIM-based (Fonte: Patrick MacLeamy, AIA/HOC)

1.1.1 BIM Maturity Levels

Dati i diversi livelli di utilizzo del BIM è stato necessario definire dei *Maturity Levels*, che stabiliscono il livello di dettaglio raggiunto (LOD), il grado d'interoperabilità e la potenziale fase del processo edilizio da poter gestire.

In letteratura, pertanto, quando si parla di modellazione BIM si è soliti individuare differenti “*maturity levels*” che evidenziano la possibilità di utilizzo della metodologia per scopi diversi e a differenti livelli di approfondimento [8].

Gli standard BIM individuano quattro differenti livelli di maturità nella modellazione. Si parte dal livello 0 corrispondente alla classica rappresentazione CAD bidimensionale. Si passa poi a una rappresentazione 3D e 4D se si considerano il flusso di materiale e il tempo di esecuzione delle lavorazioni, alla 5D inserendo la valutazione economica dell'opera, fino a una rappresentazione 6D mediante la realizzazione di un modello “*as built*”. Il massimo Maturity Level identifica, dunque, un modello digitale che contiene tutte le possibili informazioni, associate all'infrastruttura, utili alla programmazione di qualsiasi attività di manutenzione e di gestione del costruito [9].

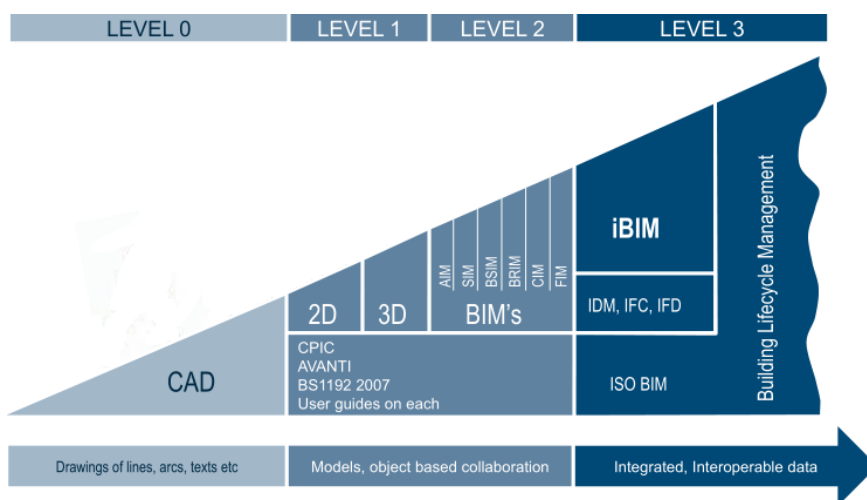


Figura 1.2 Maturity levels per l'utilizzo del BIM

(Fonte: ISO BIM 2009/2010)

Lo Standard ISO definisce i quattro livelli di maturità come:

Livello 0 : è la forma più semplice di BIM. Il BIM può, in questo livello di maturità, essere comparato a un CAD 2D in cui è consentito lo scambio di informazione elementari ma non vi è interoperabilità tra gli utenti. In molte realtà il BIM è ancora utilizzato con questo livello di approfondimento;

Livello 1: a questo livello il CAD comincia a essere formalmente gestito grazie all'introduzione di funzioni di coordinamento spaziale e formati specializzati. La rappresentazione diventa 3D ma le informazioni caricate nel modello non sono ancora condivise tra i membri del team di progetto;

Livello 2: è il primo livello di approfondimento in cui si sviluppa una reale collaborazione tra gli attori del processo. Tutte le parti realizzano file di rappresentazione 3D che possono essere facilmente integrati e sovrapposti con l'obiettivo di rendere il modello BIM unico e integrato e di compiere controlli interrogativi su di esso. In definitiva il Livello 2 è un ambiente 3D comprensivo di informazioni che, anche se sovrapposte, non perdono la loro identità. I dati inseriti possono essere relativi anche alle tempistiche di costruzione (informazioni 4D) o contenere dettagli sui costi di realizzazione e gestione del costruito (informazioni 5D). Questo livello di maturità è auspicato dai governi giacché rende efficace la metodologia BIM. Nel Regno Unito la sfida annunciata prevede di garantire, negli appalti pubblici, tale livello di maturità entro il 2016. In Spagna è stato dichiarato lo stesso obiettivo da raggiungere entro il 2018. In Italia gli orizzonti temporali sono più ampi a causa della difficoltà che sta riscontrando la metodologia nel permeare il mondo delle costruzioni (il livello 2 di maturità si renderà obbligatorio dal 2025);

Livello 3: rappresenta la piena e completa collaborazione tra tutte le discipline e prevede l'utilizzo di un unico modello progettuale condiviso conforme allo standard IFC. A questo livello di approfondimento entrano in gioco una serie di informazioni sul progetto sull'intero ciclo di vita dell'opera (informazioni 6D). Il team di progetto assume il controllo completo della costruzione potendo monitorare non solo le tempistiche e i costi dell'opera ma anche le attività di gestione e più in generale tutte le performance previste. A questo livello il modello digitale è definito "as built" in quanto permette di reperire qualsiasi informazione utile associata alla costruzione sia di natura qualitativa sia quantitativa. Il livello 3 è utilizzato solo in poche aziende. La sua difficoltà di

implementazione non è correlata solo allo sviluppo tecnologico dell'azienda che lo propone ma dipende, soprattutto, dalla possibilità di usufruire di un processo completamente aperto e di un'integrazione dei dati abilitata per "servizi web" conformi alle norme IFC e gestiti da un server in maniera collaborativa. Occorre, pertanto, che il sistema Paese consenta di lavorare in collegamento digitale in modo efficace e in tempi reali [10]

Riguardo al flusso di informazioni che fluiscono nel modello BIM è utile soffermarsi sui benefici associati alla definizione dei tempi necessari alla realizzazione dell'opera (informazioni 4D), alla valutazione dei costi (informazioni 5D) e alla possibilità di condurre analisi di management (informazioni 6D).

Modello 4D: la gestione dei tempi

Per usufruire di informazioni utili che consentano di definire i tempi necessari alla realizzazione dell'opera occorre, dapprima, scomporre il processo di progettazione, realizzazione e gestione in una serie di attività elementari delle quali sia possibile monitorare direttamente il tempo di esecuzione. Il processo di schedulazione del progetto può ritenersi composto di due fasi:

Una prima in cui si definiscono gli strumenti e i criteri di schedulazione;

Una seconda di natura operativa in cui, applicando i criteri definiti, si procede alla valutazione vera e propria della sequenza delle attività.

In genere i modelli di schedulazione maggiormente utilizzati sono il *Diagramma di Gantt* e il metodo del percorso critico (*Critical Path Method*). Il Gantt consente, attraverso una rappresentazione grafica, di definire l'ordine di esecuzione delle attività, la durata delle

singole e i legami logici esistenti tra le stesse. Attraverso il metodo del percorso critico, invece, una volta proceduto alla temporizzazione delle attività, è possibile definire la durata complessiva minima del progetto. Essa si ottiene considerando tutte le attività che presentano uno scorrimento nullo ovvero le attività che non possono essere trasferite temporalmente nell'economia del progetto senza ritardarne la fine.

Nel mondo attuale delle costruzioni avere il controllo delle tempistiche di esecuzione delle singole attività è di fondamentale importanza. Spesso i costi maggiori che le imprese devono sostenere sono proprio associati al pagamento di penali dovute a ritardi nella consegna dei lavori.

Eseguire una corretta schedulazione del progetto consente, pertanto, di allocare più risorse sulle attività che non possono subire scorrimenti rispettando i vincoli temporali imposti dalla committenza. In questo contesto appare evidente la potenzialità del BIM. Solo se si è in grado di pianificare i tempi di esecuzione delle singole attività si può, infatti, pensare di monitorare gli stessi e di realizzare, se necessario, a piani di recupero dei tempi.

Le moderne teorie di gestione dei tempi di esecuzione delle attività sono rese quantificabili attraverso la definizione di indici di efficienza che consentono di valutare se il progetto è in “sottoschedulazione” o in “sopraschedulazione”.

Modello 5D: la gestione dei costi

L'utilizzo della metodologia BIM a un livello di maturità almeno pari a 2 consente anche di generare il preventivo di commessa dell'opera.

Il modello BIM lavora su elementi parametrizzati. Se si inserisce, in fase di modellazione, il costo del singolo elemento è immediato costruire un preventivo di commessa preciso e, soprattutto, aggiornabile in tempo reale. Basta, infatti, modificare un elemento per ridefinire il budget.

Per procedere alla definizione del preventivo di commessa è necessario disporre nel modello di informazioni riguardanti le risorse utilizzate (impegno programmato) e al costo unitario delle stesse. Il preventivo di commessa si costruisce, perciò, man mano che si procede alla realizzazione del modello. Esso è un preventivo esecutivo e si basa sul capitolato tecnico economico, sulla definizione dei pacchetti di attività (*WP: work packages*) e sulla stima delle risorse dei WP.

La potenzialità della metodologia BIM consiste nel poter generare, in ogni istante della vita del progetto, anche un preventivo di commessa aggiornato ovvero un preventivo di spesa valutato al generico istante temporale e costruito come la somma dei costi delle attività sostenute fino al generico *time now* e la stima dei costi al completamento delle attività ancora da eseguire. E' possibile, anche, valutare degli indici che restituiscano una visione futura del livello di performance che deve essere raggiunto, in termini di costi, per riportare il progetto in linea con il budget programmato (*TCOI= To Complete Performance Index*).

Modello 6D: Facility Management

Il limite maggiore della progettazione tradizionale è rappresentato dall'incapacità di realizzare un database di informazioni ampio e aggiornabile attraverso il quale programmare le attività di management. Non sono rari i casi in cui i dati riguardanti il

manufatto sono carenti, al punto da originare dei ritardi negli interventi di manutenzione con un conseguente incremento dei costi associati. La messa a punto di un modello BIM 6D permette di superare completamente tali inefficienze. Difatti, a tale livello di dettaglio, si dispone non solo di tutte le tavole progettuali (piante, carpenterie, sezioni, prospetti, modello strutturale, ecc.) e di tutti gli elaborati prodotti in fase di progettazione e costruzione dell'opera ma anche di una serie di informazioni utili per la programmazione e il coordinamento delle attività di manutenzione. Il fine ultimo del Facility Management, pertanto, è quello di generare ambienti di lavoro efficienti attraverso processi che coniughino qualità dei servizi, sicurezza dei fruitori e dei lavoratori e sostenibilità degli interventi.

Il raggiungimento di tali obiettivi richiede una governance capace di adottare processi proficui che, non solo consentano di identificare con precisione i componenti degli impianti o delle parti edili, ma che permettano una gestione degli immobili basata su dati integrati e su sistemi informativi interoperabili. L'efficacia delle attività di Facility Management dipende dall'accuratezza e dall'accessibilità dei dati riguardanti l'edificio implementati nelle fasi di progettazione e costruzione oppure rilevati in fase di "*as built*" e aggiornati in funzione delle operazioni eseguite durante la fase di mantenimento. La mancanza di queste informazioni può causare il superamento dei costi, inefficienze di sistema oltre a non rispondere alle richieste dei fruitori.

Oggigiorno esistono differenti applicazioni software utilizzate per le attività di Facility Management (*Archibus, FM Sistem, ecc.*) che si interfacciano in maniera ottimale con l'ambiente BIM. L'integrazione è garantita perché la metodologia consente la visualizzazione dello stato di fatto dell'opera, la conoscenza della collocazione e delle

relazioni tra sistemi e componenti costruttivi, oltre a permettere di verificare eventuali interferenze tra attività e spazi e rendere fruibili dati estremamente accurati della condizione esistente.

1.2 Implementazione Oggetti BIM

L'utilizzo sempre più diffuso del BIM per la modellazione di opere civili ha portato le industrie leader nella produzione di componenti per l'edilizia a trasferire i loro cataloghi in formato IFC in modo da renderli fruibili in piattaforme di progettazione BIM.

Per comprendere la potenzialità del mondo BIM in fase di definizione di un oggetto è necessario dapprima analizzare nel dettaglio cosa si intende per "oggetto parametrico".

Un oggetto parametrico è un ente geometrico tridimensionale cui sono associate precise informazioni e regole. La geometria che lo caratterizza è integrata e mai ridondante e non permette incoerenze. Le regole parametriche dell'oggetto ne modificano in automatico la geometria e le dimensioni quando sono inserite nel modello dell'edificio. Inoltre ogni oggetto può essere definito a diversi livelli di aggregazione così come

può avvenire per tutti i componenti che lo caratterizzano. Infine i componenti BIM possono essere collegati tra loro e sono in grado di esportare ad altre applicazioni informazioni di qualsiasi genere.

Gli oggetti BIM devono comunque rispondere a degli standard i quali possono avere diversi formati:

- Modelli campione;

- Librerie di contenuti centralizzate all'interno degli strumenti BIM;
- File di parametri;
- Librerie di oggetti specifiche della disciplina.

In genere tutti i software che sviluppano una metodologia BIM sono dotati per molti oggetti di librerie di standard disponibili in rete.

Non sempre, però, i prodotti forniti dalle librerie rispondono alle esigenze del modellatore che ha, pertanto, la possibilità di realizzare oggetti “ad hoc” personalizzandoli in funzione delle specifiche richieste. E' possibile, infatti, caratterizzare un oggetto BIM sia dimensionalmente che modificando o inserendo parametri meccanici, di costo, di quantità o di rendimento in funzione del livello di dettaglio che si intende raggiungere.

Quest'aspetto è direttamente correlato alla filosofia che sta alla base della metodologia BIM la quale, essendo aperta, consente, in qualsiasi fase, di integrare parametri e informazioni.

L'iter per la modellazione di componenti strutturali e non strutturali esula da questa trattazione. Ciò che si vuole qui evidenziare è come l'attuale tendenza da parte delle aziende produttrici di mettere a disposizione oggetti che possono essere utilizzati in un'implementazione BIM porta con sé due grandi vantaggi:

- Da un lato si semplifica l'interazione tra l'azienda produttrice e il cliente BIM con il beneficio da parte del produttore di realizzare un bene direttamente fruibile;
- Dall'altro l'utilizzatore BIM può basare la propria modellazione su oggetti che rispondono a degli standard che possono essere modificati secondo esigenze

specifiche e utilizzati per condurre una qualsiasi tipologia di analisi (strutturale, energetica, prestazionale, di costo, ecc.).

Le future frontiere del mondo dell'edilizia non possono che aprirsi a questo nuovo scenario che semplificherà le fasi di modellazione e di progettazione e soprattutto segnerà la svolta per consentire un corretto processo di manutenzione dell'esistente.

2. IL BIM A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE

2.1 Il BIM nella valutazione dell'impatto ambientale mediante l'integrazione di analisi LCA

Nel presente capitolo, dopo una panoramica generale sulla sostenibilità nel settore delle costruzioni, è eseguita un'attenta analisi sugli strumenti che combinati al BIM si prestano alla conduzione di valutazioni di impatto ambientale.

In particolare è approfondita la metodologia nota come Life Cycle Assessment (LCA), metodologia che quantifica gli impatti sull'ambiente generati da un prodotto, servizio o processo tenendo conto dell'intero ciclo di vita con lo scopo di sviluppare strategie di mitigazione del rischio ambientale.

Le analisi LCA contribuiscono a fornire, in fase di progettazione, informazioni circa la sostenibilità delle scelte operate, rendendo quindi consapevole e orientando il percorso decisionale.

Si intende trasmettere al lettore che se da un lato il BIM rappresenta per il mondo delle costruzioni edili un valido strumento di decision making in termini di costi, tempo e soluzioni progettuali, dall'altro, estendendo la metodologia a valutazioni LCA, esso può essere utilizzato proficuamente come strumento di valutazione della sostenibilità ambientale delle opere civili.

Si precisa che l'integrazione di analisi LCA in ambito BIM consente di analizzare dati legati alla sostenibilità ambientale che rappresenta solo uno degli aspetti della sostenibilità complessiva, insieme con quelli di carattere economico e sociale.

2.2 La sostenibilità e lo sviluppo sostenibile

La sostenibilità è oggi riconosciuta come uno dei requisiti fondamentali per lo sviluppo della società contemporanea e delle città. Il concetto di sostenibilità è evocato per caratterizzare e definire il rapporto ottimale tra uomo e natura, in qualsiasi forma esso si realizzi. Dall'utilizzo delle risorse naturali, allo sviluppo di tecnologie e prodotti, fino allo sviluppo delle città e all'utilizzo del territorio la sostenibilità costituisce un requisito essenziale per il governo delle trasformazioni e dei processi coinvolti. Eppure il concetto di sostenibilità è estremamente complesso e la corretta implementazione di processi o trasformazioni "sostenibili" può essere estremamente ardua. La sostenibilità dello sviluppo mira, infatti, nella sua accezione più vasta, a governare un sistema complesso di soggetti ed entità, rappresentate dall'uomo e dalla società da un lato e dall'ambiente e dalle risorse naturali dall'altro, distinte nello spazio e nel tempo, connesse da relazioni complesse e conflittuali tra loro.

In letteratura esistono diverse interpretazioni del concetto di sviluppo sostenibile principalmente basate sulla definizione presente nel *rapporto Brundtland*, noto anche come *Our Common Future*, rilasciato nel 1987 durante il *World Commission on Environment and Development* (WCED). In tale rapporto si definisce lo sviluppo sostenibile come *"Lo sviluppo che soddisfa i bisogni delle generazioni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze"* [11].

Tale definizione è rappresentativa dell'ampiezza del concetto di sostenibilità, al punto tale che ogni prodotto, processo o azione della nostra epoca può avere ripercussioni in tale ambito. Per definire le strategie di intervento è stato necessario dare

un'interpretazione a tale definizione scomponendola, in via preliminare, in due principali obiettivi: (i) il soddisfacimento dei bisogni dell'attuale generazione e (ii) la capacità delle generazioni future a soddisfare i loro bisogni [12]. Per quanto riguarda il secondo obiettivo, è necessario definire un livello di riferimento per la capacità di soddisfacimento dei bisogni delle generazioni future. L'interpretazione di tale livello di riferimento, in accordo con il rapporto di Brundtland, è ispirata dal principio di equità generazionale secondo il quale bisogna garantire alle generazioni future le stesse possibilità della generazione corrente. Detto ciò un altro nodo da sciogliere è rappresentato dalla definizione delle possibilità da garantire alle generazioni future. La soluzione a tale problematica deriva direttamente dalla teoria economica nella definizione di "capitale".

In accordo con la definizione di Costanza et al. (1997), per capitale si intende tutto quello che genera un flusso di servizi per migliorare il benessere degli esseri umani; per cui bisogna garantire alle generazioni future lo stesso capitale per mantenere lo stesso livello di benessere.

Mantenere lo stesso livello di benessere significa garantire un capitale che risulta suddiviso in quattro categorie dalla World Bank (1997): (i) natural capital, (ii) human capital, (iii) social capital e (iv) produced capital.

Il natural capital è caratterizzato da tutti i servizi di approvvigionamento di provviste alimentari, di materie prime, di depurazione dell'acqua fino ad arrivare alle attività ricreative ed estetiche che la natura può fornire.

Lo human capital, invece, fa riferimento a tutte le attività basate sulla formazione e l'educazione degli esseri umani fino ad arrivare al patrimonio intellettuale dell'avanzamento scientifico dell'uomo.

Il social capital è determinato da tutti i processi relazionali e di scambio di informazioni dell'uomo che fortifica tutti i processi di decision making e di coordinamento delle attività.

Il produced capital, infine, è individuato da tutti i beni prodotti dall'uomo, come strutture, infrastrutture, immobili, computer e tutto quello che è derivato dalla produzione dell'uomo.

Definire, quindi, delle strategie di sviluppo sostenibile comporta un'elevata complessità di analisi che inizia dall'utilizzo delle risorse naturali, passa per lo sviluppo di tecnologie e prodotti, fino ad arrivare allo sviluppo delle città e all'utilizzo del territorio.

A tal proposito, gli obiettivi dello sviluppo sostenibile sono rappresentati dalla teoria "*triple bottom line*" che è basata sull'integrazione e sul raggiungimento simultaneo di obiettivi ambientali, economici e sociali (Figura 2.1).

L'ambiente, la società e l'economia sono considerati i tre pilasti della sostenibilità ed è proprio per il raggiungimento di questo triangolo di obiettivi in maniera simultanea che sono nati diversi strumenti e metodi per la valutazione della sostenibilità. Tali strumenti sono basati sul concetto di LCT (*Life Cycle Thinking*).

L'LCT punta a sviluppare valutazioni in termini ambientali, economici e sociali di prodotti o di processi tenendo conto degli interi cicli di vita partendo dall'estrazione dei materiali primari, passando per il processo produttivo, fino ad arrivare alla fase di uso e infine al riciclo o al trasporto in discarica [13].

I metodi basati sul concetto di LCT seguono lo schema del Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA):

$$\text{LCSA} = \text{LCA} + \text{LCC} + \text{SLCA}$$

Dove il Life Cycle Assessment (LCA) è la valutazione degli impatti sull'ambiente, il Life Cycle Costing (LCC) è la valutazione degli impatti economici ed il Social o Societal Life Cycle Assessment SLCA è la valutazione degli impatti in termini sociali e socio economici [14].

Il Life Cycle Assessment mira a quantificare in maniera analitica e affidabile gli impatti che un materiale, un prodotto o un processo possono avere sull'ambiente durante il loro intero ciclo di vita.

Tale approccio, che sarà approfondito nei capitoli seguenti, in letteratura è sintetizzato con l'espressione *"from cradle to grave"*, proprio perché tiene conto di tutte le fasi del processo di trasformazione, dall'estrazione dei materiali primari, alla loro lavorazione, al trasporto e distribuzione, alla messa in opera, alla fase di uso e manutenzione, fino alla dismissione al termine del ciclo di vita.

Il Life Cycle Costing, basato sullo stesso principio del LCA, valuta tutti i costi associati a un materiale, un prodotto o un processo durante il loro intero ciclo di vita, tenendo conto dei costi di fornitura e produzione, dei costi dell'utente finale o del consumatore, fino ai suoi costi di dismissione.

Il Social o Societal Life Cycle Assessment è una disciplina ancora in fase di sviluppo, anche se l'idea risale già alla fine degli anni '80.

Tale disciplina mira a valutare gli impatti sociali e socio-economici dei prodotti durante il ciclo di vita in termini positivi o negativi (ad esempio la ricaduta che hanno sul

capitale umano, sui comportamenti degli esseri umani o delle imprese). L'SLCA non ha come obiettivo quello di fornire gli elementi per decidere se un prodotto deve essere realizzato o meno, bensì, di fornire delle valutazioni in merito all'utilità della produzione di un determinato prodotto o processo [12].

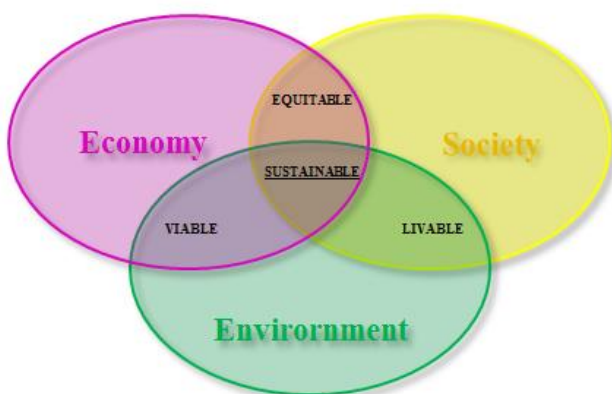


Figura 2.1 Triple Bottom Line Theory

In tale scenario, un ruolo di grande rilievo è rivestito dal settore delle costruzioni sia in termini d'impatto sulla sostenibilità sia in termini di sviluppo di nuove tecniche e metodologie a supporto dei processi di decision making.

2.3 LCA nel settore delle costruzioni

All'interno della sfida per lo sviluppo sostenibile delle città, un ruolo fondamentale è assunto dal mondo delle costruzioni e dell'edilizia. Il peso delle costruzioni nel

generare la “insostenibilità” delle città e dei territori o in generale dello sviluppo della società è elevatissimo, perché elevatissimo è il valore delle costruzioni nella società contemporanea.

Alla luce di ciò, la sostenibilità nel settore delle costruzioni va perseguita analizzando e governando le ricadute degli interventi e delle trasformazioni sui piani economico, sociale e ambientale, sia al momento della realizzazione degli interventi che durante la vita utile degli interventi stessi e durante la loro dismissione.

Troppo spesso, soprattutto in edilizia, il requisito della sostenibilità è ridotto e confuso con soli requisiti energetici. Infatti, a causa anche di un quadro normativo non ancora definito e a causa di procedure e metodi di valutazione della sostenibilità non ancora affermati, un intervento edilizio è spesso definito sostenibile solo se in qualche modo determina un risparmio energetico in una fase della vita utile dell'intervento stesso.

La sostenibilità invece deve risiedere nel raggiungimento di un equilibrio ottimale tra il soddisfacimento, in diversi momenti nel tempo, di requisiti economici, ambientali e sociali, spesso in conflitto tra loro.

E' quindi auspicabile che il processo decisionale alla base della progettazione sia quanto più possibile “informato” attraverso dati relativi agli impatti ambientali, economici e sociali determinati dalle scelte che si operano. In altre parole, la progettazione deve essere gestita in maniera consapevole, sfruttando informazioni complesse riferite alla sostenibilità degli interventi progettati. Spesso però tali informazioni sono difficili da gestire in maniera integrata giacché ampie, variegate e complesse, soprattutto quando riferite agli oggetti della progettazione civile, come edifici e infrastrutture, di per sé costituiti dall'integrazione di sistemi tecnologici diversi.

La mitigazione dell'impatto ambientale degli edifici e delle opere civili è sicuramente un aspetto molto importante nelle strategie di sviluppo sostenibile ma complesso da perseguire.

Il mercato delle costruzioni incide in maniera significativa sull'inquinamento ambientale in termini di sfruttamento di risorse non rinnovabili, di produzione di rifiuti, di consumo di energia e di risorse idriche nonché di emissioni di CO₂ nell'ambiente.

E' stato stimato che oltre il 40% del consumo di materia prima ed il 30-40% della domanda di energia e gas è attribuibile al mercato dell'edilizia inteso come fase di realizzazione ed uso degli immobili [15] [16]. Per tali motivi, la richiesta di edifici e strutture sostenibili, che abbiano un basso impatto sull'ambiente, è sempre crescente al punto tale che le aziende pubbliche e private di costruzioni richiedono ai progettisti dei criteri prestazionali volti al minimo impatto sull'ambiente [17].

Il Life Cycle Assessment è una metodologia, ampiamente utilizzata nell'industria dei prodotti, per valutare l'impatto di questi ultimi sull'ambiente durante l'intero ciclo di vita. Tale metodologia, negli ultimi 10 anni, si sta diffondendo anche nell'industria dell'edilizia [18] [19].

Il Life Cycle Assessment permette di quantificare gli impatti che un singolo materiale, prodotto o processo possono avere sull'ambiente durante il suo intero ciclo di vita, usualmente, tale approccio è sintetizzato *"from the cradle to grave"*. Tale analisi tiene conto della fase di estrazione dei materiali primari, della lavorazione, del trasporto e distribuzione, della fase di uso e manutenzione fino alla dismissione o riciclo al termine del ciclo di vita (Consoli et al.1993).

La metodologia LCA, soprattutto nei processi edilizi, è caratterizzata da un'elevata complessità computazionale e da una vasta mole di dati che rappresentano una barriera per l'utilizzo del LCA nel settore delle costruzioni.

La vastità e la laboriosità dei dati scaturiscono dall'estrema complessità ed eterogeneità dei sistemi, dei materiali e dei componenti che caratterizzano l'oggetto prodotto dall'industria delle costruzioni.

E' in questa complessità e nell'elevata quantità di dati che si colloca il Building Information Modeling, come supporto per l'archiviazione e la gestione ottimizzata di tutte le informazioni per il mercato dell'edilizia.

Il BIM, definito anche come il processo di *generating, storing, managing, exchanging and sharing building information in an interoperable and reusable way* [20], è in grado gestire la vastità delle informazioni provenienti da un'analisi LCA, offrendo la possibilità di gestire, in maniera integrata, un complesso sistema di informazioni, riferito ai vari sistemi e componenti che costituiscono l'opera edile a istanti diversi del ciclo di vita della stessa.

Ovviamente tale opportunità può rendersi disponibile solo a valle di un importante lavoro d'inventario e catalogazione degli impatti ambientali legati ai materiali, ai sistemi, ai componenti e alle lavorazioni che sono adoperati nell'industria delle costruzioni.

In tal modo è possibile offrire ai progettisti la possibilità di compire scelte progettuali, avendo a disposizione informazioni chiare sugli impatti ambientali legati alle diverse alternative tecniche a disposizione.

A questo scopo il presente lavoro illustra una metodologia che integra l'approccio BIM con analisi di LCA mirate alla valutazione dell'impatto ambientale di opere civili, in tutto

il loro ciclo di vita, dalla fase di produzione dei materiali, all'installazione e messa in opera, fino alla dismissione.

L'obiettivo è mostrare come la metodologia BIM si presti a gestire una mole di dati complessa e variegata come quella legata alla valutazione di impatto ambientale attraverso analisi LCA, contribuendo così a fornire, in fase di progettazione, informazioni circa la sostenibilità delle scelte operate, rendendo consapevole e orientando il percorso decisionale. Si precisa quindi che in questo caso, l'integrazione di analisi LCA in ambito BIM consentono di analizzare dati legati alla sostenibilità ambientale che rappresenta quindi uno solo degli aspetti della sostenibilità complessiva, insieme con aspetti economici e sociali.

2.4 Life Cycle Assessment: metodologia

Il Life Cycle Assessment (LCA), come già detto precedentemente, è una metodologia che quantifica gli impatti sull'ambiente generati da un prodotto, servizio o processo tenendo conto dell'intero ciclo di vita con lo scopo di sviluppare strategie di mitigazione del rischio ambientale.

Gli impatti sono quantificati per mezzo di alcuni indicatori che valutano i consumi di materia prima, energia e le emissioni nell'ambiente durante l'intero ciclo di vita del prodotto, servizio o processo con un approccio *“from cradle to the grave”*.

Si tiene conto di tutte le fasi di vita di un prodotto o processo, dall'estrazione e trattamento delle materie prime, della produzione, del trasporto, della distribuzione, del suo utilizzo, riuso e manutenzione, fino al riciclo o trasporto in discarica.

La metodologia LCA è regolata dalle famiglie di norme ISO 14040, in particolare la ISO 14040:2006 e la 14044:2006. La UNI EN ISO 14040:2006 “*Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida*”; è stata elaborata proprio per la preparazione, gestione e la revisione critica del ciclo di vita.

Essa fornisce le linee guida per la fase di valutazione secondo LCA, per la fase di interpretazione dei risultati e per la valutazione relativa alla natura e alla quantità dei dati raccolti.

Lo sviluppo di uno studio di LCA si articola essenziale in quattro fasi.

1. Definizione degli obiettivi (*Goal and Scope Definition*), cioè la definizione del prodotto da analizzare, della sua applicazione e delle ipotesi stabilite per lo studio di LCA.
2. Analisi d’inventario (*Inventory Analysis o Life Cycle Inventory LCI*), nella quale si definisce un diagramma di flusso che descrive l’intero ciclo di vita del prodotto. Tale diagramma è caratterizzato da un inventario di input (i.e. elementi in ingresso come materiali, energia, risorse naturali) e di output (i.e. elementi in uscita come emissione in aria, acqua, suolo) rilevati nel sistema, per effettuare bilanci ambientali in ogni fase del ciclo di vita del prodotto.
3. Valutazione degli impatti ambientali potenziali (*Impact Assessment o Life Cycle Impact Assessment LCIA*), diretti e indiretti, del prodotto sull’ambiente e delle risorse utilizzate mediante alcuni indicatori in funzione di categorie stabilite.
4. Analisi dei risultati (*Interpretation of the results*) nella quale si identificano le fasi del ciclo di vita del prodotto che determinano un contributo maggiore in termini di impatto

sull'ambiente. In questa fase è possibile effettuare la valutazione dei miglioramenti apportabili alle fasi precedenti, ossia definire le possibili linee d'intervento.

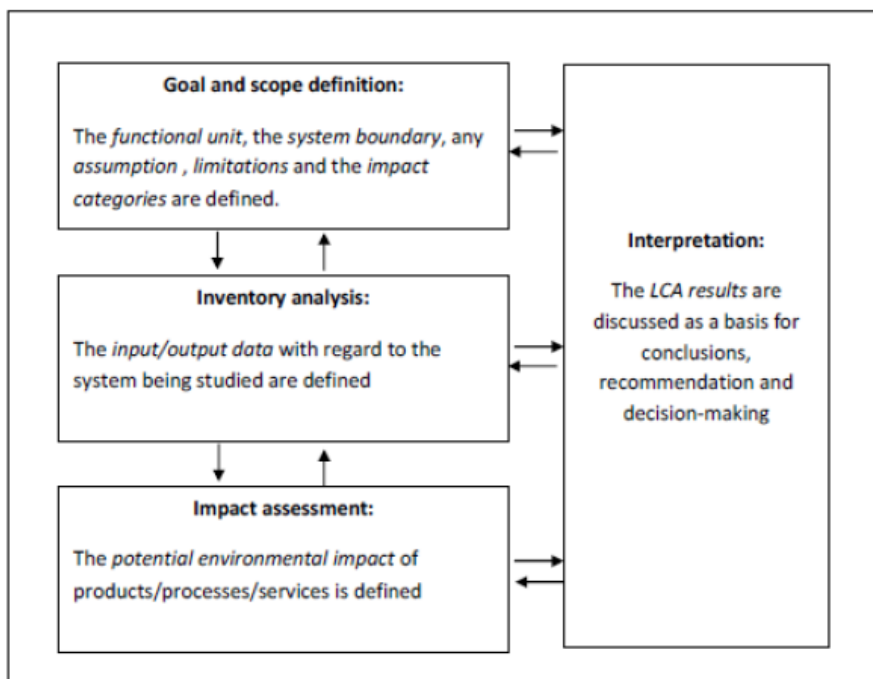


Figura 2.2 Fasi analisi LCA

Sono diversi i motivi per i quali la metodologia LCA sta avendo una diffusione sempre più ampia; infatti, essa è attualmente molto utilizzata nell'industria di prodotto ma si sta diffondendo in maniera molto rapida anche nel settore delle costruzioni.

I principali motivi risiedono in una maggiore consapevolezza dei problemi ambientali che non possono essere affrontati per singoli comparti (aria, acqua e suolo) ma richiedono una valutazione e un intervento globale, in una crescente attenzione alle

politiche ambientali con una domanda ascendente di sostenibilità sia per i prodotti sia per i processi e, infine, nella nascita di nuovi strumenti di valutazione della sostenibilità (LEED, ITACA, etc. etc.) a supporto degli operatori per compiere scelte su criteri di qualità ambientale.

E' in questo ambito che la metodologia LCA permette di:

- valutare, identificare e quantificare gli impatti ambientali di un prodotto, sistema o processo mediante analisi numeriche altamente affidabili;
- effettuare analisi comparative di impatti ambientali sia tra i diversi prodotti sia tra il prodotto e alcuni standard di riferimento;
- conoscere e quantificare la fase del ciclo di vita del prodotto che comporta un maggior impatto sull'ambiente in modo tale da poter effettuare strategie di miglioramento;
- sviluppare strategie di mitigazione degli impatti ambientali dei prodotti, servizi o processi;
- assistere al processo di *decision making* delle industrie, della pubblica amministrazione e dei progettisti;

L'utilizzo del LCA, soprattutto nel processo edilizio, comporta un elevato onere computazionale che implica un importante dispendio di risorse umane ed economiche. Al tal proposito, prima di avviare una campagna di analisi LCA su un prodotto o su un sistema edilizio è necessario effettuare un'analisi preliminare della fattibilità e conoscere i limiti di tale metodologia.

Tali limiti vanno intesi come caratteristiche intrinseche del metodo che ne determinano la sua elevata complessità e che possono così riassumersi.

1. La metodologia LCA è caratterizzata da valutazioni *site-specific*: ad esempio uno studio condotto in un determinato luogo potrebbe essere non rappresentativo di altri casi analoghi situati in altre località.
2. Gli impatti ambientali sono descritti come impatti potenziali perché non sono definiti nello spazio e nel tempo adottando, quindi, un approccio di tipo stazionario.
3. Le ipotesi, le assunzioni e le scelte del confine del sistema sono influenzate da aspetti puramente soggettivi che determinano i risultati definitivi dello studio.
4. L'accuratezza dei dati ottenuti è notevolmente influenzata dalla disponibilità, accessibilità e qualità dei dati.
5. La validità dei risultati è limitata nel tempo secondo il prodotto o il servizio considerato.

Nei paragrafi seguenti saranno descritte nel dettaglio le quattro fasi da seguire per effettuare un'analisi di LCA.

2.4.1 Definizione degli obiettivi (Goal and scope definition)

Questa fase è essenziale per definire tutta l'analisi LCA, poiché consiste nella definizione degli obiettivi e degli scopi da raggiungere; essa è a sua volta suddivisa in quattro sottofasi.

1. Definire gli scopi e degli obiettivi.
2. Scegliere e definire l'unità funzionale.
3. Delimitare il campo di studio.
4. Effettuare un esame della rappresentatività.

Definizione degli scopi e degli obiettivi

In questa sottofase si definiscono le ipotesi iniziali dello studio di LCA da condurre, come gli obiettivi che si intendono perseguire, i limiti temporali e geografici, la tipologia di committente e a quale target si rivolge l'analisi.

A tal proposito, l'ISO 14040 afferma che *“L'obiettivo di un'analisi di LCA è di stabilire senza ambiguità quale sia l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il contesto cui è destinato”*.

Innanzitutto si sceglie lo scopo da perseguire mediante un'analisi di LCA che può essere di tre tipi: (i) *comparativa*, utilizzata se si vogliono comparare, in termini ambientali, prodotti o sistemi alternativi, (ii) *esplorativa*, se si intendono analizzare le performance ambientali di un prodotto, di un processo o di un servizio, (iii) *indicativa*, se si mira a ricavare indici per la riduzione dei costi e degli impatti ambientali.

Definizione e scelta dell'unità funzionale

L'unità funzionale è il riferimento al quale tutti i flussi di dati di input e di output devono essere normalizzati. La ISO 14040 afferma che *“Una unità funzionale costituisce una misura della prestazione del flusso in uscita del sistema prodotto. Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento cui legare i flussi in entrata e in uscita. L'unità funzionale è il riferimento necessario per permettere la comparabilità dei dati e quindi dei risultati di un LCA”*.

In definitiva, l'unità funzionale è il parametro di riferimento per condurre tutte le analisi, i bilanci e gli opportuni confronti dei flussi di dati in entrata e in uscita.

Delimitazione del campo di studio (confini del sistema)

Data la complessità di uno studio di LCA è impossibile riuscire a tenere in conto di tutti i dati di input e di output del sistema. A tal proposito, è necessario definire delle ipotesi alla base dello studio che definiscono “i confini dello studio”.

In ogni bilancio, sia esso contabile o fisico, di un sistema, è necessario stabilirne i confini, cioè evidenziare le fasi considerate e le fasi trascurate nel corso dell’analisi. I confini del sistema, solitamente, definiscono tutti i processi che devono essere inclusi o esclusi dall’analisi.

Con un approccio *“dalla culla alla tomba”*, le fasi da considerare sono quelle corrispondenti all’intero ciclo di vita di un prodotto (i.e. estrazione delle materie prime, produzione, trasposti, uso e fine vita). Anche l’ISO 14040 afferma che *“I criteri adottati nello stabilire i confini del sistema devono essere identificati”*.

Utilizzando un approccio del confine del sistema *“dalla culla al cancello”* è possibile escludere alcune fasi del ciclo di vita di un prodotto, cioè la fase di uso e di fine vita; mentre con un approccio *“dal cancello alla tomba”* è possibile escludere la fase di estrazione delle materie prime e la fase di produzione.

Esame della rappresentatività

Per condurre un’analisi di LCA corretta è necessario che i dati utilizzati siano coerenti con gli obiettivi dello studio. E’ necessario, infatti, valutare la rappresentatività dei dati in relazione ai prodotti, ai servizi, ai processi in funzione degli obiettivi dello studio e del sito di riferimento. I dati utilizzati devono essere coerenti con l’analisi condotta: ad esempio, se si analizza un processo produttivo di un’azienda italiana utilizzando dati di

altri paesi come riferimento si può correre il rischio di avere un risultato poco rappresentativo.

2.4.2 Analisi dell'inventario (LCI)

La fase di analisi dell'inventario è la seconda fase di una valutazione di LCA [21]. In tale fase è sviluppato un vero e proprio inventario di dati di input e output ambientali. In ciascuna fase del ciclo di vita, una volta definito il confine del sistema, sono computati tutti i flussi e le sostanze in ingresso e in uscita del processo in analisi.

Tutti i dati raccolti, inoltre, sono riferiti all'unità funzionale precedentemente definita. I principali dati di un LCI sono:

- input di energia, materie prime, input ausiliari, input fisici;
- prodotti, co-prodotti e rifiuti;
- emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo;
- altri aspetti ambientali.

La fase di raccolta dei dati di input e di output per sviluppare una corretta analisi di inventario LCA è molto delicata. E' necessario distinguere i dati come primari, secondari e terziari, dei quali, rispettivamente, i primi sono quelli reperiti di persona o in sito, i secondi sono i dati derivanti da letteratura o studi equivalenti come i database disponibili, i terzi sono derivanti da medie, proiezioni o statistiche.

Talvolta, i dati secondari non sono rappresentativi del sistema e dei confini stabiliti per l'analisi; infatti, è possibile incorrere in risultati caratterizzati da elevate incertezze o forti approssimazioni.

I dati secondari sono reperibili attraverso database, come *Ecoinvent* che raggruppa diverse valutazioni nel campo dell'agricoltura, energia, trasporti come biocarburanti biomateriali, materiali per costruzioni, materiali per l'imballaggio, metalli basici e preziosi, elettronici e altro ancora.

Ecoinvent rappresenta uno dei database più completi su scala internazionale.

L'unica criticità, come precedentemente descritto, è la forte influenza di fattori geografici, temporali e tecnologici degli studi presenti in tali database; quindi, è necessario formulare delle ipotesi o delle semplificazioni per adattare tali risultati all'analisi LCA da condurre per evitare di utilizzare dati e informazioni che non si addicono perfettamente alla soluzione in esame.

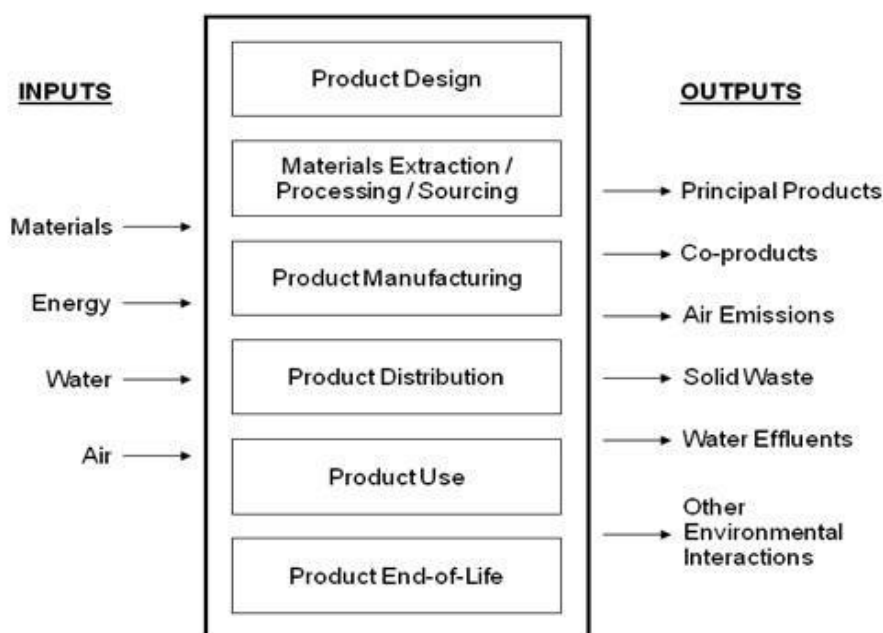


Figura 2.3 Fase di definizione di input/output

2.4.3 Valutazione degli impatti ambientali potenziali

La valutazione degli impatti ambientali LCIA ha l'obiettivo di quantificare e valutare l'impatto ambientale di un determinato prodotto, processo o sistema utilizzando i risultati LCI.

In tale fase si associano i dati derivanti dall'inventario a specifiche categorie di impatto ambientale e si attribuiscono gli indicatori ambientali.

La fase LCIA è caratterizzata da elementi obbligatori (classificazione e caratterizzazione) e da elementi opzionali (normalizzazione e ponderazione). La fase di classificazione e caratterizzazione assegna i risultati dell'inventario alle categorie di

impatto, mentre la fase di normalizzazione e ponderazione converte la caratterizzazione dei risultati di differenti categorie di impatto usando fattori numerici. I valori di caratterizzazione possono essere normalizzati rispetto a un valore di riferimento, allo scopo di definire la grandezza di ciascun effetto ambientale. Tale valore è generalmente rappresentato dalla media dei dati analoghi reperiti su scala globale, regionale o locale, riferito a uno specifico intervallo di tempo. Attraverso la normalizzazione è possibile definire il relativo peso di ciascun aspetto o problema ambientale.

Nella Figura 2.4 si mostra le fasi e gli elementi principali della LCIA:

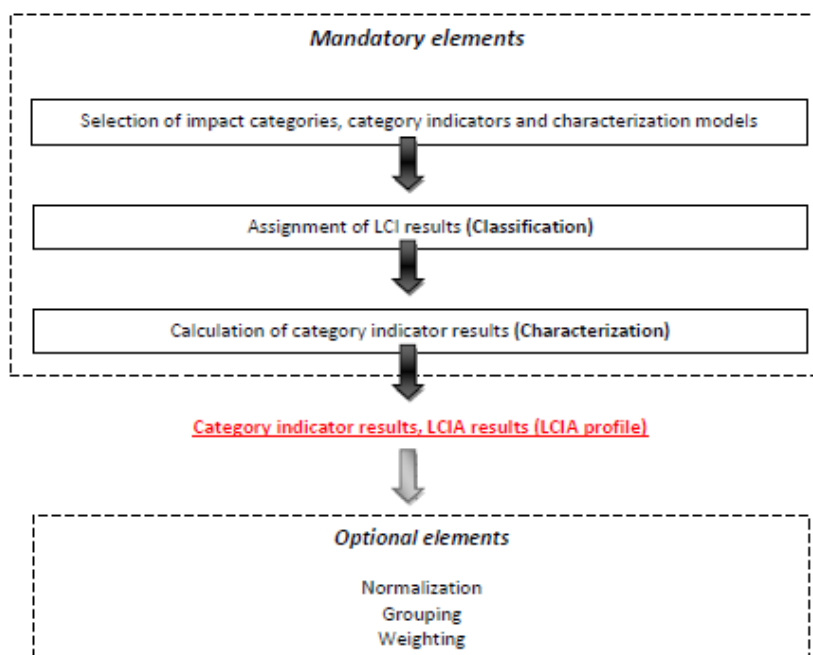


Figura 2.4 Fase LCIA

In letteratura, esistono diversi metodi per condurre la fase di LCIA e quindi per la valutazione degli impatti; essi possono essere suddivisi in tre categorie.

1. Il metodo classico per la valutazione dell'impatto, come EDIP, che esprime i risultati nelle cosiddette "*Mid-point categories*" o categorie intermedie-
2. I metodi orientati al danno, come Ecoindicator 99, che rappresenta i risultati della LCIA nelle "*End-point categories*" o categorie di danno;
3. I metodi orientati alle "*Mid-point/End-point categories*", come l'*Impact2002+* che utilizza i vantaggi di entrambi gli approcci; infatti esso propone la rappresentazione dei risultati sia in termini di categorie intermedie che di danno.

Il metodo *Impact2002+* [22] è uno dei metodi più utilizzati per la fase LCIA in quanto quelli che utilizzano le categorie intermedie forniscono i risultati in termini quantitativi; mentre, i metodi orientato alle categorie finali o di danno, come l'*Impact2002+*, forniscono risultati facilmente interpretabili dagli utenti finali.

Nella Figura 2.5 si mostra lo schema rappresentativo delle categorie fornite dal metodo *Impact2002+*.

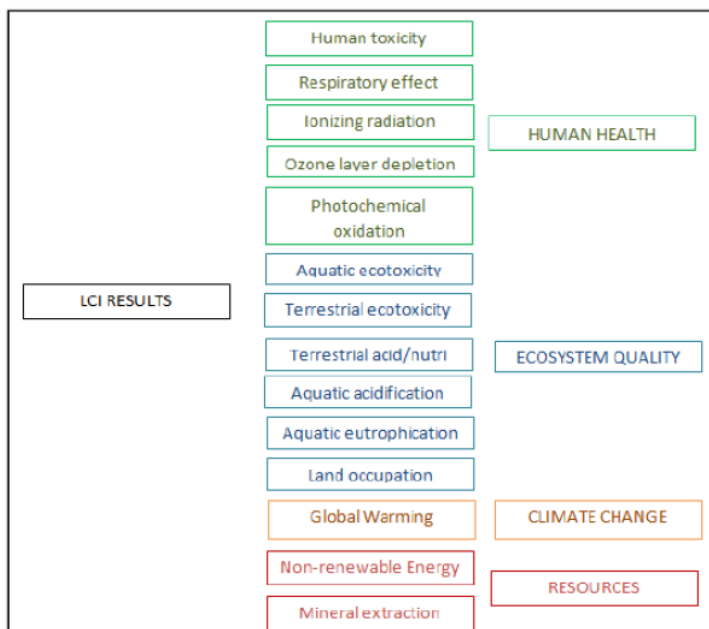


Figura 2.5 Categorie previste dal metodo Impact2002+ [22]

Per la metodologia Impact2002+ i risultati, quindi, possono essere espressi sia in 14 *Mid-point categories* in termini di kg equivalenti della sostanza di riferimento (es. Human Toxicity espressi in kg equivalenti di chloroethylene) che nelle 4 *End-point categories* in termini di *Human Health* (espressi in DALY), *Ecosystem Quality* (espressi in PDF*m²*yr), *Climate Change* (espressi in kg eq. CO₂) e *Resources* (espressi in MJ) [20].

Nella Figura 2.6 si mostra l'accoppiamento tra le 14 categorie intermedie con le quattro categorie finali o di danno.

Nei casi di studio illustrati nella presente trattazione, è stato utilizzato il software Simapro7 per raccogliere e analizzare tutte le performance di sostenibilità dei diversi casi analizzati e l'Impact2002+ come metodologia di rappresentazione dei risultati.

MidPoint category	Midpoint reference substance	Damage categories	Damage unit
Human toxicity (Carcinogens+ non-carcinogens)	kg eq. Chloroethylene into air	Human health	DALY
Respiratory inorganics	Kg eq. PM 2,5 into air	Human health	DALY
Ionizing radiation	kg eq. Carbon-14 into air	Human health	DALY
Ozone layer depletion	kg eq. CFC-11 into air	Human health	DALY
Photochemical oxidation (Respiratory organics for human health)	kg eq.ethylene into air	Human health	DALY
		Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Aquatic ecotoxicity	kg eq. Triethylene glycol into water	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Terrestrial ecotoxicity	kg eq. Triethylene glycol into water	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Terrestrial acidification/nutrication	kg eq. SO ₂ into air	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Aquatic eutrofication	kg eq. PO ₄ into water	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Land occupation	m ² eq organic arable land-year	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Global warming	kg eq. CO ₂ into air	Climate change	kg eq. CO ₂
Non renewable energy	MJ total primary non renewable energy	Resources	MJ
Mineral extraction	MJ additional energy	Resources	MJ

Figura 2.6 Categorie intermedie e di danno, sostanze di riferimento, e unita di danno usate in Impact2002+ [22]

2.4.4 Interpretazione dei risultati

Tale fase ha l'obiettivo di dare un'interpretazione critica dei risultati delle analisi di LCA condotte e di risalire agli elementi che influiscono in maniera maggiore in termini ambientali sia come prodotto sia come fase dell'intero processo. In questa fase è possibile, quindi, sviluppare le strategie di intervento per mitigare gli impatti ambientali sia cambiando il materiale stesso ma anche modificando i processi.

3. Integrazione di LCA nel BIM applicata a un caso studio

L'attività di ricerca che ha portato allo sviluppo della procedura presentata, nasce dalla collaborazione tra il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università Federico II di Napoli, il Consorzio TRE (Tecnologie per il Recupero Edilizio), il centro di ricerca AMRA (Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale) e la società ACCA Software nell'ambito del progetto VINCES (Valutazione Integrata del Ciclo di vita per l'Edilizia Sostenibile), finanziato dal programma Campus della Regione Campania.

3.1.1 Complessità delle LCA nel settore delle costruzioni

La metodologia LCA, soprattutto nei processi edilizi, come si è visto nei paragrafi precedenti, è caratterizzata da un'elevata quantità di dati che spesso rappresentano una barriera per l'utilizzo di analisi LCA nel settore delle costruzioni.

La complessità delle LCA nel settore delle costruzioni ne determina uno scarso utilizzo nell'edilizia e nella progettazione di opere civili, lasciando largo spazio ai protocolli di sostenibilità e sistemi di rating delle performance ambientali.

Tale complessità è determinata dall'elevato numero di dati necessari per sviluppare le analisi di LCA; infatti, secondo la metodologia descritta in precedenza, per raggiungere un approccio *"from cradle to gate"*, per ogni materiale si hanno come input tutti i dati che caratterizzano la fase di estrazione e produzione dei materiali e quelli che definiscono le fasi di messa in opera per la realizzazione di un aggregato edilizio.

Per raggiungere un approccio *“from cradle to grave”*, invece, si considerano anche le fasi di utilizzo, manutenzione e smaltimento. Come dati di output, utilizzando la metodologia Impact2002+, si hanno 4 categorie di danno e 15 categorie di impatto, per tutti i materiali, sistemi e lavorazioni per realizzare un aggregato edilizio.

Tale complessità rappresenta una grande barriera per l'utilizzo di analisi LCA nella progettazione e realizzazione di opere civili, anche se, i professionisti del settore edile quali ingegneri e architetti considerano l'utilizzo di tale metodologia di rilevante importanza per i propri progetti. Per questo motivo, è necessario fornire degli strumenti a supporto della progettazione basati su analisi LCA per favorire il suo utilizzo nella pratica professionale. A tal proposito, è dimostrato che la metodologia LCA è largamente diffusa in ambito della ricerca al punto tale che alcuni ricercatori già la utilizzano per i loro progetti; invece, i professionisti pur conoscendo il metodo e la sua valenza raramente lo utilizzano nelle proprie progettazioni [23].

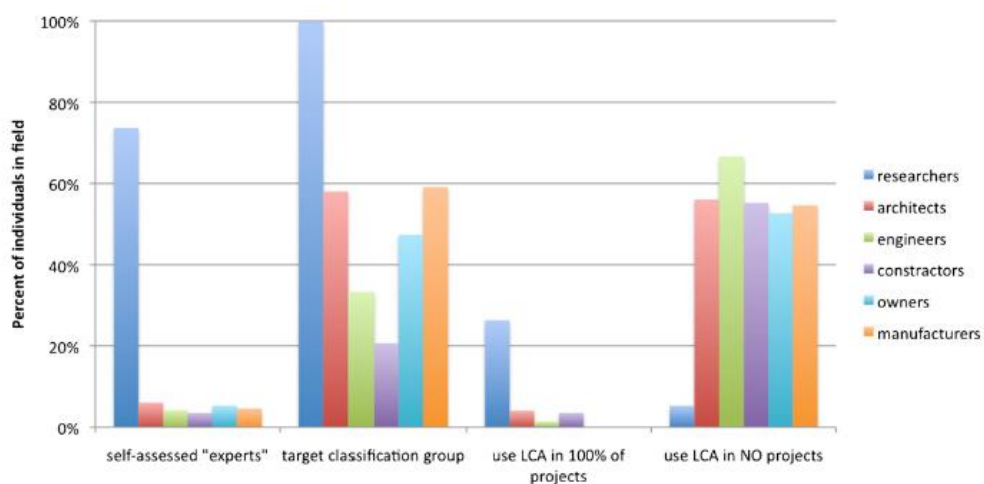


Figura 3.1 Utilizzo della metodologia LCA [23]

3.1.2 Scopo dello studio e integrazione di LCA nel BIM

È evidente che per opere civili la mole di dati da reperire e gestire è estremamente elevata, perché legata all'utilizzo di numerosi e diversi materiali, sistemi, impianti e componenti all'interno di ogni singolo prodotto edilizio. Le potenzialità del BIM di archiviare e gestire le informazioni di ogni singolo componente offrono quindi l'opportunità di supportare il processo decisionale della progettazione, perseguendo un approccio life cycle che integri nei modelli BIM informazioni relative agli impatti ambientali dei singoli componenti [24].

Stante ciò, lo studio propone un processo logico che i progettisti possono utilizzare per la valutazione della sostenibilità di un edificio mediante LCA con il supporto del BIM. Tale ricerca è limitata agli edifici residenziali di nuova costruzione.

La metodologia presentata è caratterizzata dalla progettazione di un edificio utilizzando la metodologia Building Information Modeling (BIM) sia degli elementi strutturali che architettonici.

L'approccio logico proposto, per la valutazione della sostenibilità degli edifici, è sviluppato mediante l'utilizzo dei dati, quantitativi e qualitativi, di ogni elemento presente nel modello 3D BIM e utilizzati come parametri di input per sviluppare valutazioni di Life Cycle Assessment (LCA).

Tale opportunità è garantita dal BIM che permette di utilizzare e di archiviare diverse tipologie di informazioni e poterle rappresentare in un modello unico virtuale e integrato.

Diviene possibile integrare sia informazioni geometriche sia non geometriche in modo da consentire la contemporaneità delle analisi strutturali, la progettazione architettonica e impiantistica con lo scopo di fornire documenti di progetto completi e intelligenti. Tale approccio integrato alla progettazione garantisce una qualità più elevata dei progetti e delle analisi [25].

Le potenzialità del BIM di archiviare e utilizzare i dati di ogni singolo componente, che costituisce il complesso edificio, possono essere utilizzate per effettuare le analisi di LCA. Nell'ottica dell'intero ciclo di vita di una struttura è possibile stabilire, quindi, un procedimento per effettuare analisi di LCA direttamente dal BIM, integrando le informazioni riguardanti i risultati di LCA nel database di oggetti a supporto del BIM.

E' possibile iniziare questa valutazione basandosi sulla fase di approvvigionamento dei materiali e quindi effettuando delle analisi di LCA *"from cradle to gate"*, trascurando per

il momento la fase di messa in opera, la fase di manutenzione e dismissione della struttura.

Nel caso specifico, è stato sviluppato un modello BIM di una struttura residenziale nella quale sono state dimensionate le strutture e gli elementi architettonici. A valle della progettazione è stato estratto il computo di tutti gli elementi che compongono l'edificio per cui è stato semplice desumere i dati sia quantitativi sia qualitativi di tutti i componenti della struttura. Con tali dati è stato possibile svolgere le LCA mediante l'utilizzo del software SimaPro.

Il framework utilizzato è solo una procedura per valutare l'efficacia del metodo giacché è possibile integrare i risultati delle analisi di LCA come informazioni aggiuntive al database già esistente per la metodologia BIM.

Il caso di studio è rappresentato da un edificio di nuova costruzione che presenta gli standard costruttivi italiani, progettato con software BIM dal quale è stato possibile reperire tutte le informazioni necessarie per le LCA effettuate.

3.1.3 Caso studio

Il caso di studio riguarda un edificio tipo, di nuova costruzione, implementato in metodologia BIM mediante il software "*Edificius*", appartenente alla suite di programmi interoperabili di casa ACCA.

L'edificio si sviluppa su due piani in elevazione, ognuno di 70,50 mq, per una superficie calpestabile totale di 141 mq con un'altezza di interpiano pari a 3,2 m.

La struttura portante è composta di telai spaziali in cemento armato; la fondazione è costituita da una piastra in cemento armato; infine i solai sono realizzati mediante struttura latero cementizia.

Gli unici elementi non strutturali considerati sono gli elementi di finitura quali pavimenti, porte, finestre, tramezzature interne ed esterne e tutti i materiali usati per le tinteggiature, come si vedrà nel computo metrico a seguire.

La struttura progettata, come mostrato in Figura 3.2, è di modeste dimensioni; tuttavia essa risponde pienamente all'obiettivo fissato, cioè di dimostrare l'efficacia della metodologia proposta di valutazione LCA di un sistema edificio gestibile interamente con strumenti BIM.

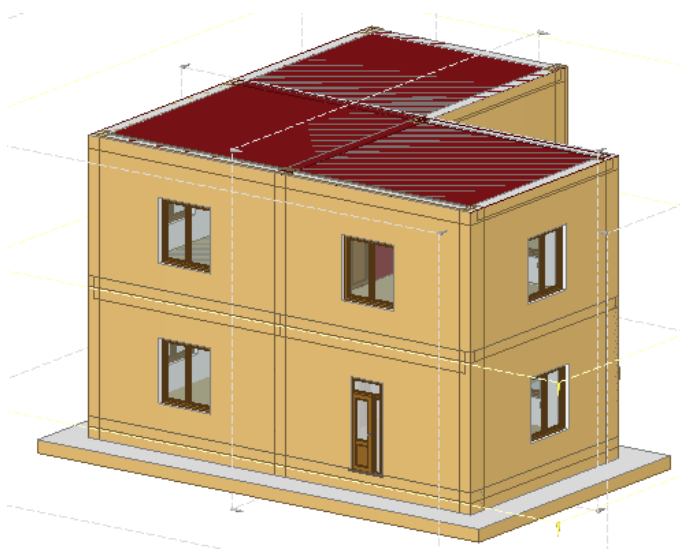


Figura 3.2 Modello BIM 3D dell'edificio oggetto del caso di studio

Allo scopo di gestire in maniera interoperabile le informazioni utili dal modello BIM per sviluppare le analisi di LCA è stato progettato un software *ad hoc*, “*Primus v100d – Beta LCA 1.00*”, realizzato in collaborazione con ACCA software. Tale applicazione è capace di interfacciarsi in maniera interoperabile con tutti gli altri software della suite BIM di ACCA.

Definito il modello BIM, è stato possibile condurre le analisi strutturali in modo tale da verificare, secondo le NTC '08, gli elementi portanti e definire l'armatura degli elementi in c.a.

In seguito è stato possibile associare a ogni elemento del modello centrale BIM la voce di costo del Prezzario della Regione Campania delle Opere Pubbliche, sviluppando in tal modo il computo estimativo dei materiali e delle lavorazioni sia per le opere strutturali sia per le opere non strutturali.

Una volta definito il computo metrico estimativo, è stato possibile lo sviluppo delle analisi LCA, seguendo tutte le fasi prescritte dalla ISO 14010, con il supporto delle informazioni ricavate direttamente dal modello BIM in esame.

Il computo metrico estimativo dei materiali utilizzati per la realizzazione della struttura è riportato per intero nella

Tabella 3.1.

Monografie Edil-lab/ Innovazione, Tecnologia e Ambiente/
Il Life Cycle Assessment (LCA) nel settore delle costruzioni e il BIM

N°Ord.	TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	QUANTITA'
1	E.03.010.030.a	Calcestruzzo SOMMANO mc	21,61
2	E.04.010.010.c	Solaio a struttura mista in cemento armato e laterizio SOMMANO mq	133,95
3	E.03.010.020.a	Calcestruzzo SOMMANO mc	35,70
4	E.13.030.020.a	Pavimento in piastrelle di gres fine porcellanato SOMMANO mq	169,99
5	E.08.020.025.a	Muratura monostrato di tamponamento SOMMANO mq	282,69
6	E.16.020.030.b	Intonaco civile liscio a tre strati SOMMANO mq	712,00
7	E.21.020.040.b	Tinteggiatura con pittura lavabile di resine sintetiche emulsionabili (idropittura) SOMMANO mq	789,43
8	E.18.065.020.a	Porta in legno ad un anta cieca omologata e certificata SOMMANO cad	1,00
9	E.18.020.010.a	Porta interna in legno con anta mobile tamburata e con bordi impiallacciati SOMMANO cad	3,00
10	E.08.020.010.c	Tramezzatura di mattoni forati di laterizio eseguita con malta cementizia entro e fuori terra SOMMANO mq	32,00
11	E.18.080.040.a	Infisso in alluminio anodizzato a taglio termico per finestre SOMMANO mq	13,00
12	102.06.1.002	Fornitura in opera di acciaio FeB 38K per strutture in cemento armato in barre ad aderenza migliorata SOMMANO kg	4545,08
13	103.02.1.003	Fornitura in opera di cassaforma in legno completa di armatura di sostegno e controventatura. SOMMANO mq	171,68

Tabella 3.1 Computo metrico dei materiali

Alla base dello studio, si è ipotizzato di condurre le analisi di LCA *“from cradle to gate”*, valutando quindi l’impatto ambientale fino alla fase di realizzazione dell’edificio e comprendendo, dunque, la fase delle lavorazioni.

La fase di uso, di manutenzione e di dismissione sono state trascurate allo scopo di semplificare l'applicazione.

La fase di LCI, quindi l'Inventory dello studio di LCA, è stata condotta utilizzando le schede degli elementi che compongono il Prezzario Regionale, dalle quali è stato possibile effettuare un'analisi dettagliata delle quantità, dei prodotti e delle lavorazioni. A scopo illustrativo si riporta nella Figura 3.3 la scheda dell'elemento solaio considerato nel progetto dell'edificio proposto.

L'unità funzionale utilizzata, per condurre l'analisi di LCA, è il sistema edificio globale, per cui, si è tenuto conto di tutti i materiali e le lavorazioni necessarie per la realizzazione dello stesso.

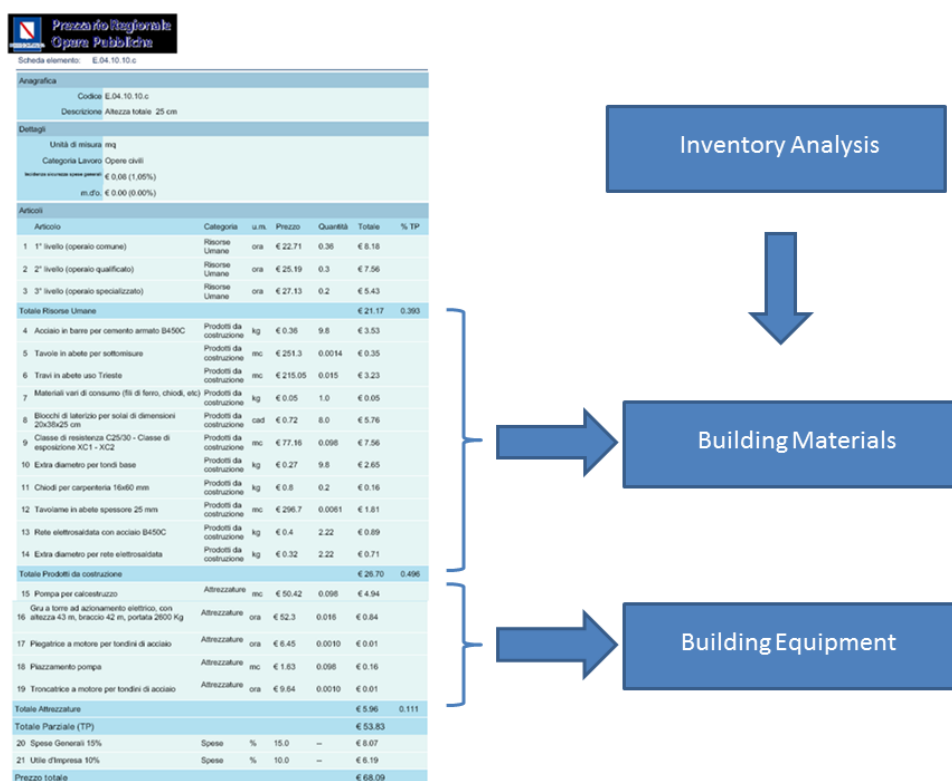


Figura 3.3 Inventory Analysis mediante le schede del Prezzario

Una volta conclusa la fase di Inventory ed essendo note tutte le quantità dei materiali e delle lavorazioni, si è passati alla fase di Life Cycle Assessment, con il supporto del software “SimaPro” e l’utilizzo del database Ecoinvent 2.2 (Ecoinvent; Hedemann and König 2007) con il quale è stato possibile ricavare tutti gli indicatori di impatto ambientale sia della categoria d’impatto sia della categoria di danno, come regolato dalla metodologia Impact2002+. Tali dati di output della fase di LCA sono stati integrati

Monografie Edil-lab/ Innovazione, Tecnologia e Ambiente/
Il Life Cycle Assessment (LCA) nel settore delle costruzioni e il BIM

nel database del software di Contabilità e Computi, ancora in versione sperimentale, “Primus v100d – Beta LCA 1.00” interoperabile con gli altri software della suite ACCA Software

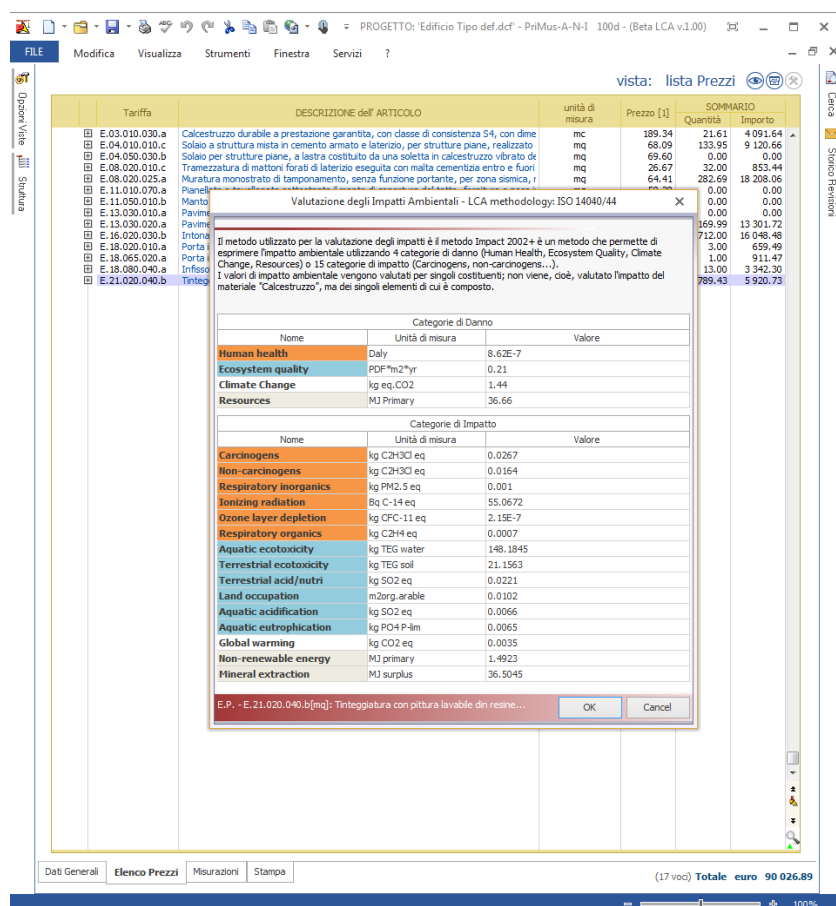


Figura 3.4 Integrazione dei dati di LCA nel processo BIM

Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si mostra una delle fasi di input dei risultati di LCA nel modello BIM, nel quale è possibile associare a ogni singola voce di computo dell'opera da realizzare i dati degli impatti ambientali previsti dalla metodologia Impact2002+, in accordo con le ISO 14040/44 (nella fattispecie con le categorie di danno e quelle d'impatto).

Terminata la fase di inserimento degli indicatori di LCA, a ogni voce del computo dei materiali e delle lavorazioni sono stati associati non solo i costi ma anche i singoli indicatori di impatto ambientale, permettendo quindi di effettuare la valutazione di LCA dell'intero edificio.

L'interpretazione dei risultati, fase finale della valutazione LCA, è stata condotta in maniera automatica mediante le analisi effettuate dal software *"Primus v100d – Beta LCA 1.00"* con le informazioni estratte direttamente da modello centrale BIM dell'edificio.

La Figura 3.5 riporta alcuni grafici che sintetizzano l'impatto ambientale, valutato con la metodologia Impact 2002+, dell'edificio oggetto del caso di studio.

Monografie Edil-lab/ Innovazione, Tecnologia e Ambiente/
Il Life Cycle Assessment (LCA) nel settore delle costruzioni e il BIM

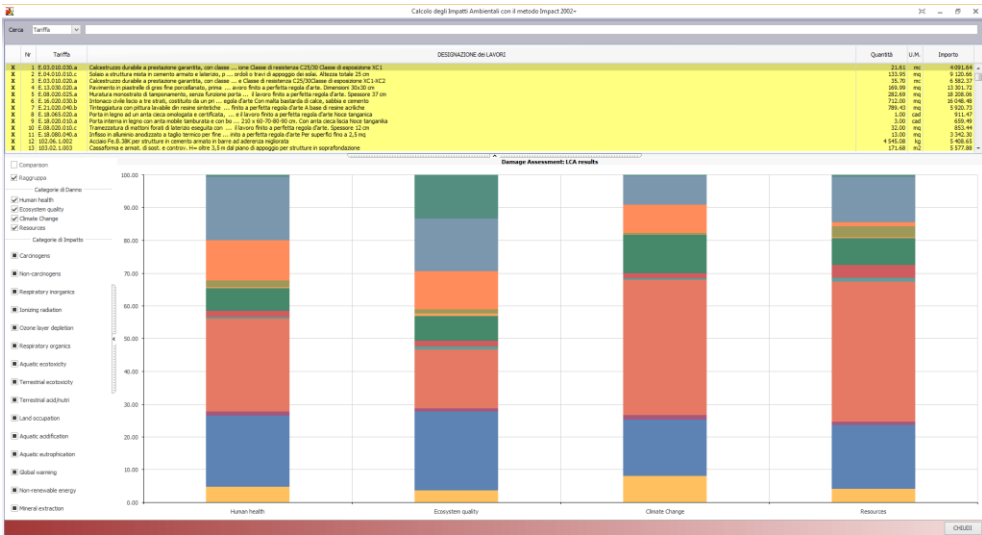


Figura 3.5 Risultati di impatto ambientale del software Primusv100d – Beta LCA 1.00

4. LIFE CYCLE ASSESSMENT DI STRATEGIE DI ADEGUAMENTO SISMICO

4.1 Introduzione

Negli ultimi anni, seppur in maniera non troppo diffusa, sono state condotte applicazioni LCA per la valutazione dell'impatto ambientale associato all'intero ciclo di vita delle nuove costruzioni. Al contrario non esistono molte applicazioni per la valutazione della sostenibilità connessa al recupero del patrimonio edilizio esistente.

Tuttavia l'attuale scarsità delle risorse e la tendenza ad utilizzare metodologie per lo sviluppo sostenibile hanno portato tutti gli operatori del settore delle costruzioni a investire sul ripristino degli edifici esistenti [26].

La metodologia LCA, applicata alle strutture, può essere utilizzata per perseguire svariati tipi di obiettivi poiché sono diverse le "scale di valutazione" possibili, come il singolo materiale, le componenti o l'intero edificio. Esiste inoltre la possibilità reale di estendere le analisi alle diverse fasi o all'intero ciclo di vita dell'opera in oggetto.

Nel presente capitolo è trattata la valutazione dell'impatto ambientale connessa a differenti strategie di consolidamento strutturale applicate a un edificio esistente in cemento armato, le cui caratteristiche sono in parte ottenute da un progetto simulato. L'edificio in esame rispecchia un'aliquota consistente del costruito esistente tipico dell'area mediterranea realizzato alla fine degli anni 70'.

In particolare le analisi sono state condotte considerando le seguenti variabili:

- scala di valutazione: partendo dal singolo materiale arrivando all'intero edificio;

- fasi del ciclo di vita: produzione dei materiali da costruzione, preparazione dell'intervento, esecuzione dell'intervento.

L'edificio tipo è stato concepito in conformità al costruito dell'epoca, per cui il progetto rispecchia fedelmente le caratteristiche dell'epoca in termini di materiali, dettagli costruttivi e schemi strutturali.

L'edificio è stato progettato mediante la metodologia BIM, con due software differenti; in seguito è stato esportato il modello strutturale nel solutore SAP2000 con cui si sono state condotte tutte le analisi di valutazione di vulnerabilità sismica.

Il progetto della struttura è stato effettuato in accordo con la legge 5/11/1971 n. 1086 *"Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica"* [27], ed, in particolare, il successivo Decreto Ministeriale 30/5/1974 che prevedeva il metodo delle tensioni ammissibili per la verifica delle sezioni e per calcolo delle armature [28].

In seguito è stata valutata la vulnerabilità sismica dell'edificio in esame mediante un'analisi statica non lineare, definendo così i meccanismi di crisi duttili/fragili.

E' stato eseguito, in primo luogo, un intervento di miglioramento sismico, con lo scopo di incrementare la capacità strutturale fino al presentarsi della prima crisi duttile. In seguito sono stati previsti interventi di adeguamento sismico di diversa tipologia per ottenere gli standard di sicurezza previsti dalla normativa (NTC 08) per lo stato limite considerato (SLV). In particolare, le tecniche di adeguamento sismico adottate sono: (i) intervento con esclusivo uso di FRP, (ii) inserimento di pareti sismoresistenti in calcestruzzo armato e (iii) uso combinato di incamiciatura in cemento armato e FRP.

I risultati ottenuti non solo hanno permesso di valutare le performance ambientali di ciascuna tecnica d'intervento ma anche di valutare, mediante un'analisi comparativa, la tecnica che tra tutte presenta il più basso impatto ambientale, considerando come unità funzionale dello studio di LCA l'adeguamento sismico della struttura.

4.2 Definizione del caso studio

L'edificio tipo è in cemento armato e rappresenta una buona parte del costruito tipico dell'area mediterranea, progettato e realizzato per uso abitativo alla fine degli anni 70' in zona classificata non sismica e, quindi, considerando solo le azioni dovute ai carichi gravitazionali.

La normativa di riferimento per l'edificio in esame è la legge 5/11/1971 n. 1086 *“Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso e a struttura metallica”*, e, in particolare, il successivo Decreto Ministeriale 30/5/1974, *“Norme tecniche alle quali devono uniformarsi le costruzioni in conglomerato cementizio, normale e precompresso e a struttura metallica”*. Il D.M. 30/5/74 prevedeva il metodo delle tensioni ammissibili per la verifica delle sezioni e per il calcolo delle armature.

La struttura è situata nel Comune di Casalnuovo di Napoli, considerando una tipologia topografica (T_1) e una categoria di sottosuolo di Tipo B.

Le caratteristiche geometriche necessarie per la costruzione del modello sono state desunte dalle tavole di progetto. La struttura in esame è caratterizzata da tre impalcati tutti fuori terra con due torrini che consentono l'accesso all'impalcato di copertura. Il corpo strutturale è caratterizzato da una struttura a telai bidirezionali e presenta una

pianta di dimensioni 48 x 18 m circa, con altezza di interpiano pari a 3,7 m per il primo impalcato e di 3,2 m per gli altri impalcati. L'edificio non è strutturalmente simmetrico. I solai sono caratterizzati da un'altezza di 24 cm (20 cm + 4 cm di soletta), e sono costituiti da travetti in c.a. gettati in opera di 10 cm di larghezza e da pignatte 40 x 25 x 20. Sono presenti due vani scale, composti di 6 rampe realizzate con uno schema a soletta rampante in c.a. di spessore di 24 cm e larghezza 1,7 m.

I telai in direzione Y sono caratterizzati dalla presenza di travi emergenti di sezione rettangolare 30 cm x 60 cm, quelli in direzione X da travi a spessore di sezione rettangolare 35 cm x 24 cm. I pilastri hanno, quasi tutti, dimensioni 30 cm x 50 cm eccetto i pilastri esterni, a sostegno dello sbalzo centrale, che hanno una sezione di 30 cm x 30 cm.

La modellazione dell'edificio è stata condotta con l'ausilio degli elaborati di progetto e mediante il software *REVIT BIM* di casa Autodesk.

Il modello BIM è caratterizzato dall'implementazione di tutti gli elementi strutturali e architettonici. Gli elementi che compongono la struttura, quindi, sono stati preliminarmente modellati in REVIT e successivamente è stato esportato in SAP 2000 il modello strutturale.

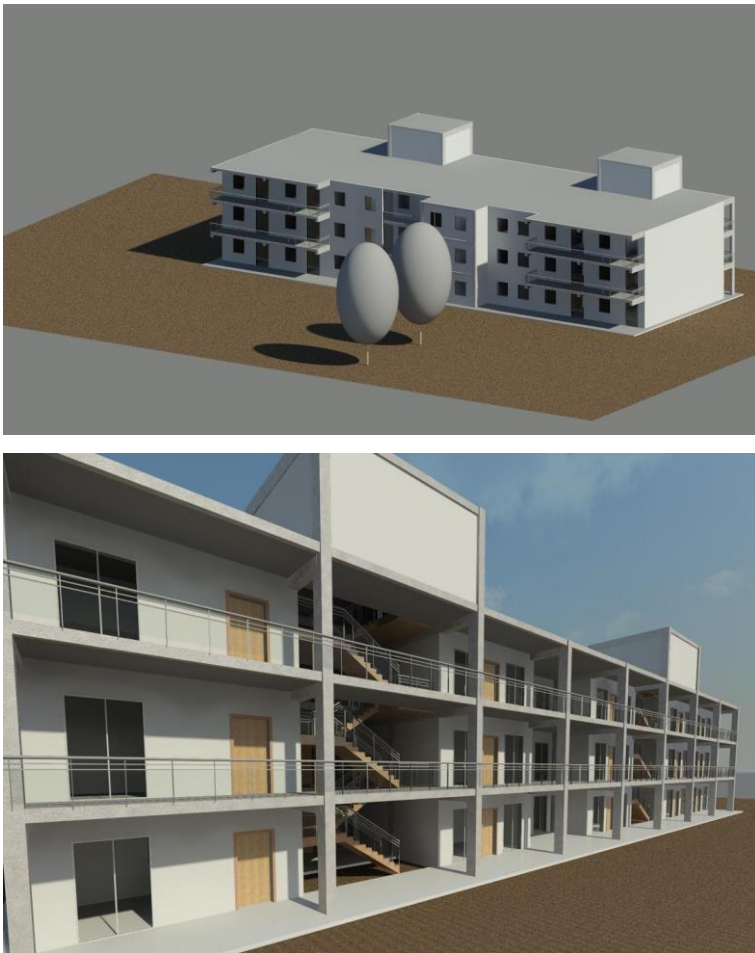


Figura 4.1 Viste 3D del modello BIM dell'edificio

Il modello importato in SAP 2000 [29] ha riconosciuto tutte le informazioni e gli attributi definiti nel software BIM come sezioni geometriche, materiali, vincoli e carichi, per cui è stato possibile disporre di un modello FEM il cui comportamento approssima quello reale della struttura.

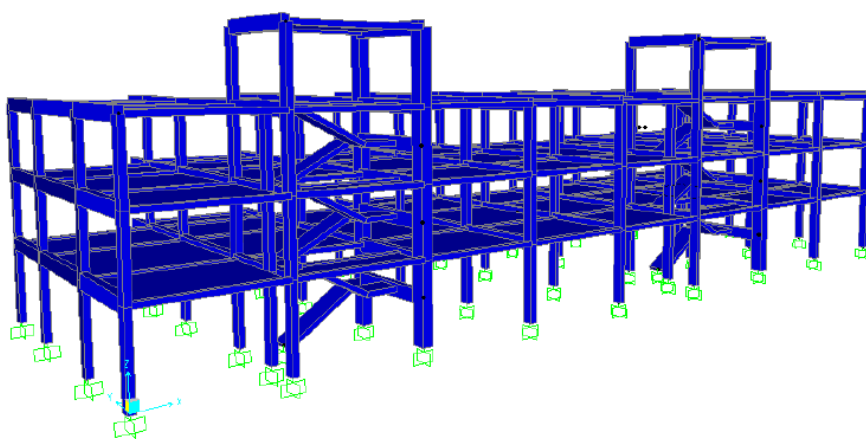


Figura 4.2 Modello strutturale SAP2000 dell'edificio

I solai dell'edificio hanno un'altezza pari a 24 cm con soletta di spessore di 4 cm, requisito che motiva l'ipotesi di considerare gli impalcati rigidi nel proprio piano.

Per quanto riguarda i materiali utilizzati, facendo riferimento al periodo ipotizzato di progettazione e costruzione, si è rilevato che le resistenze previste per il calcestruzzo erano comprese tra un minimo di 150 kg/cm^2 e un massimo di 500 kg/cm^2 , intesi come valori caratteristici R_{ck} . Le tensioni ammissibili variavano, in funzione della R_{ck} , da 60 kg/cm^2 a $147,5 \text{ kg/cm}^2$ nel caso di flessione o pressoflessione.

4.2.1 Analisi della capacità strutturale

Una volta condotto il progetto simulato, si è giunti a una conoscenza adeguata dell'organismo strutturale dell'edificio e delle caratteristiche meccaniche dei materiali. Note tali proprietà della struttura, è stato possibile passare alla fase di analisi della

capacità strutturale dell'edificio con l'ausilio dell'analisi statica non lineare. Tali analisi sono state condotte nel rispetto delle NTC 2008 [30] della Circolare n.617 [31].

L'analisi statica non lineare (pushover) è stata condotta con l'obiettivo di risalire alle carenze strutturali dell'edificio in modo da definire le diverse strategie di miglioramento e/o adeguamento sismico.

E' stato riscontrato che la capacità della struttura è governata da meccanismi fragili come quelli riportati durante il terremoto aquilano del 2009.



Figura 4.3 Meccanismi di collasso di colonne per edifici in c.a. colpiti dal terremoto dell'Aquila, (fonte Reluis 2009) [32]

Da tale quadro delle crisi per raggiungere uno stato di **miglioramento sismico** è necessario intervenire mediante:

- incremento di capacità a taglio;
- incremento della resistenza diagonale a trazione.

4.3 Strategie di Consolidamento Strutturale

Note le crisi degli elementi strutturali, rilevate durante la fase di analisi della capacità strutturale, è possibile definire le diverse strategie di intervento sia di miglioramento sismico sia di adeguamento sismico.

Si può dimostrare che, al soddisfacimento dello SLV, la legge che lega la capacità della struttura in termini di resistenza e di spostamento ultimo è rappresentata graficamente da un'iperbole nel piano (S_a , S_d).

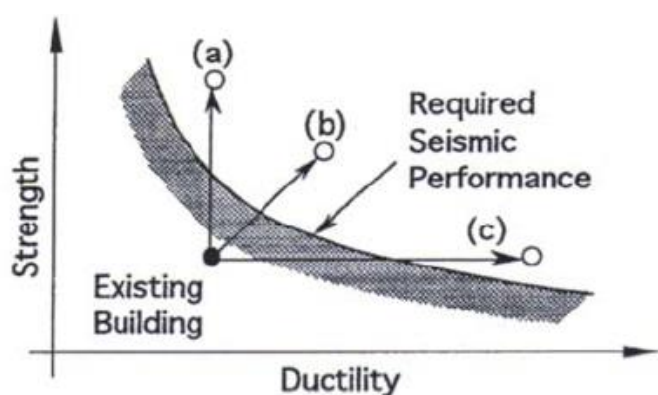


Figura 4.4 Rappresentazione della capacità di un edificio esistente del piano (Capacità Resistente; Capacità Deformativa)

In tale grafico, un edificio esistente che presenta delle mancanze in termini di resistenza e duttilità è rappresentato da un punto posto al di sotto dell'iperbole e quindi nel piano che rappresenta tutte le possibili condizioni statiche che risulterebbero non soddisfatte allo SLV.

Adeguare sismicamente un edificio significa, quindi, portare il punto che rappresenta l'edificio esistente al di sopra dell'iperbole, con un ragionevole margine di sicurezza e cioè nel piano in cui siano verificate le condizioni allo SLV.

Per fare ciò, non esiste una soluzione univoca e ciascuna strategia di adeguamento e/o miglioramento può comportare:

- un prevalente aumento della capacità resistente della struttura;
- un contemporaneo aumento della capacità resistente e deformativa della struttura;
- un esclusivo aumento della capacità deformativa della struttura;
- una riduzione della domanda sismica (isolamento sismico)

Le strategie di intervento individuate dalle NTC '08 (Cap.8.4) si differenziano come segue.

- Interventi di adeguamento atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalla norma.
- Interventi di miglioramento atti ad aumentare la sicurezza strutturale, senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza richiesti dalla norma.
- Riparazioni o interventi locali che interessano elementi isolati e che comunque comportano miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

Dapprima si è scelto di sviluppare una strategia di intervento volta all'ottenimento di un miglioramento sismico, con lo scopo di incrementare la capacità strutturale. In seguito

è stato realizzato il progetto di adeguamento sismico della struttura mediante l'utilizzo di diverse tecniche di rinforzo sismico, per ottenere standard di sicurezza previsti dalla normativa per lo stato limite considerato (SLV).

Per il conseguimento del miglioramento sismico si è adottata un'unica tecnica di intervento, cioè l'utilizzo esclusivo di materiali compositi fibrorinforzati FRP per risolvere sia le crisi a taglio di travi e pilastri mediante fasciatura sia le crisi per taglio trazione dei nodi mediante applicazione di rinforzi esterni quadriassiali.

Per il conseguimento, invece, dell'adeguamento sismico, si è scelto di utilizzare tre tecniche diverse.

- Utilizzo esclusivo di materiali compositi fibrorinforzati FRP per ottenere un incremento della capacità deformativa mediante confinamento dei pilastri, risoluzione delle crisi a taglio di travi e pilastri mediante fasciatura, risoluzione delle crisi per taglio trazione dei nodi mediante applicazione di rinforzi esterni quadriassiali
- Inserimento di pareti sismoresistenti all'interno dell'organismo strutturale allo scopo di ottenere un prevalente aumento della capacità resistente strutturale, con utilizzo di FRP per la risoluzione delle crisi a taglio delle travi.
- Incamiciatura in calcestruzzo armato per un piccolo numero di pilastri per ottenere un incremento di capacità resistente a taglio e utilizzo di FRP sia per la risoluzione delle crisi a taglio delle travi sia per incrementare la capacità deformativa della struttura mediante confinamento dei pilastri.

4.4 LCA delle strategie di consolidamento

Nel presente capitolo si affronta la valutazione degli impatti ambientali, mediante l'utilizzo della metodologia LCA, delle diverse tecniche di rinforzo sismico utilizzate sia per il miglioramento sia per l'adeguamento sismico della struttura.

Per il raggiungimento di tali obiettivi sono state applicate le seguenti tecniche.

- Intervento esclusivo con l'utilizzo di FRP.
- Inserimento di pareti sismoresistenti.
- Utilizzo combinato di incamiciatura in c.a.

Lo studio si è focalizzato sulla valutazione delle performance ambientali delle singole tecniche di rinforzo e, consecutivamente, è stata condotta un'analisi comparativa delle stesse in modo da riconoscere la soluzione con il più basso impatto ambientale.

4.4.1 Definizione degli obiettivi (Goal and scope definition)

L'obiettivo del caso di studio è di valutare l'impatto ambientale, mediante l'approccio LCA, di tre tecniche di adeguamento sismico: a) intervento con esclusivo uso di FRP; b) inserimento di pareti sismoresistenti in c.a.; c) uso combinato di incamiciatura in cemento armato e FRP.

Al fine di eseguire analisi LCA di tipo comparativo delle diverse tecniche, queste sono state applicate alla struttura per ottenere la stessa performance strutturale, definendo in tal modo l'unità funzionale dell'analisi.

In particolare, le diverse tecniche di rinforzo sismico sono state progettate per ottenere lo stesso incremento di capacità strutturale.

Le analisi LCA delle singole tecniche sono state condotte considerando tutte le fasi previste da un approccio “dalla culla al cancello”, e quindi: i) estrazione delle materie prime, ii) produzione, iii) fase di preparazione dell'intervento e iv) installazione del rinforzo.

Per quanto riguarda la prima strategia di intervento, utilizzo esclusivo di FRP, l'analisi di impatto ambientale è stata sviluppata per un m² di intervento.

Per quanto riguarda la strategia di intervento che ha previsto l'inserimento di pareti sismoresistenti in c.a., è stato necessario ipotizzare un intervento in fondazione giacché il loro comportamento sismico può causare un potenziale sollevamento o oscillazione della fondazione e quindi una perdita di funzionalità della parete.

La fase di realizzazione di tale intervento in fondazione prevede operazioni di scavo e di messa a nudo della fondazione. L'intervento, prevede l'inserimento di due pareti identiche per cui l'analisi LCA è stata condotta per la singola parete considerando anche l'intervento in fondazione. In questo modo si è ottenuto l'impatto ambientale del singolo elemento che moltiplicato per il numero delle pareti inserite restituisce l'impatto ambientale dell'intervento globale. Per ottenere l'adeguamento della struttura è stato necessario anche l'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati per la risoluzione delle crisi fragili delle travi e dei nodi.

La terza strategia utilizzata consiste nell'utilizzo congiunto di incamiciatura in cemento armato di 4 pilastrate e dell'utilizzo di FRP per l'incremento della capacità deformativa dei pilastri e per il rinforzo a taglio di travi e nodi. Anche in questo caso è stato necessario prevedere un intervento di ringrosso per le travi di fondazione. L'analisi di impatto ambientale è stata condotta per il ringrosso di una singola pilastrata,

considerando anche l'intervento di ringrosso della fondazione e quello connesso all'utilizzo di FRP.

Per le analisi di LCA sono state considerate le seguenti fasi:

- Produzione del materiale: tale fase include l'estrazione di materie prime e il processo di produzione dei materiali usati nelle tecniche di adeguamento;
- Preparazione del substrato dove sarà applicato il rinforzo;
- Installazione del rinforzo.

Di seguito si descrivono nel dettaglio le fasi considerate per le singole strategie di rinforzo sismico:

Nelle figure seguenti si riportano schematicamente i confini del sistema per ciascuna delle strategie considerate.

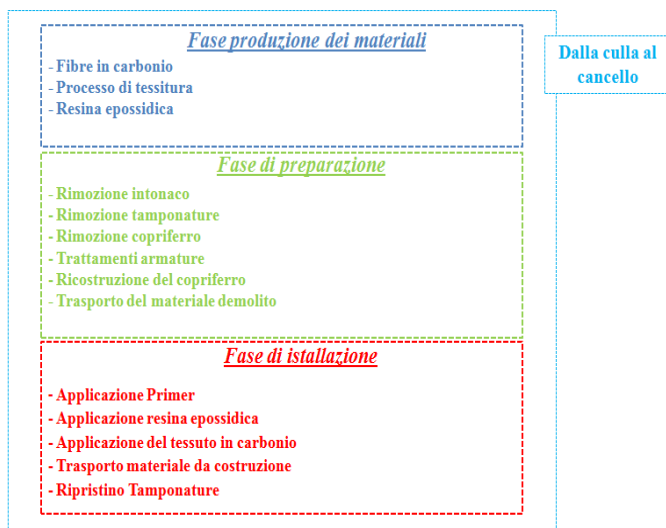


Figura 4.5 Confini del sistema FRP

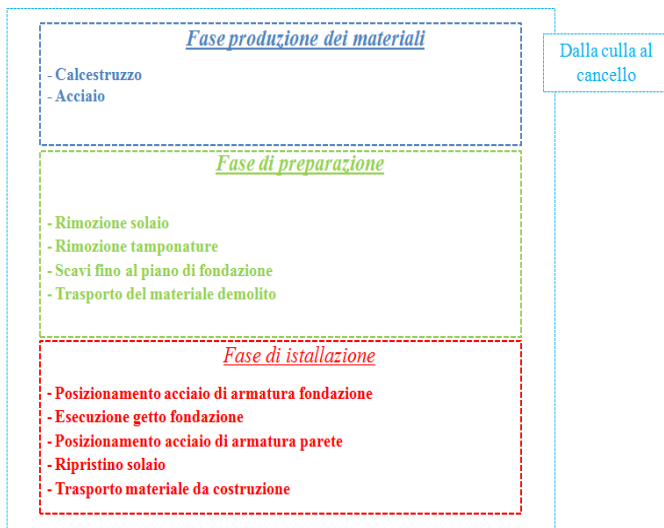


Figura 4.6 Confini del sistema parete in c.a.

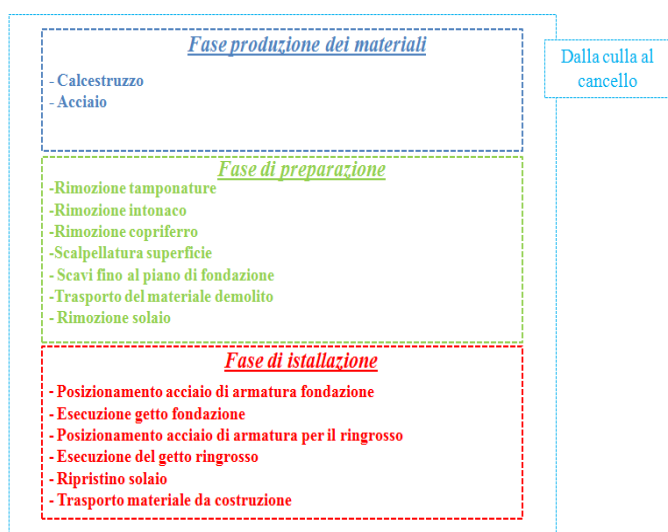


Figura 4.7 Confini del sistema ringrosso in c.a.

4.4.2 Analisi di impatto ambientale (Impact Assessment)

Le analisi di impatto ambientale sono state condotte con il metodo Impact2000+ e i risultati sono presentati in termini di “End point category” o categorie di danno (Human health, Ecosystem quality, Climate change e Resources).

I primi risultati, mostrati in Figura 4.8, fanno riferimento agli impatti ambientali associati a un m² di rinforzo in FRP. E' possibile notare che, tra le diverse fasi analizzate, quella della produzione dei materiali pesa in maniera maggiore su tre dei quattro indicatori utilizzati.

Analizzando, quindi, l'impatto delle singole fasi di produzione dei materiali per il rinforzo in FRP in carbonio è possibile stabilire che il processo di fabbricazione del

tessuto e il processo di tessitura presentano le prestazioni ambientali peggiori per tre dei quattro indicatori, come si evince in Figura 4.9.

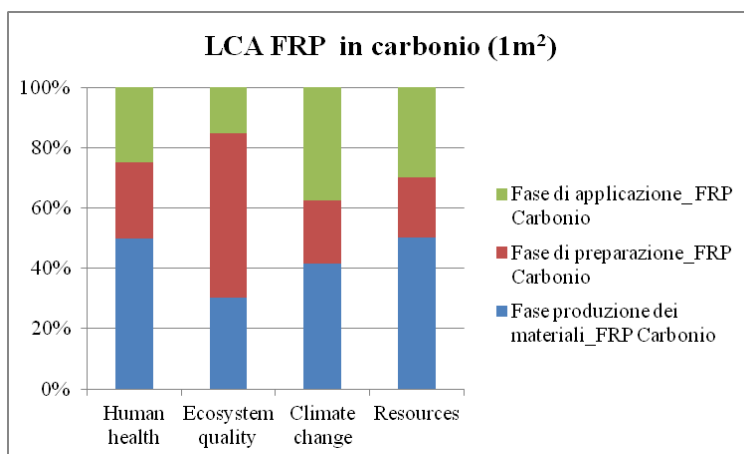


Figura 4.8 Risultati LCA FRP in carbonio (1 m²)

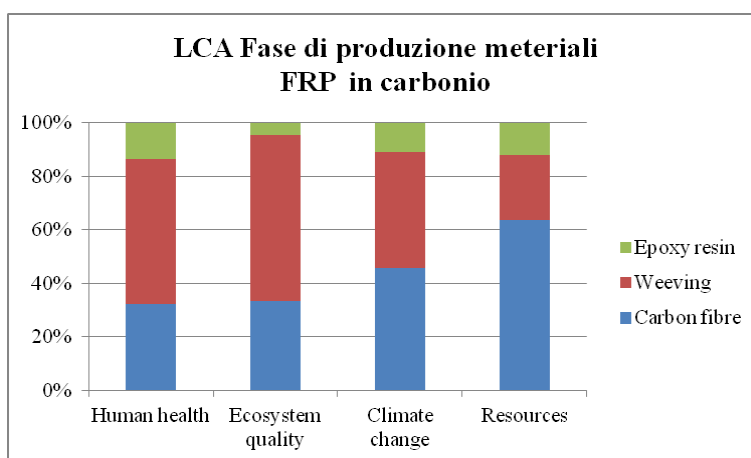


Figura 4.9 Risultati LCA fase produzione materiali FRP in carbonio (1 m²)

Anche nel caso della valutazione degli impatti ambientali relativi alla realizzazione della parete in calcestruzzo armato, la fase di produzione dei materiali, incide in maniera prevalente sull'impatto globale dell'intervento. L'impatto associato alla fase di produzione dei materiali, come mostrato in Figura 4.10, presenta valori che superano il 90% del totale relativo alla realizzazione dell'intera parete per tutte e quattro le categorie di danno. E' possibile stabilire, quindi, che l'impatto ambientale per la realizzazione di una parete è governato dalla fase di produzione dei materiali.

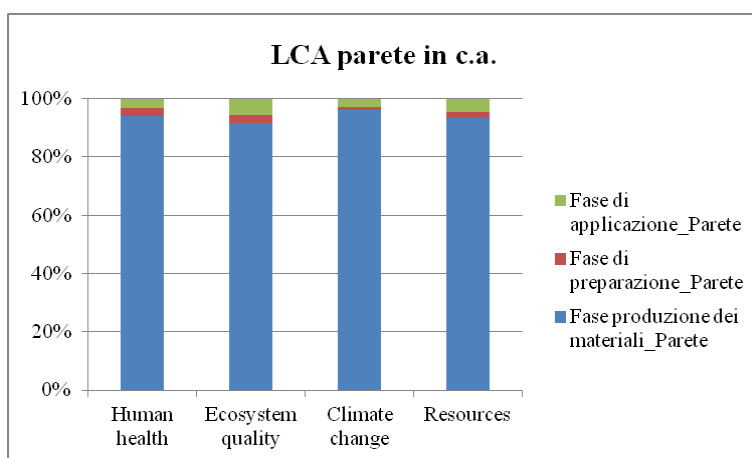


Figura 4.10 Risultati LCA parete in c.a.

Analizzando la fase di produzione dei materiali della parete, riportata in Figura 4.11, è possibile stabilire che la produzione dell'acciaio incide in maniera maggiore in termini di impatti ambientali, su tre dei quattro indicatori.

Con riferimento ai risultati delle analisi di impatto ambientale relativi alla realizzazione del ringrosso in c.a. di una pilastrata, come riportato , si conferma di nuovo la fase di produzione dei materiali ad avere il maggior impatto ambientale superando il 50% per i quattro indicatori.

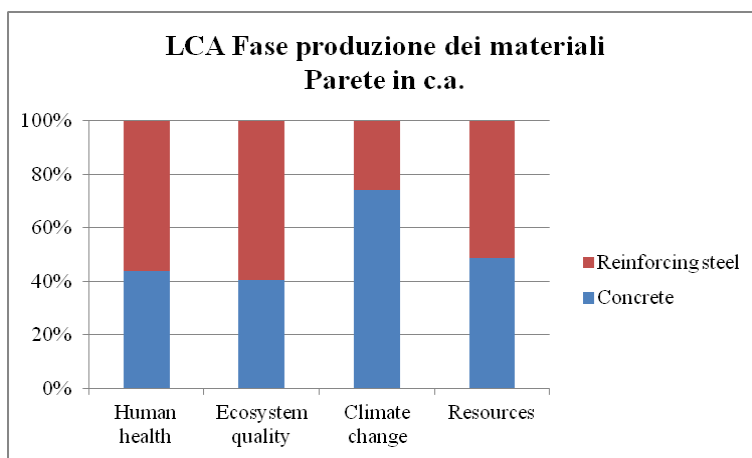


Figura 4.11 Risultati LCA fase produzione materiali parete in c.a.

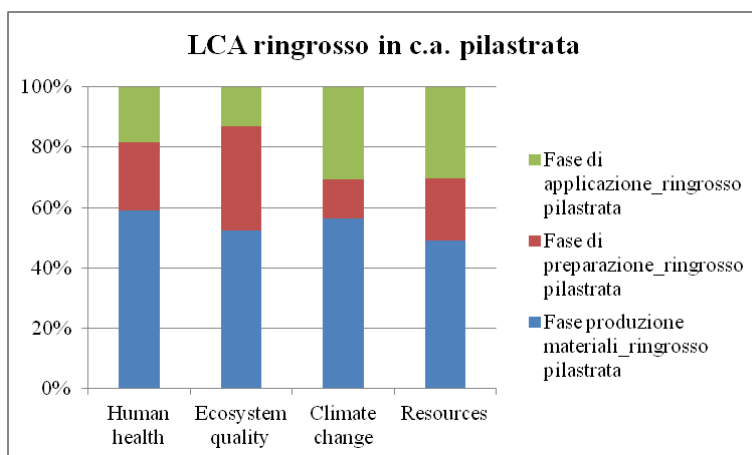


Figura 4.12 Risultati LCA ringrosso in c.a. pilastrata

Anche in questo caso è stata condotta un'analisi di LCA per la fase di produzione dei materiali al fine di indagare il materiale che presenta un impatto maggiore. Analogamente al caso della parete, il maggiore impatto è determinato dalla produzione dell'acciaio come riportato in Figura 4.13.

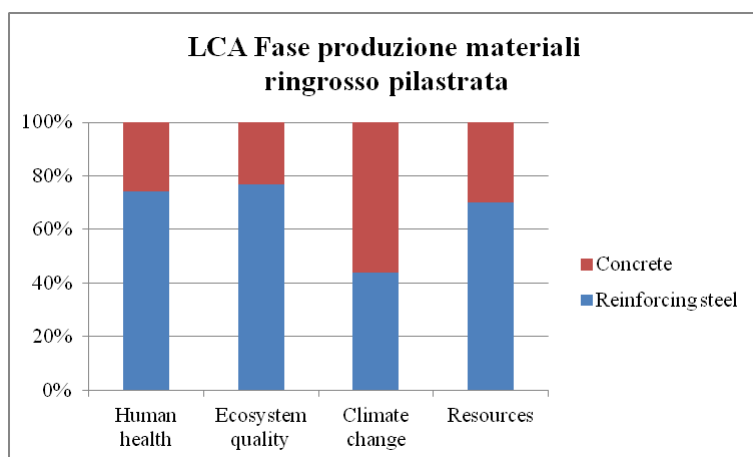


Figura 4.13 Risultati LCA fase produzione materiali ringrosso in c.a. pilastrata

Una volta condotte le analisi di LCA per i singoli interventi di rinforzo sismico è possibile passare alla valutazione delle strategie per il raggiungimento dell'adeguamento sismico della struttura.

Con riferimento alla strategia con utilizzo esclusivo di FRP, per ottenere l'adeguamento sismico, è stato necessario predisporre circa 190,34 m² di FRP. Noto l'impatto per un m² di rinforzo di FRP e la quantità totale di rinforzo per ottenere l'adeguamento sismico è stato possibile ottenere l'impatto della strategia globale.

La seconda strategia di adeguamento sismico è caratterizzata dalla realizzazione di due pareti sismoresistenti, di identiche caratteristiche, inserite all'interno della maglia strutturale esistente. Noti i valori degli indicatori di impatto ambientale della singola parete è stato possibile ottenere l'impatto della strategia di adeguamento raddoppiando gli stessi.

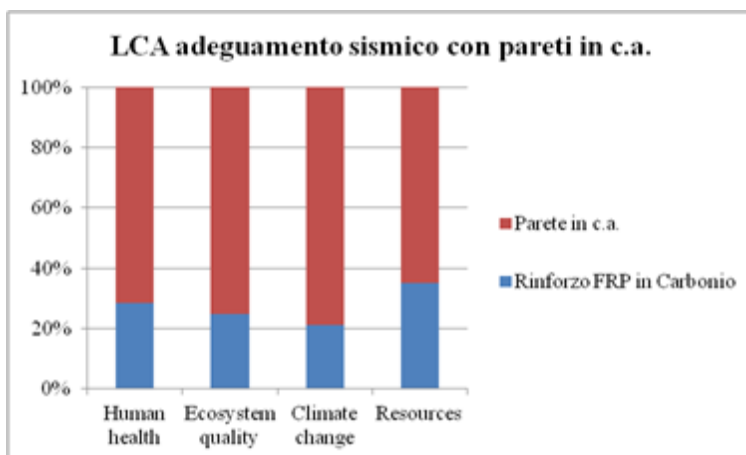


Figura 4.14 Risultati LCA adeguamento sismico con pareti in c.a.

La terza strategia utilizzata consiste nell'utilizzo congiunto di incamiciatura in cemento armato di 4 pilastrate più utilizzo di 126 m² di FRP. L'analisi di impatto ambientale per la terza strategia di adeguamento, viene mostrata in Figura 4.15, dalla quale si evince che, a differenza del caso precedente, l'impatto maggiore è causato dall'utilizzo di FRP in carbonio al quale è possibile attribuire un valore di circa il 60 % per i quattro indicatori delle categorie di danno.

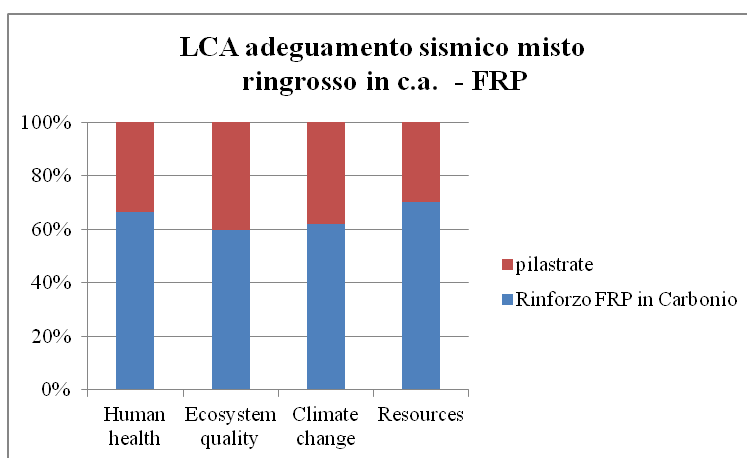


Figura 4.15 Risultati LCA adeguamento sismico misto con ringrossi in c.a. e FRP

Una volta condotte le analisi di LCA per le singole strategie di adeguamento sismico è stata condotta un'analisi comparativa tra le diverse strategie con l'obiettivo di valutare quale, tra quelle utilizzate, presenta le migliori performance ambientali.

Nella si riportano i risultati dell'analisi comparativa delle diverse strategie di adeguamento sismico. I risultati dell'analisi comparativa sono presentati con valori normalizzati rispetto al valore di impatto massimo per ciascuna categoria di danno.

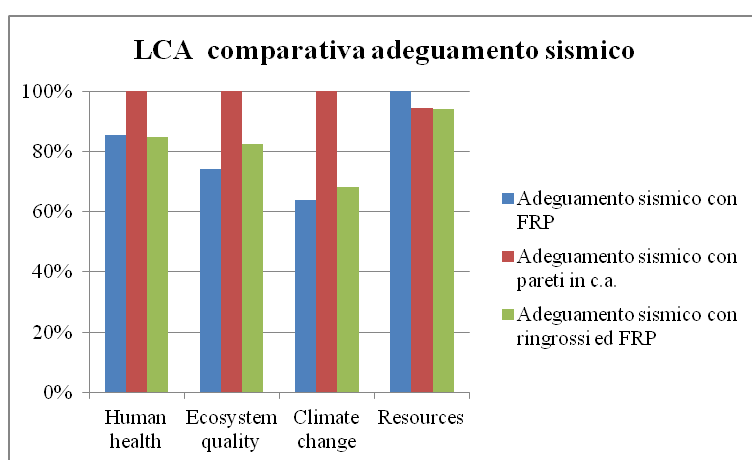


Figura 4.16 Risultati LCA comparativa tra le tre strategie di adeguamento sismico

Da tale analisi è stato possibile stabilire che l'intervento con l'utilizzo di pareti in cemento armato sia quello con l'impatto maggiore in tre delle quattro categorie di danno. Per l'intervento misto e l'intervento con esclusivo uso di FRP, i valori di impatto si equivalgono in due delle quattro categorie, nelle restanti due invece è l'intervento con esclusivo uso di FRP ad avere le performance ambientali migliori.

E' stata inoltre condotta un'ulteriore analisi, per valutare la differenza di impatto che esiste tra le tre strategie di adeguamento sismico, e la strategia di miglioramento sismico che è stata progettata considerando l'uso esclusivo di FRP per l'eliminazione solo delle crisi fragili connesse a travi pilastri e nodi. Per ottenere il miglioramento sismico sono stati necessari 73 m² di FRP in carbonio.

Analizzando i risultati dell'analisi riportati in Figura 4.17, si evince che l'impatto ambientale connesso al conseguimento del miglioramento sismico è di circa il 70% in

meno rispetto alla strategia con pareti in c.a. e di circa il 50% se comparato con le altre due tecniche di adeguamento sismico.

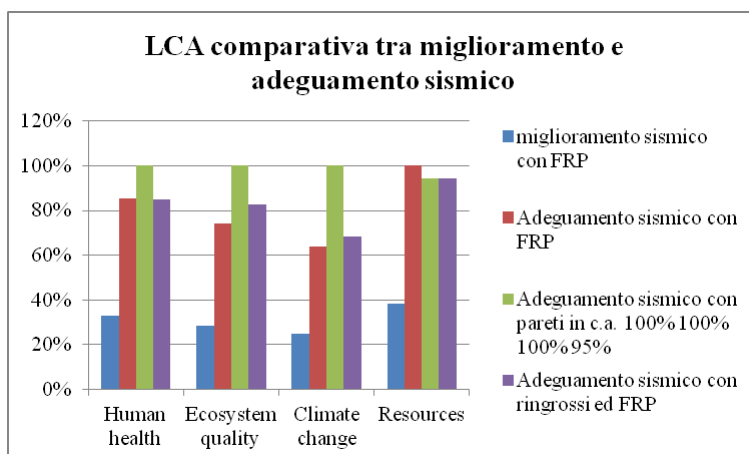


Figura 4.17 Risultati LCA comparativa tra miglioramento e adeguamento sismico

4.5 Valutazioni conclusive sulla metodologia

Negli ultimi anni si sta assistendo a un notevole incremento nello sviluppo, nell'implementazione e nell'adozione di strumenti volti alla valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici, dei materiali e dei processi edilizi.

La metodologia Life Cycle Assessment rappresenta uno dei più validi strumenti per il conseguimento di tali obiettivi. Tale strumento garantisce risultati affidabili che vanno oltre la semplice certificazione energetica. Infatti, si analizzano tutti gli aspetti e gli impatti associati al ciclo di vita del costruito: produzione dei materiali, realizzazione vera e propria, uso, demolizione.

In letteratura sono presenti diversi studi basati sull'applicazione della metodologia LCA nel settore dell'industria dei prodotti e delle nuove costruzioni; di contro, esistono pochi studi basati sulla valutazione LCA di tecniche di rinforzo sismico per strutture esistenti.

L'attenzione del caso di studio presentato si è focalizzata proprio sull'applicazione di tale strumento a tecniche di retrofit su una struttura esistente tipica dell'area mediterranea.

L'Italia è tra i paesi con maggior rischio sismico dell'area mediterranea a causa della frequenza dei terremoti che storicamente hanno interessato il territorio nazionale, ma soprattutto per la vulnerabilità del patrimonio edilizio italiano. A tal proposito, dai dati raccolti nel censimento della popolazione e degli edifici del 2001, si evince che il 35% degli edifici sono stati costruiti prima dell'emanazione della Legge 2/274 n.64, in cui compaiono le prime disposizioni in materia antisismica, mentre, il 30% è costruito tra il 1972-1981. Da tali considerazioni, è possibile dedurre che gran parte del patrimonio edilizio esistente in Italia presenta un basso livello di sicurezza sismica e quindi ha bisogno di interventi di consolidamento sismico. Da ciò nasce l'interesse verso l'impatto ambientale che tali essi possono avere sull'ambiente.

Esistono diverse tecniche di intervento che possono essere utilizzate al fine di ottenere livelli di sicurezza accettabili.

Nel caso studio, l'obiettivo raggiunto non è stato solo quello di valutare le performance ambientali delle singole strategie di intervento ma anche quello di effettuare un'analisi comparativa tra queste in modo tale da poter valutare quella che tra tutte presenta il più basso impatto ambientale.

Al fine di eseguire un'analisi LCA di tipo comparativo, tra le tre strategie, si è formulata l'ipotesi che le diverse tecniche di intervento siano progettate per ottenere la stessa performance strutturale.

I risultati dell'analisi sono stati presentati con valori normalizzati rispetto al valore di impatto massimo per ciascuna delle quattro categorie di danno previste dalla metodologia Impact2002+ (Human Health, Ecosystem Quality, Climate Change e Resources).

I risultati di tale caso di studio hanno dimostrato che l'intervento con l'utilizzo di pareti in cemento armato presenta il maggiore impatto ambientale in tre delle quattro categorie di danno. Per quanto riguarda l'intervento misto e l'intervento con uso esclusivo di FRP, i valori di impatto si equivalgono in due delle quattro categorie, mentre, nelle restanti due l'intervento con esclusivo uso di FRP mostra performance ambientali migliori.

Tale aspetto è riassunto nella Figura 4.18 riportata di seguito.

Appare evidente come il BIM mostra le sue potenzialità e i suoi vantaggi in tutte le fasi del ciclo di vita di un'opera quali la fase di ideazione (studio di fattibilità), la fase di progettazione (architettonica, strutturale ed impiantistica), la fase di realizzazione e cantiere, la fase di gestione, la fase di uso e manutenzione fino alla fase di demolizione o riutilizzo dell'opera [33].

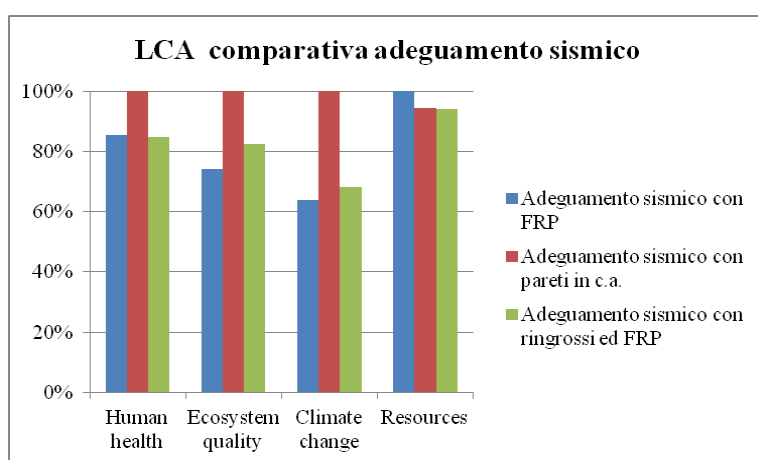


Figura 4.18 Analisi comparativa tecniche di adeguamento sismico

Sulla base di tali dati è possibile affermare che tra le tre strategie di adeguamento sismico proposte, l'utilizzo esclusivo di FRP è quella che presenta le performance ambientali migliori.

Un altro importante risultato è scaturito dall'analisi comparativa delle analisi di LCA tra la strategia di miglioramento sismico, ottenuta con uso esclusivo di FRP, e le strategie di adeguamento sismico proposte.

Gli impatti ambientali riferiti alla strategia di miglioramento sismico risultano essere circa il 70% in meno rispetto all'intervento con pareti in c.a. e di circa il 50% in meno rispetto alle altre due tecniche di adeguamento sismico.

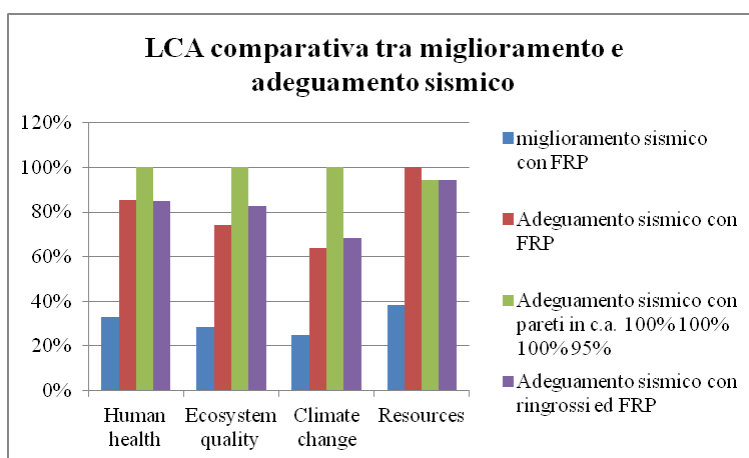


Figura 4.19 Analisi comparativa tra miglioramento e adeguamento sismico

La notevole differenza in termini di impatto ambientale tra l'ottenimento del miglioramento sismico e il completo adeguamento rende tale risultato di estremo interesse per sviluppi di studi futuri.

Sulla base dei risultati ottenuti, e se si tiene conto dello scopo fondamentale dello sviluppo sostenibile, cioè del simultaneo raggiungimento di obiettivi sociali, economici e ambientali, e della complessità, in molti casi, del raggiungimento del completo adeguamento sismico, uno studio approfondito di tipo comparativo su tecniche di intervento locali, che possano garantire il raggiungimento degli standard di miglioramento sismico, sarebbe sicuramente molto utile al fine di avere un quadro maggiormente chiaro in fase decisionale.

E' importante, però, sottolineare che i dati ottenuti in questo caso di studio, non hanno valenza universale ma che sono fortemente dipendenti dalla tipologia della struttura, dal sito di riferimento e dalle condizioni locali.

A tal proposito, non è possibile fare una classifica generale in termini di performance strutturali tra le diverse strategie di rinforzo sismico, allo stesso modo non è possibile fare una classificazione univoca delle performance ambientali di tali tecniche. Bisogna tener conto, infatti, dei limiti delle analisi di Life Cycle Assessment quali:

- La tecnica non consente la valutazione di impatti definiti a livello locale; i risultati di uno studio condotto a livello regionale o globale possono risultare non rappresentativi delle condizioni locali;
- Gli impatti ambientali sono descritti come impatti potenziali perché non sono definiti nello spazio e nel tempo adottando, quindi, un approccio di tipo stazionario;
- La natura delle scelte e assunzioni compiute, come ad esempio fissare i confini del sistema, scegliere la provenienza dei dati e fissare le categorie di impatto, può essere influenzata da aspetti soggettivi;
- I modelli applicati nella valutazione degli impatti ambientali potrebbero non essere disponibili per tutte le applicazioni giacché direttamente dipendenti da assunzioni fatte.

In definitiva, analizzate le varie incertezze connesse all'utilizzo del metodo LCA, si può concludere che, il presente caso di studio può essere utilizzato come linea guida per gli operatori del settore della progettazione sia per avere un ulteriore elemento decisionale nella fase di scelta della strategia di intervento da adottare sia come punto di partenza per eventuali studi futuri per altre alternative di rinforzo strutturale degli

edifici esistenti. Nonostante alcune limitazioni è sicuramente giusto ritenere l'approccio utilizzato valido per progettare interventi che limitino i loro impatti sull'ambiente.

Conclusioni

Nella parte iniziale di questo volume è stata presentata un'analisi sintetica ma globale della metodologia BIM.

Ciò è servito a chiarire alcuni concetti e definizioni spesso distorti a causa dell'enorme quantità di informazioni che circolano sul BIM nella comunità tecnica.

In particolare si è evidenziato come il BIM permette di gestire l'intero ciclo di vita di un'opera, dalla fase progettuale (preliminare, definitiva ed esecutiva) fino alla gestione dell'opera durante la sua vita utile con un modello *"as built"*, che rappresenta fedelmente l'opera e tutte le eventuali modifiche effettuate in fase di realizzazione.

Diversamente dalla progettazione tradizionale, con un approccio di tipo BIM, tutte le fasi di progettazione sono totalmente collegate tra loro mediante un continuo processo di arricchimento e di crescita di un modello unico e condiviso dell'opera edilizia.

Asserite le potenzialità del BIM, è stata rammentata l'attuale e centrale necessità di ridurre gli impatti sull'ambiente del settore delle costruzioni, quale comparto che incide in maniera massiccia sull'inquinamento globale.

La mitigazione dell'impatto ambientale degli edifici e delle opere civili è, infatti, un aspetto molto rilevante nelle strategie di sviluppo sostenibile, tuttavia complesso da perseguire.

L'obiettivo principale è stato quello di definire una procedura che, sfruttando le enormi potenzialità del BIM di archiviazione e gestione dei dati, permetta di eseguire la valutazione degli impatti sull'ambiente delle opere civili basate su analisi di Life Cycle Assessment.

Le metodologie di LCA rappresentano degli strumenti affidabili e oggettivi per la valutazione degli impatti sull'ambiente di materiali e processi; esse però risultano ancora scarsamente utilizzate in ambito civile a causa della difficoltà nella gestione dell'elevata mole di dati necessari per condurre tali analisi.

L'elevata quantità di dati scaturisce dall'estrema complessità ed eterogeneità di sistemi, materiali e componenti che caratterizzano il prodotto finale dell'industria delle costruzioni.

L'approccio BIM che ha già rivoluzionato la gestione delle informazioni relative alle opere civili, consentirà di superare questa problematica grazie alla possibilità di gestire numerose informazioni, integrandone contenuti e proprietà e supportando i processi decisionali di progettazione.

Il BIM è, come mostrato, in grado di gestire la complessità computazionale di un'analisi LCA, offrendo ai progettisti la possibilità di compiere scelte progettuali avendo a disposizione informazioni chiare sugli impatti ambientali legati alle diverse tecnologie edilizie e alle varie fasi progettuali.

Ovviamente tale opportunità può rendersi disponibile solo a valle di un importante lavoro di inventario e catalogazione degli impatti ambientali legati ai materiali, ai sistemi, ai componenti e alle lavorazioni che vengono adoperati nell'immensa industria delle costruzioni.

Per il caso studio di edificio ex novo, è stato sviluppato un tool "ad hoc" partendo da un software, BIM-oriented, molto utilizzato nella pratica professionale per la stima delle quantità e dei prezzi. Questo ha permesso l'integrazione dei dati relativi ai risultati di

LCA di materiali e lavorazioni, utilizzate nell'edilizia, in un processo BIM-based conducendo in maniera immediata ai risultati di LCA dell'intero edificio in oggetto.

Integrare i dati di LCA in un processo di progettazione gestito in BIM, permette ai progettisti di avere un parametro aggiuntivo al complesso delle variabili che caratterizzano la ricerca multi-obiettivo dell'ottimo progettuale. Tale aspetto, in passato non era ipotizzabile data la complessità nel condurre analisi di LCA, soprattutto per aggregati complessi come le opere civili; tale metodologia di valutazione degli impatti ambientali è, infatti, molto diffusa nell'ambito della ricerca ma poco in ambito professionale.

Con la procedura proposta, in ottica di sviluppo sostenibile, è possibile ipotizzare diversi scenari progettuali, modificando materiali, componenti o procedure realizzative e contestualmente monitorare e controllare i parametri che incidono sulla sostenibilità dell'intervento, quali, costi, tempi, impatti sull'ambiente, in modo tale da scegliere la soluzione progettuale che ottimizza tutti gli aspetti che caratterizzano la sostenibilità.

La procedura proposta trova applicazione soprattutto in opere di nuova realizzazione ed è per questo motivo che si è deciso di affrontare la problematica degli edifici esistenti e nella fattispecie della sostenibilità degli interventi di consolidamento sismico. Pertanto, è stata condotta un'analisi di impatto ambientale di diverse soluzioni di rinforzo sismico, mirate a ridurre la vulnerabilità sismica di un caso di studio, rappresentato da una struttura in cemento armato, tipica dell'area mediterranea, progettata e realizzata per uso abitativo alla fine degli anni 70'.

In dettaglio, una volta realizzata l'analisi sismica della struttura as-built, è stato effettuato il progetto di consolidamento mediante l'utilizzo di diverse tecniche di

rinforzo simico. L'obiettivo principale, del progetto di consolidamento, è stato quello di garantire un livello di sicurezza corrispondente all'adeguamento sismico della struttura con tecniche di rinforzo completamente diverse. A tal proposito, il consolidamento della struttura è stato ottenuto mediante l'utilizzo di (i)FRP, (ii) intervento misto incamiciatura in c.a. e FRP e (iii) pareti sismoresistenti.

Di tali tecniche è stata eseguita l'analisi di impatto ambientale, mediante l'utilizzo della metodologia LCA, considerando tutti i materiali e le lavorazioni necessarie per rinforzare la struttura con diverse tecniche e successivamente un'analisi comparativa delle stesse al fine di confrontarle per conoscere tra queste le tecniche con le prestazioni ambientali migliori.

I risultati, rappresentati in termini di categorie di danno (Human Health, Ecosystem Quality, Climate Change e Resources), secondo la metodologia IMPACT2002+, hanno dimostrato che le pareti in cemento armato presentano dati peggiori in tre delle quattro categorie, mentre, per quanto riguarda l'intervento misto e l'intervento con uso esclusivo di FRP, essi presentano valori simili per due delle quattro categorie, mentre, negli altri due indicatori l'uso di FRP mostra delle performance ambientali migliori. Sulla base di tali dati è possibile affermare che, tra le tre strategie di adeguamento sismico proposte, l'utilizzo esclusivo di FRP è quella che presenta le performance ambientali migliori.

Gli impatti legati alla strategia di miglioramento sismico sono risultati circa il 70% in meno rispetto all'intervento con pareti in c.a. e di circa il 50% in meno rispetto alle altre due tecniche di adeguamento sismico.

Tale risultato era abbastanza prevedibile, data la diminuzione degli elementi da rinforzare per ottenere un miglioramento sismico rispetto all'adeguamento, ma la notevole differenza in termini di impatto ambientale rende tale risultato di estremo interesse per sviluppi futuri.

In conclusione, tale elaborato vuole investigare le opportunità offerte dalla metodologia BIM nel gestire le numerose informazioni legate alle analisi di impatto ambientale nel ciclo di vita delle opere, affinché tali informazioni possano orientare le scelte progettuali verso interventi realmente sostenibili.

È evidente che sono ancora molti i passi da compiere in questa direzione; innanzitutto è necessario, sicuramente, generalizzare la metodologia che attualmente è molto influenzata dalle condizioni locali, dal giudizio soggettivo e dalle assunzioni operate. Sono necessari approfondimenti e applicazioni sugli strumenti di gestione e ottimizzazione utili allo sviluppo sostenibile dell'edilizia e dei suoi processi, nello specifico il Building Information Modeling integrato ad analisi LCA che, si spera, possano trarre spunto da questa trattazione.

Bibliografia

- [1] Salzano A., 2015. Metodologie BIM per la progettazione integrata di interventi di riqualificazione e rinforzo strutturale orientati alla sostenibilità ambientale. Tesi di Dottorato XXVII ciclo Ingegneria dei materiali e delle strutture – anno 2015. Università di Federico II di Napoli.
- [2] Tam C., Tam VW., Tsui W. Green construction assessment for environmental management in the construction industry of Hong Kong. Int J Proj Manag 2004;22:563–71. doi:10.1016/j.ijproman.2004.03.001
- [3] Nbims. National Building Information Modeling Standard. Building 2007:183.
- [4] Lorenzo Nissim, iBIMi: BIM e Progettazione Integrata: una questione di cultura, 19 Novembre 2015.
- [5] Patrick MacLeamy: The Future of the Building Industry, 2 Febbraio 2010.
- [6] Barlish K, Sullivan K. How to measure the benefits of BIM — A case study approach. Autom Constr 2012;24:149–59. doi:10.1016/j.autcon.2012.02.008.
- [7] Synergis University 2014: BIM for Construction Knittle AEC Solutions Engineer, 9 Giugno 2014.
- [8] Porwal A, Hewage KN. Building Information Modeling (BIM) partnering framework for public construction projects. Autom Constr 2013;31:204–14. doi:10.1016/j.autcon.2012.12.004.
- [9] BSI, PAS 1192-5:2015: Specification for security-minded building information modelling, digital built environments and smart asset management.
- [10] Ingenio, Modernizzazione e BIM: Il medio periodo del settore delle costruzioni, 30 Marzo 2014.

- [11] World Commission on Environment and Development. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (The Brundtland Report). *Med Confl Surviv* 1987;4:300. doi:10.1080/07488008808408783.
- [12] Jørgensen A, Herrmann IT, Bjørn A. Analysis of the link between a definition of sustainability and the life cycle methodologies. *Int J Life Cycle Assess* 2013;18:1440–9. doi:10.1007/s11367-013-0617-x.
- [13] Klöpffer W. Life-Cycle based methods for sustainable product development. *Int J Life Cycle Assess* 2003;8:157–9. doi:10.1007/BF02978462.
- [14] Terzic V, Mahin SA, Comerio MC. COMPARATIVE LIFE-CYCLE COST AND PERFORMANCE ANALYSIS OF STRUCTURAL SYSTEMS FOR BUILDINGS n.d. doi:10.4231/D3930NW0G.
- [15] Wix J, Bjørkhaug L. EU-project STAND-INN – Integration of Standards for Sustainable Construction into Business Processes Using IFC Standards 2008.
- [16] Pulselli RM, Simoncini E, Pulselli FM, Bastianoni S. Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy Build* 2007;39:620–8. doi:10.1016/j.enbuild.2006.10.004.
- [17] Azhar S, Carlton W a., Olsen D, Ahmad I. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Autom Constr* 2011;20:217–24. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.019.
- [18] Cabeza LF, Rincón L, Vilariño V, Pérez G, Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;29:394–416. doi:10.1016/j.rser.2013.08.037.

- [19] Asdrubali F, Baldassarri C, Fthenakis V. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy Build* 2013;64:73–89. doi:10.1016/j.enbuild.2013.04.018.
- [20] Eadie R, Browne M, Odeyinka H, McKeown C, McNiff S. BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. *Autom Constr* 2013;36:145–51. doi:10.1016/j.autcon.2013.09.001.
- [21] Ortiz O, Castells F, Sonnemann G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Constr Build Mater* 2009;23:28–39. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.
- [22] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G. Presemmg a New Meth6d IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology 2003;8:324–30.
- [23] Olinzock M a., Landis AE, Saunders CL, Collinge WO, Jones AK, Schaefer L a., et al. Life cycle assessment use in the North American building community: summary of findings from a 2011/2012 survey. *Int J Life Cycle Assess* 2015;20:318–31. doi:10.1007/s11367-014-0834-y.
- [24] Abdulla R. INTEGRATING BUILDING INFORMATION MODELING AND LIFE CYCLE ASSESSMENT TOOLS TO DESIGN n.d.:17–9.
- [25] Gu N, London K. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Autom Constr* 2010;19:988–99. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.002.
- [26] Volk R, Stengel J, Schultmann F. Corrigendum to “Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs” [*Autom. Constr.* 38 (March 2014) 109–127]. *Autom Constr* 2014;43:204. doi:10.1016/j.autcon.2014.02.010.

- [27] Precettive D. Legge 5 Novembre 1971 n . 1086 Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato , normale e precompresso ed a struttura metallica 1971:1–4.
- [28] DECRETO MINISTERO LLPP 30 MAGGIO 1974 Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche 1974.
- [29] Computer and Structures inc. University Avenue Berkley California 94704 USA. CSI Analysis Reference Manual for SAP200, ETABS, and SAFE 2013:496.
- [30] Ministro IL, Infrastrutture D. Decreto del Ministero delle infrastrutture 14 gennaio 2008 Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni . 2009;2008.
- [31] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. C.M. Infrastrutture e Trasporti 2 febbraio 2009, n° 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni." Gazz Uff Della Repubb Ital 26 Febbrario 2009, N° 47, Suppl Ord N° 27 2009.
- [32] Verderame GM, Iervolino I, Ricci P. Report on the damages on buildings following the seismic event of 6th of april 2009, V1.20 2009.
- [33] Yan H, Damian P. Benefits and Barriers of Building Information Modelling n.d.

Il Centro Sperimentale di Sviluppo delle Competenze nell'area delle Costruzioni "Edil-lab" è promosso dalla Regione Campania e rappresenta uno strumento innovativo di integrazione e interazione tra i diversi attori politico-istituzionali ed economici del territorio, un "luogo" aperto e funzionale a stabili attività di sviluppo del capitale umano, abilitato a programmare iniziative formative e a favorire un sempre più effettivo incontro tra domanda e offerta di lavoro nell'edilizia.

Edil-lab rappresenta un modello innovativo che mette a sistema il mondo delle imprese, l'alta formazione, gli organismi di rappresentanza, l'Università, gli istituti scolastici e la scuola di formazione del settore edile ed ha, tra le principali finalità, l'istituzione di un Osservatorio permanente al fine di monitorare il sistema delle imprese e i fabbisogni di competenze necessari per lo sviluppo e l'incremento della competitività del settore delle costruzioni in Campania.

La collana di monografie, prodotte nell'ambito del Progetto Edil-lab, di cui la presente è parte, costituiscono in tal direzione dei vademecum di supporto alle finalità di aggiornamento e sviluppo delle competenze in edilizia.

La presente pubblicazione fa parte di una più ampia produzione – una vera e propria “collana” - di monografie multidisciplinari relativa all’edilizia, realizzata dalle imprese partners del Progetto Edil-lab, che costituisce, nell’insieme, un utile strumento di aggiornamento professionale per gli operatori attivi nel settore delle costruzioni.



Edizioni Graffiti

ISBN 978-8886 98 381 5



9 788886 983815