

**VERSO UNA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE DELLE
STRUTTURE IN ACCIAIO: METODO QUALI-QUANTITATIVO
PER LA VALUTAZIONE DEL FATTORE DI
DISASSEMBLAGGIO**

**TOWARD SUSTAINABLE DESIGN OF STEEL STRUCTURES: A
QUALITATIVE-QUANTITATIVE METHOD FOR
DISASSEMBLY FACTOR ASSESSMENT**

Giacomo Di Ruocco
University of Salerno
Department of Civil Engineering
Fisciano (Salerno) - Italy
gdiruocco@unisa.it

ABSTRACT

The practice of reusing building components, today, turns out to be more complex than in the past, as industrial production, in order to meet increasingly high-performance design requirements, has generated a multiplicity of composite products, which are difficult to separate, to meet contemporary different requirements. On the other hand, the current design-build supply chain is still traditional in nature, being anchored to a linear type of dynamic, where it does not provide for an interface between the operators placed at the ends of the process: designer and demolition company. International (LEED, DGNB, BREEAM, etc.) and Italian (CAM) sustainability certifications impose purely quantitative references, for determining the incidence of disassembly of buildings. This approach, however, turns out to be realistically biased as it does not investigate the qualitative aspects of the building itself, in terms of technological characteristics and types of constraint of technical elements. The methodological approach is therefore aimed at providing a qualitative-quantitative tool that can objectively assess the disassembly factor of the steel building. The aim is to lay the groundwork for the drafting of a shared protocol that can in some way smooth out the critical issues and obstacles that, at present, discourage the practice of reusing structural steel.

SOMMARIO

La pratica del riutilizzo dei componenti edilizi, oggi, risulta essere più complessa che in passato, in quanto la produzione industriale, per far fronte a esigenze progettuali sempre più performanti,

ha generato una molteplicità di prodotti composti, difficilmente separabili, per soddisfare contemporaneamente differenti requisiti. D'altra parte, l'attuale filiera progettuale-costruttiva è ancora di tipo tradizionale, essendo ancorata ad una dinamica di tipo lineare, laddove non prevede un'interfaccia tra gli operatori posti alle estremità del processo: progettista ed impresa di demolizione. Le certificazioni di sostenibilità internazionali (LEED, DGNB, BREEAM, ecc.) e nazionali (CAM) impongono riferimenti prettamente quantitativi, per la determinazione dell'incidenza di disassemblabilità degli edifici. Tale approccio, tuttavia, risulta essere realisticamente parziale in quanto non indaga gli aspetti qualitativi dell'edificio stesso, in termini di caratteristiche tecnologiche e tipologie di vincolo degli elementi tecnici. L'approccio metodologico è pertanto finalizzato a fornire uno strumento quali-quantitativo in grado di valutare in maniera oggettiva il fattore di disassemblabilità dell'edificio in acciaio. La finalità è quella di porre le basi per la stesura di un protocollo condiviso che possa in qualche modo limare le criticità e gli ostacoli che, attualmente, disincentivano la pratica del riutilizzo dell'acciaio strutturale.

1 INTRODUZIONE

La direttiva comunitaria 2008/98/CE poneva, per il 2020, l'obiettivo di riciclo del 70% dei rifiuti da costruzione e demolizione. La conseguente riduzione dell'estrazione di materie prime vergini provenienti da cava, stimata in oltre 23 milioni di tonnellate, avrebbe infatti consentito di arrestare la produzione di almeno 100 cave di sabbia e di ghiaia per un anno, con effetti immediati di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Per quanto riguarda l'industria dell'acciaio, le potenzialità di riduzione degli impatti ambientali aumentano in maniera esponenziale grazie alle opportunità di riciclo ma anche di riuso del materiale. Terminata la vita utile di un edificio in acciaio strutturale, grazie alla particolare predisposizione del sistema alle operazioni di separazione o disassemblaggio, circa il 100% del materiale decostruito può essere deviato ad operazioni di trasformazione per il riuso o il riciclo. È evidente che, tra le due destinazioni, il riuso è quella a minore impatto ambientale: nel mondo anglosassone questa proprietà viene indicata sinteticamente con il termine *up-cycling*, consentendo di recuperare un componente dismesso per destinarlo ad un ruolo di pari 'dignità' e prestazioni rispetto a quello originario. Tale prerogativa è tuttavia rara per gli altri materiali (ad es. muratura, cls, materie plastiche, ecc.), per i quali può essere prospettata una seconda vita di livello inferiore (*down-cycling*).



Fig. 1. Sistemi costruttivi con differenti scenari di fine vita: a sinistra, *upcycling* (decostruzione e riutilizzo); a destra, *downcycling* (demolizione tradizionale e frantumazione)

La necessità di progettare sistemi edilizi disassemblabili viene imposto dalla normativa nazionale sui CAM, all'art.2.3.7: *I progetti degli interventi di nuova costruzione, inclusi gli interventi di demolizione e ricostruzione devono prevedere un piano per il disassemblaggio e la demolizione selettiva dell'opera a fine vita che permetta il riutilizzo o il riciclo dei materiali, componenti edilizi e degli elementi prefabbricati utilizzati* [1]. Sempre i CAM, conformemente a protocolli di

sostenibilità comunitari (LEED), definiscono una soglia quantitativa di disassemblaggio nel 50% in peso dei materiali provenienti da operazioni di costruzione e demolizione: da deviare dalle discariche e dagli impianti di incenerimento (LEED), oppure, nel caso dei CAM, da sottoporre, a fine vita, a demolizione selettiva mediante operazioni di riciclo o riutilizzo. Evidentemente, la definizione della soglia del 50% p/p è condizione necessaria ma non sufficiente per stimare l'aliquota realisticamente indirizzabile ad operazioni di riuso, piuttosto che ad operazioni di riciclo. La sfida del progetto di ricerca, pertanto, è definire un fattore di disassemblaggio delle costruzioni in acciaio, di tipo quali-quantitativo, con i seguenti obiettivi:

- indirizzare la soglia quantitativa minima di disassemblabilità del 50% (definita dai parametri CAM [1] e LEED [2]), prevalentemente verso il riutilizzo dei componenti, riducendo al minimo (tendente a 0) la quantità di materiale da destinare al riciclo;
- determinare una soglia qualitativa minima di riutilizzo dei componenti, mediante implementazione del metodo PROGRESS [3], progetto europeo sviluppato per edifici in acciaio ad un piano, al fine di estenderne l'applicazione anche ad edifici multipiano in acciaio.



Fig. 2. Andamento produzione di acciaio grezzo su scala mondiale (fonte: Provisions for Greater Reuse of Steel Structures - Webinar *Reusing existing single-storey buildings Thursday 7th May 2020*)

2 STATO DELL'ARTE

Il concetto di riutilizzo dei componenti edilizi mette le sue radici in un passato in cui la disponibilità di materiali da costruzione era relativamente scarsa e la loro produzione era lenta e costosa. Tale pratica oggi si presenta molto più ardua a causa della produzione industriale di prodotti per l'edilizia che garantiscano molteplici livelli prestazionali. Secondo i dati Eurostat, le attività di costruzione e demolizione in Europa sono responsabili del 35% della produzione di rifiuti solidi. Il settore delle costruzioni consuma circa la metà di tutte le risorse naturali estratte in Europa ogni anno, con richieste energetiche molto elevate per la loro trasformazione in prodotti da costruzione. Si stima che il 40-50% di tutte le materie prime estratte vengano trasformate in prodotti da costruzione. La questione del recupero dell'acciaio strutturale ha impatti a vari livelli:

-in fase progettuale, mediante opportune scelte orientate verso sistemi costruttivi prevalentemente a secco, predisponendo l'edificio, o parti di esso, alla decostruzione e al riutilizzo, a fine vita;

-in fase di dismissione a fine vita, attuando una transizione da una demolizione di tipo tradizionale ad una demolizione selettiva/decostruzione, al fine di mantenere possibilmente integre le caratteristiche prestazionali degli elementi costruttivi.

Il progetto PROGRESS (PROvisions for Greater REuse of Steel Structures), sviluppato da sette partner di cinque paesi dell'UE, fornisce metodologie, strumenti e raccomandazioni sul riutilizzo di componenti in acciaio da edifici esistenti monopiano. Tale ricerca può essere vista come un punto di partenza al fine di estenderne l'applicazione anche ad edifici multipiano in acciaio, adottando modelli progettuali preventivamente predisposti verso il riutilizzo dei componenti e la riduzione a 'zero' dei rifiuti, a fine vita. Il target principale del riutilizzo strutturale è quello di chiudere il ciclo dei flussi di materiali e prodotti dall'acciaio da costruzione e creare condizioni adeguate per l'attuazione dei principi dell'economia circolare nel settore dell'edilizia. Il ciclo di vita del prodotto da costruzione è caratterizzato da diverse fasi: A) Prodotto e fase di costruzione; B) Fase di utilizzo; C) Fase di fine vita; D) Potenziale di riutilizzo, recupero e riciclaggio.

Sebbene gli impatti del riutilizzo possano essere osservati durante l'intero ciclo di vita, l'obiettivo principale del progetto è l'ultima fase, D. Come illustrato nella Figura 3, è possibile riconoscere diversi casi di base di riutilizzo dei componenti a seconda del livello di smontaggio:

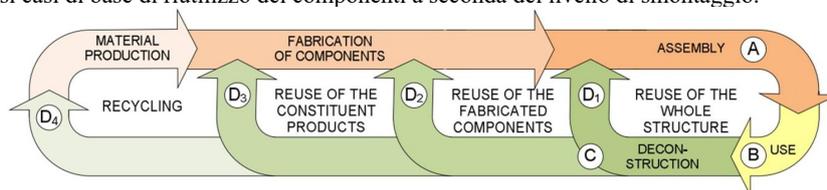


Fig. 3. Progetto PROGRESS: scenari di riutilizzo nel ciclo di vita delle costruzioni in acciaio (fonte: [3])

dove: D₀: Riutilizzo dell'intera struttura o di una sua parte senza smontaggio | D₁: Riutilizzo degli elementi tecnici in acciaio strutturale (può includere l'involucro) | D₂: Riutilizzo dei componenti preassemblati (ad es. pannelli sandwich, colonne) | D₃: Riutilizzo degli elementi costituenti (ad es. sezioni, piastre) |

Dal punto di vista della decostruzione e del trasporto, esistono diverse possibilità:

D_{UN}: riutilizzo in situ senza smontaggio | D_B: riutilizzo in situ nella stessa configurazione | D_C: riutilizzo in situ ma in una configurazione diversa | D_D: riutilizzo in un sito diverso nella stessa configurazione | D_E: riutilizzo su un sito diverso con una configurazione diversa.

Gli obiettivi del progetto PROGRESS sono essenzialmente:

- Ridurre gli ostacoli tecnici al riutilizzo dell'acciaio strutturale stabilendo procedure di verifica della qualità per gli elementi strutturali e gli involucri decostruiti da riutilizzare;
- Sviluppare una metodologia per valutare e classificare il grado di riutilizzabilità dei prodotti e dei sistemi da costruzione negli edifici in acciaio a un piano;
- Semplificare l'implementazione di componenti riutilizzabili attraverso raccomandazioni per la progettazione, per la decostruzione e il riutilizzo utilizzando elementi recuperati;
- Supportare il processo decisionale dei produttori, dei proprietari delle strutture e dei progettisti con la metodologia raccomandata e i dati di base per calcolare l'impatto ambientale e il costo del riutilizzo dei componenti in acciaio;
- Proporre l'estensione dello standard IFC per gestire dati e funzionalità essenziali per gli elementi riutilizzabili in acciaio;
- Sviluppare un prototipo di portale commerciale online di acciaio riutilizzato per coordinare l'offerta e la domanda di componenti a base di acciaio riutilizzati;
- Introdurre nuovi tipi di soluzioni ibride per gli involucri massimizzando il potenziale di riutilizzo dei componenti, migliorare le prestazioni termiche degli edifici e prolungarne la durata;
- Promuovere il riutilizzo dell'acciaio attraverso un'ampia diffusione (pubblicazioni, linee guida, workshop, casi di studio e comunicazioni con le parti interessate).

3 STRUMENTI E METODI

Gli strumenti utilizzati per lo sviluppo della metodologia sono:

- normativa CAM, con riferimento ai parametri di disassemblabilità a fine vita;
- metodo PROGRESS, che definisce il fattore di riutilizzo di edifici in acciaio monopiano, sviluppato sulla base dei seguenti riferimenti internazionali VDI-guideline 2243 "Recycling-oriented product development" [4]; DGNB certification system [5].

Sulla base dei risultati della revisione della letteratura e dell'analisi delle categorie prestazionali, per la classificazione del grado di riutilizzabilità sono state individuate le seguenti categorie prestazionali per i componenti edilizi:

- Decostruzione/Smontaggio: funzionamento del sito con conseguente movimentazione di parti trasportabili che verranno ulteriormente movimentate.
- Separazione/Pulizia: processo di officina che porta ad un componente riutilizzabile accettabile dal cantiere di recupero o dal rivenditore di materiali. È il pre-processo di modifica.
- Movimentazione: sollevamento, trasporto, stoccaggio e protezione dei componenti riutilizzabili dopo il processo di decostruzione.
- Controllo qualità: processo di supporto alla riprogettazione confermando la qualità dei materiali presenti nel componente.
- Controllo della geometria: processo che supporta la riprogettazione dimostrando che la geometria dei componenti è conforme alle tolleranze negli standard di esecuzione.
- Riprogettazione: processo d'ufficio governato dal nuovo target di vita, dalla disponibilità dei componenti e dal risultato dei controlli. Lo scopo della riprogettazione è quello di modificare i componenti o verificare che possano sostenere carichi nel nuovo scenario di vita.
- Riutilizzo: la libertà di utilizzare il componente in un ambito più ampio, uno scopo diverso (ad esempio una colonna come una trave) e persino un settore diverso.
- Alterazione/Modifica: processo di officina opzionale che porta a un prodotto modificato.

Table 1. Checklist acciaio strutturale e attribuzione dei relativi punteggi

Criteri prestazionali	Molto difficile P=0,2	Difficile P=0,4	Moderato P=0,6	Semplice P=0,8	Molto semplice P=1
Decostruzione/ Smontaggio wi = 30%	Connessioni saldate, alto rischio di danni durante la decostruzione	Connessioni saldate con accesso difficile	Connessioni per lo più saldate tra i componenti, con facile accesso	Connessioni bullonate tra componenti con accesso difficile	Connessioni bullonate facilmente accessibili
Separazione/ Pulitura wi = 10%	Pulizia/taglio per separare altri materiali, staffe, ecc.	Connessioni bullonate con accesso difficile	Le connessioni bullonate con difficile accesso	Le connessioni bullonate devono essere rimosse	Componenti che non richiedono pulizia
Movimentazione wi = 15%	Il superamento delle dimensioni di trasporto standard, soggetto a danni, richiede speciali apprestamenti	Il trasporto standard, richiede speciali apprestamenti	Manipolazione con gru, non sensibile ai danni	Piccoli dispositivi di sollevamento	Manipolazione manuale
Controllo qualità wi = 15%	Nessuna documentazione, ambiente esigente, cronologia dei carichi difficile da stimare. Necessari test di laboratorio	Sono necessari test di laboratorio per verificare le proprietà del materiale	Documentazione disponibile, cronologia gestionale, test in loco necessari per verifica proprietà materiale	Documentazione dei materiali disponibile, inclusa la cronologia gestionale e manutentiva	Documentazione dei materiali disponibile. Riutilizzo in ambienti meno esigenti
Controllo della geometria wi = 5%	I componenti non supererebbero i requisiti geometrici senza modifiche	Scansione 3D a geometria complessa richiesta	È necessario confermare le posizioni dei fori dei bulloni, ecc.	Controllo della rettilineità e della distorsione necessari	Rettilineità sufficiente per il riutilizzo
Riprogettazione (disponibilità documentazione di progetto) wi = 10%	Nessuna documentazione, i componenti non soddisferebbero i requisiti di progettazione standard senza modifica	Nessuna documentazione disponibile, è richiesto un nuovo design	Documentazione di progettazione disponibile	Documentazione dettagliata disponibile con cronologia di carico e manutenzione	Progettato di riutilizzo, documentazione di manutenzione in formato digitale
Riutilizzo wi = 5%	Dimensioni e forme uniche, nessun'altra applicazione possibile	Possibilità di riutilizzo con intervento di trasformazione	Possibilità limitata di utilizzo per un altro scopo	Possibilità di utilizzo anche al di fuori del settore edile	Domanda di altra destinazione rispetto a quella originaria
Alterazione/modifica wi = 10%	Dimensioni non standard: il riutilizzo richiederebbe una rigenerazione completa	Richiede la rimozione di parti saldate	Richiede l'aggiunta e la regolazione dei fori dei bulloni	Richiede solo l'aggiunta di nuovi componenti	Non richiede modifiche

L'approccio metodologico si articola nelle seguenti fasi essenziali:

FASE 1: verifica della percentuale di disassemblabilità imposta dai CAM edilizia (art.2.4.1.1), fissata nel 50% in peso dei componenti dell'edificio nel suo complesso, di cui almeno il 15% deve riguardare elementi non strutturali. L'implementazione del modello, tuttavia, ha posto come criterio che il totale degli elementi disassemblabili (50% in peso) debba essere destinato al riuso, minimizzando (a zero) la quantità di materiale da destinare al riciclo.

FASE 2: implementazione del metodo PROGRESS, ai fini dell'estensione applicativa del modello anche ad edifici alti, con struttura portante in acciaio/calcestruzzo. Lo sviluppo del modello consente di definire un coefficiente adimensionale, il fattore di riutilizzo (Fr), dell'edificio oggetto di indagine. Rispetto ad una scala di valori variabile da 0,20 e 1,00, la soglia minima si colloca in corrispondenza del punto medio, pari a 0,60.

FASE 3 : verifica della congruenza tra il modello di valutazione di tipo quantitativo dei parametri CAM (1^fase) ed il modello qualitativo ex-PROGRESS. La verifica complessiva del modello dovrà pertanto soddisfare contemporaneamente le soglie minime di entrambi i modelli:

-50% elementi disassemblabili da destinare al riutilizzo (soglia quantitativa – CAM);

- fattore di riutilizzo minimo (Fr) $\geq 0,60$ (soglia qualitativa – ex-PROGRESS).

Table 2. Quadro riepilogativo del modello integrato

CASO STUDIO					
ANALISI QUANTITATIVA - 'CAM'					
destinazione	CLS (% p/p)	ELEMENTI METALLICI (% p/p)		VETRO (% p/p)	
	IN OPERA	PREFABBR.	ACCIAIO	ALLUMINIO	
riciclo (a)	p ₁	p ₂	p ₃	p ₄	p ₅
riutilizzo (b)	p ₁	p ₂	p ₃	p ₄	p ₅
PERCENTUALE RIUTILIZZATA					
$\sum (b) p_i$					
ANALISI QUALITATIVA - 'PROGRESS' (INDICE 'R')					
	n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅
$\sum [n_i \times p_i(b)] / \sum [p_i(b)]$					

FASE 4 : i casi studio sono stati selezionati secondo i seguenti criteri:

- n.1 tipologia edilizia semplice (edificio monopiano);
- n.1 tipologia edilizia complessa (edificio multipiano).

FASE 5 : applicazione all'edificio monopiano: edificio del mercato coperto di Colonia - Germania (2002), selezionato tra i casi reali sui quali è stato sviluppato il metodo PROGRESS.

FASE 6 : applicazione all'edificio multipiano: Torre Intesa San Paolo a Torino (2015).

I risultati attesi consentiranno di definire strategie prestazionali migliorative, in termini sia quantitativi che qualitativi, ai fini del raggiungimento del rispettivo valore soglia minimo, definito per ciascuno dei parametri.

4 APPLICAZIONE AI CASI STUDIO

4.1 Caso studio 1 (edificio monopiano)

Il grande mercato di Colonia, in Germania, realizzato nel 2002, non era stato progettato per la decostruzione e il riutilizzo. La decostruzione dell'edificio è stata effettuata secondo la seguente procedura: 1) preliminare monitoraggio ambientale per rilevare la eventuale presenza di polveri pericolose (ad es. amianto); 2) rilievo dell'edificio mediante attrezzatura fotogrammetrica (drone) e successiva ricostruzione del modello 3D; 3) determinazione delle proprietà meccaniche della struttura portante, mediante test minimamente invasivi dell'acciaio strutturale, al fine di verificare la resistenza e la duttilità del materiale.

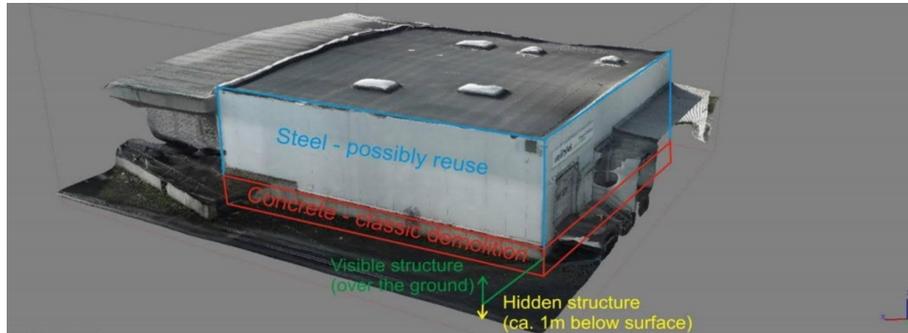


Fig. 4. Edificio mercato a Colonia: modello 3D restituito mediante misurazione fotogrammetrica prelevata dal drone (fonte: [3])



Fig. 5. Edificio mercato a Colonia: fasi della demolizione selettiva della struttura, a sinistra, e del rivestimento di copertura, a destra (fonte: [3])

Table 3. Riepilogo risultati caso studio 1 (edificio monopiano)

CASO STUDIO 1 - EDIFICIO MONOPIANO					
ANALISI QUANTITATIVA 'CAM'					
	CLS (%p/p)		ELEMENTI METALLICI (%p/p)		VETRO (%p/p)
destinazione	IN OPERA	PREFABBR.	ACCIAIO	ALLUMINIO	
riciclo	15,39	0,00	0,00	0,00	0,00
riutilizzo	0,00	0,00	84,59	0,00	0,02
PERCENTUALE RIUTILIZZATA					
84,61					
ANALISI QUALITATIVA 'PROGRESS' (INDICE 'R')					
	0	0	0,82/0,97	0	0,02
0,82					

4.2 Caso studio 2 (edificio multipiano)

La Torre Intesa San Paolo, ultimata nel 2015 su progetto di Renzo Piano Building Workshop, si configura come una mensola in struttura mista acciaio-calcestruzzo, che si sviluppa in elevazione per 38 piani fino a circa 160 metri e poggiate su un basamento in calcestruzzo con dimensioni 46 x 161 metri, al di sotto del piano campagna. Gli elementi distintivi sono [6,7] :

- Basement: il basamento dell'edificio, in calcestruzzo armato, si sviluppa per circa 25 m in profondità nel sottosuolo e costituisce, da un lato la fondazione diretta della struttura e dall'altro il contrasto dei diaframmi perimetrali di contenimento del terreno.
- Megacolonne: gli elementi verticali portanti sono costituiti da 6 megacolonne, realizzate con un guscio in acciaio e riempite internamente in calcestruzzo. Si sviluppano in altezza dalla base alla

CASO STUDIO 2 - EDIFICIO MULTIPIANO (IPOTESI MIGLIORATIVA 2)					
ANALISI QUANTITATIVA 'CAM'					
	CLS (%p/p)		ELEMENTI METALLICI (%p/p)		VETRO (%p/p)
destinazione	IN OPERA	PREFABBR.	ACCIAIO	ALLUMINIO	
riciclo	63,30	0,00	0,00	0,00	0,00
riutilizzo	0,00	23,20	12,60	0,65	0,29
PERCENTUALE RIUTILIZZATA					
36,70					
ANALISI QUALITATIVA 'PROGRESS' (INDICE 'R')					
	0	0,4	0,82	0,88	0,98
0,56					
CASO STUDIO 2 - EDIFICIO MULTIPIANO (IPOTESI MIGLIORATIVA 3)					
ANALISI QUANTITATIVA 'CAM'					
	CLS (%p/p)		ELEMENTI METALLICI (%p/p)		VETRO (%p/p)
destinazione	IN OPERA	PREFABBR.	ACCIAIO	ALLUMINIO	
riciclo	42,70	0,00	0,00	0,00	0,00
riutilizzo	0,00	20,10	36,40	0,65	0,29
PERCENTUALE RIUTILIZZATA					
57,30					
ANALISI QUALITATIVA 'PROGRESS' (INDICE 'R')					
	0	0,4	0,82	0,88	0,98
0,68					

5 RISULTATI E DISCUSSIONI

5.1 Caso studio 1 (edificio monopiano)

Come si evince dai grafici comparativi tra i risultati relativi allo stato di fatto dei casi 1 e 2 (table 3,4), il caso studio n.1, edificio monopiano, conferma di essere più virtuoso rispetto al caso 2 (edificio multipiano), sia in termini quantitativi (parametri CAM-LEED), sia in termini qualitativi (modello PROGRESS).



Fig. 7. Confronto tra i risultati relativi allo stato di fatto dei casi studio 1 e 2: a sinistra l'analisi quantitativa, a destra l'analisi qualitativa

5.2 Caso studio 2 (edificio multipiano)

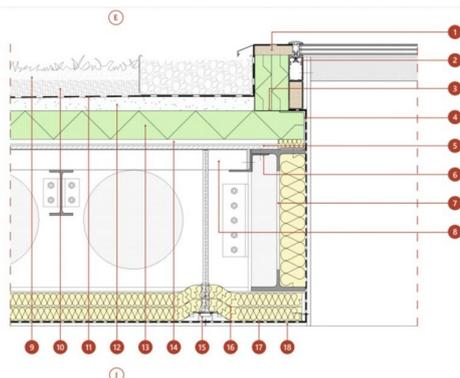
Dall'applicazione del modello allo stato di fatto dell'edificio multipiano in acciaio, è emerso che non sono rispettati entrambi i valori minimi, quantitativo e qualitativo. Pertanto, al fine di superare i valori limite, sono stati ipotizzati i seguenti scenari migliorativi:

-*ipotesi migliorativa n.1* : incremento quantitativo degli elementi disassemblabili, ipotizzando una variante tecnica 'a secco' del sistema degli orizzontamenti, mediante la sostituzione dei solai a tegoli in cls, con strutture in lamiera grecata in acciaio e stratificazione a secco;

-*ipotesi migliorativa n.2* : analisi delle connessioni tra gli elementi in acciaio ed eventuale sostituzione, laddove possibile, delle connessioni saldate con connessioni bullonate. Tale approccio è possibile per gli elementi di collegamento verticale (scale e pianerottoli), per il transfer nord e sud, per la struttura portante degli ultimi piani (compresa la copertura). Da tale scenario sono

escluse le megacolonne essendo costituite da un sistema misto di elementi composti in acciaio saldati in officina, con getto di riempimento in cls in opera. Agli elementi interessati da tale modifica, nei primi tre criteri (decostruzione/smontaggio, separazione/pulitura e maneggio) viene attribuito un indice di riutilizzo ρ pari a 0,8 e non più 0,4. La percentuale riutilizzata risulta al di sotto del 50% nonostante l'indice r superi la soglia.

-ipotesi migliorativa n.3 : scenario che prevede l'applicazione combinata delle due precedenti varianti.



LEGENDA:

1. Isolante XPS con scossalina integrata in alluminio
2. Lucernario
3. Profilato sottile di acciaio con doppio strato di isolante rigido di polistirene espanso
4. Profilato a C 90x160mm - sp 5mm.
5. Pannello OSB 12 - sp 12mm.
6. Angoli 80x80mm e 65x65mm - sp 5mm.
7. Trave primaria alveolare con profilo di base IPE 450
8. Lamiera grecata appoggiata sulle travi secondarie
9. Substrato
10. Substrato drenante
11. Doppio strato impermeabilizzante
12. Massetto di pendenza 1% alleggerito
13. Pannelli isolanti rigidi
14. Lastra in gesso/fibra per sottofondo a secco
15. Zona sterile di ghiaia larga 40cm - sp 9cm.
16. Controsoffitto - profili a C+ 50x27x0,6mm
17. Barriera al vapore
18. Lastra incombustibile in gesso rinforzato con fibra di vetro

Fig. 8. Variante tecnica esemplificativa del sistema di orizzontamenti (ipotesi migliorativa 1): soluzione di copertura

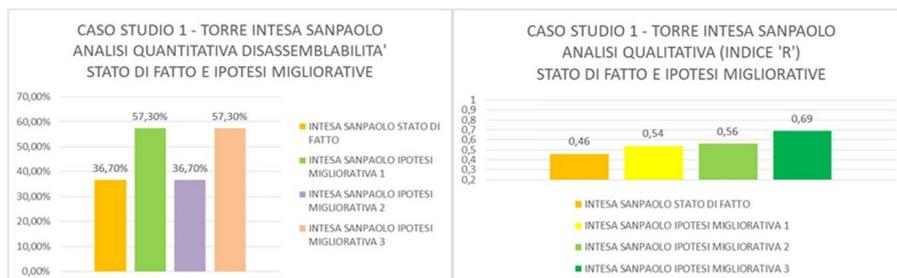


Fig. 9. Risultati comparativi caso 2: stato di fatto / ipotesi migliorative

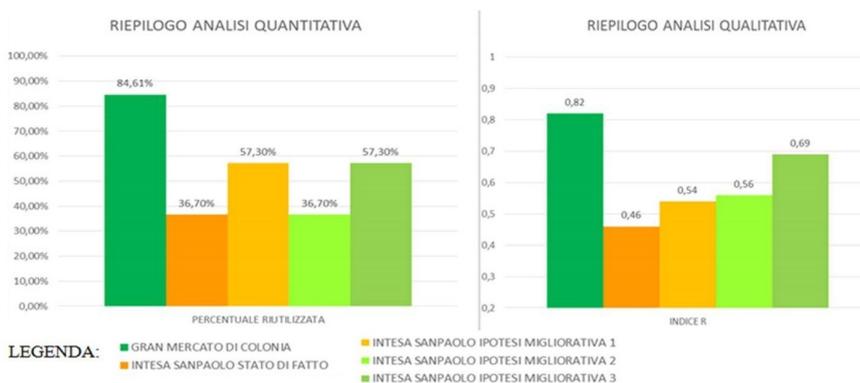


Fig. 10. Comparazione risultati casi studio 1 e 2, con ipotesi migliorative caso 2

I risultati evidenziano che lo scenario ottimale dell'edificio multipiano, ovvero quello che consente il superamento di entrambe le soglie, sia quantitativa (57,30%), sia qualitativa (0,69), è costituito dall'ipotesi migliorativa n.3, ovvero quello che prevede la concomitanza di entrambe le varianti proposte nelle ipotesi migliorative n.1 e n.2.

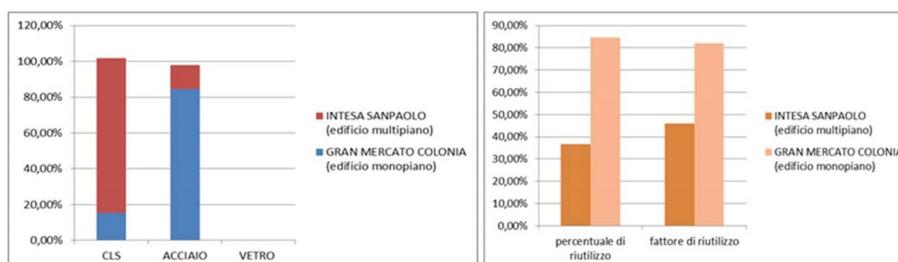


Fig. 11. I risultati evidenziano il rapporto tra incidenza di materiale e percentuale/fattore di riutilizzo: inversamente proporzionale per il calcestruzzo e direttamente proporzionale per l'acciaio

CONCLUSIONI

Il presente contributo costituisce l'estratto di un progetto di ricerca finalizzato a determinare in maniera possibilmente realistica il fattore di disassemblabilità di un edificio con struttura portante in acciaio. L'obiettivo è quello di superare il limite 'quantitativo' imposto dai protocolli di sostenibilità (CAM, LEED, ecc.), mediante l'integrazione con una valutazione di tipo 'qualitativo', elaborando a tale scopo una implementazione del metodo PROGRESS, sperimentato da una serie di partner nell'ambito di un progetto Horizon 2017-20, per edifici monopiano in acciaio. Il modello integrato si pone quale possibile soluzione per lo sviluppo di un protocollo condiviso, che consenta in maniera oggettiva di valutare il fattore di disassemblabilità di un edificio in acciaio, al fine di favorire la politica di economia circolare dell'acciaio strutturale, mediante l'adozione di idonei meccanismi di incentivazione per gli operatori economici coinvolti, smussando le barriere che frenano la politica di riutilizzo dei componenti in acciaio strutturale.

Si pone altresì quale strumento da utilizzare in fase di redazione del piano di disassemblaggio e demolizione selettiva, al fine di valutare il raggiungimento delle soglie di base, consentendo, altresì, di quantificare il possibile superamento di tali valori soglia, per la eventuale attribuzione di punteggi premianti, in sede di aggiudicazione dell'appalto.

Futuri sviluppi della ricerca saranno rivolti in primo luogo a valutare la fattibilità tecnica ed economica dei possibili scenari migliorativi di variante strutturale, con particolare riferimento alla sostituzione delle giunzioni (da saldate a bullonate), garantendo di conseguenza l'accessibilità ai giunti mediante l'utilizzo prioritario di profili semplici rispetto a profili tubolari o composti.

I risultati scaturiti dalla ricerca dimostrano altresì che la progettazione sostenibile degli edifici alti in acciaio dovrà considerare la opportunità di parziale o totale sostituzione dei nuclei rigidi in calcestruzzo con strutture stabilizzatrici in acciaio [8,9], al fine di incrementare la percentuale di componentistica da immettere, a fine vita, nel circuito di riutilizzo dell'acciaio strutturale.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dott. Achille Marciano, neo-laureato in Ingegneria Edile-Architettura presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno, per la collaborazione prestata nell'attività di ricerca.

RIFERIMENTI

- [1] Cellura T., Cellura L., Il nuovo manuale dei Criteri Minimi Ambientali in Edilizia, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN) – Italia, 2018.
- [2] Pelin Gurgun A., Komurlu R., Arditi D., Review of the LEED Category in Materials and Resources for Developing Countries, *Procedia Engineering* 118:1145-1152, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.456, December 2015.
- [3] European Commission : Research Fund for Coal and Steel PROVISIONS FOR A GREATER REUSE OF STEEL STRUCTURES (PROGRESS) - Rapporto finale Direzione Generale Ricerca e Innovazione (VTT Technical Research Centre of Finland / The Steel Construction Institute, United Kingdom / Ruukki Construction, Helsinki / RWTH Aachen University, Germany / Universitatea Politehnica Timișoara / European Convention for Constructional Steelwork, Brussels / Paul Kamrath Ingenieurrückbau, Dortmund.
- [4] VDI 2243: Recycling-oriented product development - VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, 2002
- [5] DGNB certification system, available from: <https://www.dgnb.de/de/>
- [6] Finzi B., Rossini L., Ganza M., Il Grattaciolo “Torre Intesa Sanpaolo” di Torino: il ruolo della direzione lavori in una grande opera a struttura mista acciaio e calcestruzzo armato, *Atti del XXIV Congresso C.T.A.*, pp. 1070-1077, Torino 30 settembre – 2 ottobre 2013.
- [7] Finzi B., Rossini L., Il grattaciolo della Banca Intesa Sanpaolo a Torino: il modello BIM strutturale ..., *Atti del XXV Congresso C.T.A.*, pp. 935-942, Salerno 1-3 ottobre 2015.
- [8] Nigro E., Le strutture composte acciaio-calcestruzzo per gli edifici alti, 64° Convegno ATE “Edifici alti: l’approccio progettuale moderno ed esperienze italiane”, Politecnico di Milano, 12 giugno 2008.
- [9] Alhaddad W., Halabi Y., Xu H., Lei H.G., Outrigger and Belt-Truss System Design for High-Rise Buildings: A Comprehensive Review Part II-Guideline for Optimum Topology and Size Design, *HINDAWI*, February 2020, *Advances in Civil Engineering* 2020(6).

KEYWORDS

Economia circolare, decarbonizzazione, decostruzione, disassemblaggio, riuso, zero rifiuti, acciaio strutturale