

Sostenibilità delle costruzioni a pochi e a molti piani realizzate con calcestruzzi normali e ad alta resistenza

Oggi giorno la riduzione delle emissioni di gas serra rappresenta una delle sfide più ardue per l'umanità.

Gli sforzi necessari per vincere tale sfida devono coinvolgere l'intero settore industriale, responsabile del 25% dell'emissione globale di anidride carbonica, e anche gli impianti di produzione del cemento, responsabili per circa il 7% dell'emissione globale di anidride carbonica.

Per quanto attiene l'industria del cemento il 95% dell'anidride carbonica è emessa durante il processo produttivo, mentre solamente il restante 5% è legata al trasporto della materia prima e del prodotto finito.

Un altro dato interessante riguarda le proporzioni fra le emissioni di CO₂ durante la cottura delle materie prime (calcare e argilla) per la realizzazione del prodotto finale (clinker), infatti, quasi il 74% dell'anidride carbonica emessa è dovuta alla decarbonatazione del calcare, mentre il restante 26% circa è dovuto all'utilizzo del carbone o altri combustibili fossili per la cottura. Ne consegue che, accanto a strategie indirizzate verso la sostituzione dei combustibili fossili con fonti di energia alternative a ridotto impatto ambientale, sia necessario adottare soluzioni che riducano l'impatto ambientale per volume unitario di cemento prodotto e il quantitativo di calcestruzzo da impiegare per un dato processo costruttivo.

La riduzione dell'impatto ambientale per volume unitario di cemento prodotto avviene tramite il ricorso a materiali a zero (o a ridotte) emissioni di anidride carbonica come alternativa al clinker, il contenimento del volume di calcestruzzo necessario per la realizzazione di un manufatto si ottiene invece confezionando materiali ad alte prestazioni meccaniche.

In questo articolo si descrive il lavoro di tesi di Oscar Mancinelli al Politecnico di Torino e si adotta la cosiddetta "performance strategy", cioè il decremento delle emissioni di CO₂ dovuto alla riduzione del materiale strutturale necessario per la realizzazione di un'opera, ottenuto attraverso l'utilizzo di calcestruzzi più performanti. Bisogna però premettere che a calcestruzzi con prestazioni meccaniche migliori corrispondono maggiori emissioni di anidride carbonica durante la produzione, pertanto, l'eventuale riduzione del materiale strutturale potrebbe non essere sempre sufficiente a compensare l'incremento delle emissioni di CO₂ relative alle classi di calcestruzzo superiori.

Con il presente articolo si vuole dunque indagare in quali circostanze la strategia che prevede la riduzione delle emissioni con l'utilizzo di calcestruzzi maggiormente performanti risulta efficace e in quale misura; in particolare, tale problematica è affrontata con riferimento agli edifici alti e bassi in cemento armato.

Si vuole rispondere, quindi, a due specifiche domande:

- Le strutture in calcestruzzo armato di edifici a molti piani sono più sostenibile di quelle relative agli edifici bassi?
- Il calcestruzzo ad alta resistenza meccanica è più sostenibile di quello normale sia negli edifici bassi che in quelli a molti piani?

Lo studio condotto per rispondere a tali quesiti, inizia con l'individuazione di 3 edifici esistenti in calcestruzzo armato di 14, 30 e 60 piani e nella successiva ricostruzione del modello computazionale delle relative strutture portanti con il software di calcolo agli elementi finiti DOLMEN, prodotto e distribuito da CDM DOLMEN (Figura 1). Sono state successivamente condotte le verifiche strutturali dei tre modelli con 4 differenti classi di calcestruzzo ed estrapolate le rispettive quantità di materiale strutturale (calcestruzzo e acciaio d'armatura) necessarie al soddisfacimento dei requisiti statici e dinamici. Tali quantitativi sono stati

infine moltiplicati per le emissioni unitarie di CO₂ dei relativi materiali e, tramite il confronto tra i dati, sono state formulate le opportune conclusioni.

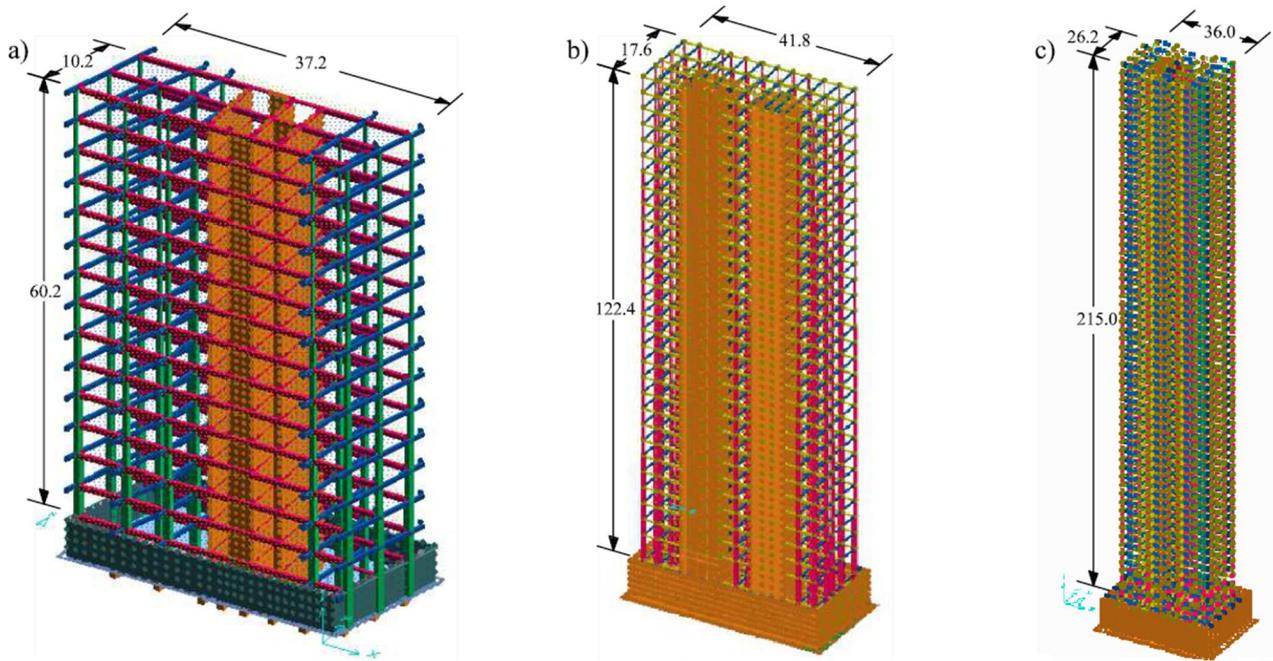


Figura 1 - I modelli FEM, creati con il software DOLMEN dei tre edifici esistenti

Come noto, nel mercato edilizio esistono diversi tipi di calcestruzzo, classificati in base alle proprie resistenze meccaniche; nel presente lavoro, si considerano 4 differenti classi di calcestruzzo: C25/30, C40/50, C60/75 e C80/95, non considerando la composizione dei 4 calcestruzzi esaminati, tralasciando quindi lo studio del mix-design che consente lo sviluppo di differenti resistenze meccaniche. Si riportano in Figura 2 le caratteristiche meccaniche in termini di funzione σ - ϵ relative alle 4 classi di calcestruzzo esaminate (diagramma parabola-rettangolo "a") e all'acciaio di armatura (diagramma trilineare "b"), secondo quanto indicato dall'Eurocodice 2.

Per quanto riguarda le prestazioni ambientali delle quattro classi di calcestruzzo e dell'acciaio d'armatura, si considera unicamente la quantità di CO₂ emessa nella sola fase produttiva del materiale e non durante l'intera LCA (Life Cycle Assessment). Questi dati, riportati in Tabella 1, sono estrapolati dalle analisi del carbon footprint eseguite da Purnell.

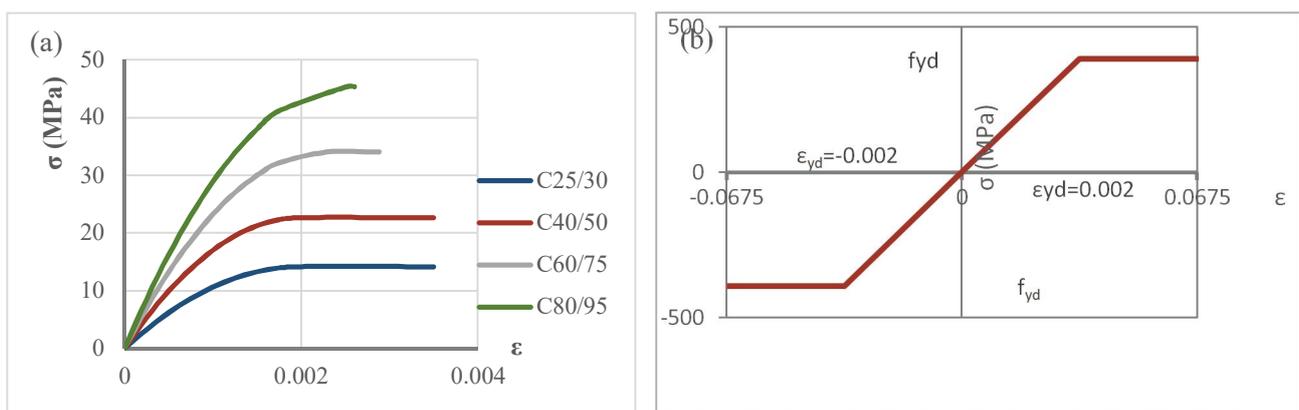


Figura 2 - Diagrammi σ - ϵ relativi alle quattro classi di calcestruzzo (a) e all'acciaio di armatura B450 (b) come indicato dall'EC2

CO ₂ unitaria [kg/m ³]				CO ₂ unitaria [kg/kg]
C25/30	C40/50	C60/75	C80/95	Acciaio per armatura
215	272	350	394	1.38

Tabella 1 - Proprietà ambientali dei calcestruzzi e dell'acciaio d'armatura utilizzati

È importante sottolineare come le quantità unitarie di CO₂ dovute alla produzione di calcestruzzo riportate in Tabella 1 siano in linea con la seguente relazione empirica proposta da Habert e Roussel:

$$kg \text{ of } CO_2 \text{ per cubic meter of concrete} = \delta \sqrt{\text{Class of concrete}}$$

in cui sono posti in relazione la classe del calcestruzzo con la relativa massa di anidride carbonica emessa durante il suo processo di produzione. Nell'Equazione, riportata in Figura 3, δ è una costante che assume un valore pari a $46.5 \text{ kg}_{CO_2}/\sqrt{\text{MPa}}$.

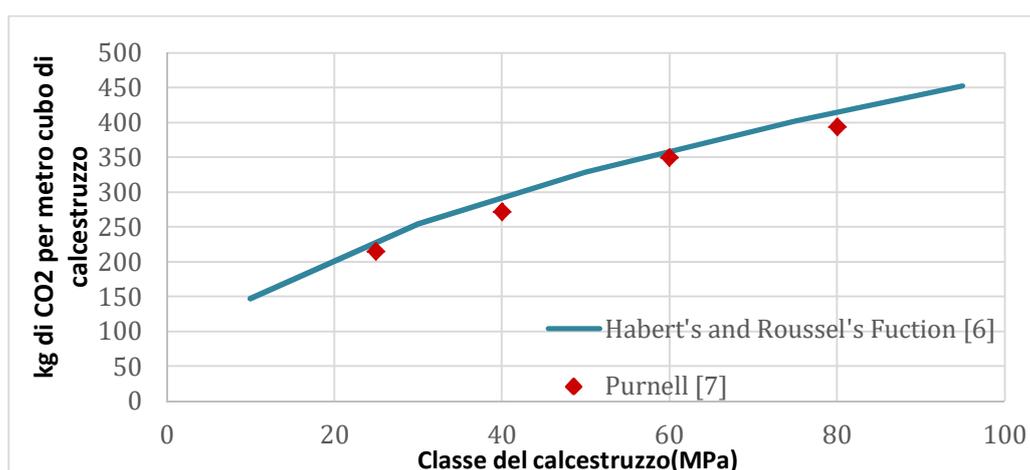


Figura 3 - Confronto tra la relazione di Habert e Roussel e i dati sperimentali misurati da Purnell

Dal grafico si osserva che solo una riduzione del volume di calcestruzzo e di acciaio d'armatura possa vincere l'aumento dell'anidride carbonica necessaria per la produzione dei calcestruzzi con classe di resistenza maggiore.

Per definire in modo realistico le strutture degli edifici da analizzare, è stata condotta una ricerca su edifici esistenti di 14, 30 e 60 piani, con struttura in calcestruzzo armato e superficie in pianta il più possibile simile tra loro. Per rendere confrontabili fra loro i risultati ottenuti, si è scelta una superficie di riferimento di $800 \text{ m}^2 \pm 200 \text{ m}^2$, poiché non è possibile avere edifici con una così elevata escursione del numero di piani ma con stessa superficie; si è cercata un'affinità con i seguenti edifici:

- Il Roy e Diana Vagelos Education Center, edificio universitario di 14 piani con superficie utile pari a $S_u = 8250 \text{ m}^2$, sito in New York (USA);
- la Bank Boston Headquarters, edificio di 30 piani adibito a uffici con superficie utile $S_u = 24420 \text{ m}^2$, sito in San Paolo (Brasile);
- l'Elysian Hotel and Private Residences, edificio alberghiero e residenziale di 60 piani con superficie utile $S_u = 56320 \text{ m}^2$, sito a Chicago (USA).

Alla sezione di ogni elemento strutturale (travi, pilastri, setti, etc.) sono state attribuite delle dimensioni iniziali (predimensionamento) seguendo le prescrizioni minime indicate dall'Eurocodice 2; in seguito, sono state condotte le analisi statiche e dinamiche della struttura per ricavare il quadro sollecitativo globale. Note le sollecitazioni, sono state calcolate le armature di tutti gli elementi strutturali e condotte le verifiche

agli SLU e agli SLE, in accordo con l'Eurocodice 2. Si precisa che gli edifici sono stati analizzati supponendo la loro realizzazione in zona a bassa sismicità (rappresentativa di tutta l'Europa centrale), utilizzando lo spettro di risposta di Torino (Italy). Ovviamente, allorché le verifiche non risultassero soddisfatte a causa del sottodimensionamento degli elementi strutturali, si procedeva all'aumento delle dimensioni delle sezioni, ripetendo il procedimento sopra esposto. Procedura analoga è stata eseguita nel caso di sovradimensionamento degli elementi, provvedendo alla riduzione delle dimensioni delle sezioni. A partire dal FEM di ogni singolo edificio il procedimento di assegnazione delle dimensioni delle sezioni, di analisi e di verifica è stato ripetuto per le 4 classi di resistenza di calcestruzzo. Queste operazioni sono state agevolate grazie all'utilizzo del software di calcolo DOLMEN.

A titolo di esempio, in Figura 4 è rappresentata la variazione della sezione e dell'armatura della medesima trave in base al tipo di calcestruzzo considerato, e, come si può osservare, muovendosi verso calcestruzzi più performanti, le dimensioni delle sezioni diminuiscono e, di conseguenza, anche i volumi di calcestruzzo e di acciaio da utilizzare.

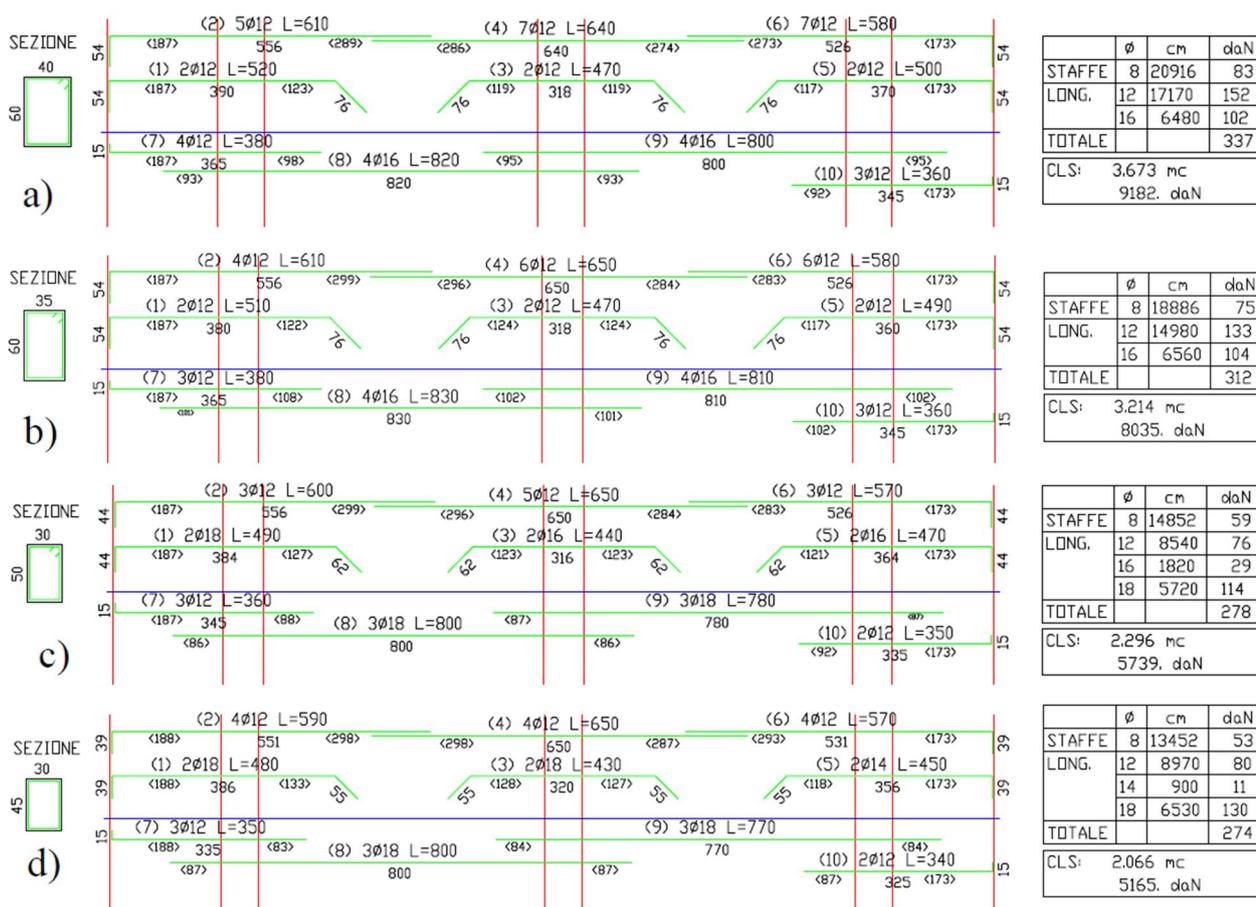


Figura 4 - Trave del solaio tipo dell'edificio di 14 piani, nel caso di calcestruzzo: a) C25/30; b) C40/50; c) C60/75; d) C80/95

La Tabella 2 riporta il computo totale del materiale strutturale (calcestruzzo e acciaio d'armatura) calcolato per i 3 edifici nei 4 casi. Come prevedibile, all'incremento della classe di resistenza del calcestruzzo, corrisponde sempre una riduzione dei due materiali strutturali per lo stesso tipo di struttura. Tuttavia, per ottenere i livelli di emissione di anidride carbonica relativa alla produzione dei materiali impiegati e quindi valutare la sostenibilità delle tre strutture nei 4 casi studiati, è necessario moltiplicare tali quantità per i valori di emissioni caratteristici indicati nella Tabella 1.

N° Piani	Area utile [m ²]	C25/30		C40/50		C60/75		C80/95	
		CLS [m ³ · 10 ³]	Acciaio [kg · 10 ³]	CLS [m ³ · 10 ³]	Acciaio [kg · 10 ³]	CLS [m ³ · 10 ³]	Acciaio [kg · 10 ³]	CLS [m ³ · 10 ³]	Acciaio [kg · 10 ³]
14	8250	4.70	443.46	4.41	428	3.96	391.12	3.67	349.06
30	24420	18.80	2419.03	16.73	2135	14.18	1717.89	11.79	1428.31
60	56320	30.42	7211.14	24.30	4721.30	19.00	3746.38	15.98	3424.34

Tabella 2 - Ammontare dei materiali strutturali (calcestruzzo e acciaio) calcolati per i 3 edifici con le 4 classi di calcestruzzo

I valori di emissioni globali così ottenuti sono riportati nei grafici riepilogativi di Figura 5.

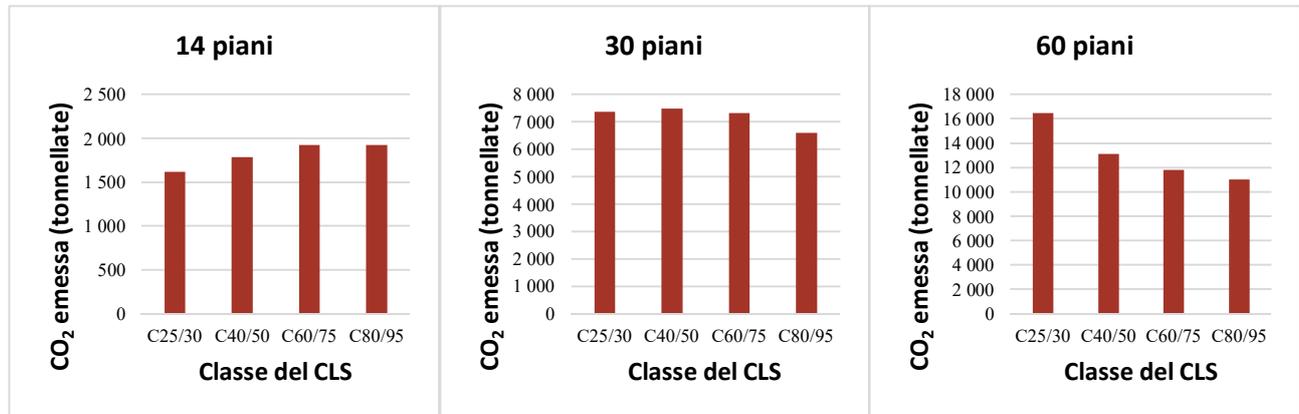


Figura 5 - Carbon footprint dei materiali da costruzione delle tre strutture analizzate con le quattro classi di resistenza

I grafici di Figura 5 evidenziano le seguenti tre linee di tendenza:

- Nell'edificio di 14 piani, muovendosi verso classi di calcestruzzo più performanti, si riscontra un progressivo aumento delle emissioni di anidride carbonica.
- Nell'edificio di 60 piani si osserva una progressiva riduzione delle emissioni di anidride carbonica muovendosi verso le classi di calcestruzzo maggiori, molto marcata tra le prime due classi.
- Nell'edificio di 30 piani si osserva dapprima un incremento delle emissioni passando dalla prima alla seconda classe di resistenza e successivamente una riduzione di tali emissioni passando dalla seconda alla terza e, in maniera più accentuata, dalla terza alla quarta classe di resistenza.

La progressiva inversione di tendenza che si osserva muovendosi da un edificio a pochi piani verso un altro più alto, è dovuta al fatto che, nell'edificio di 14 piani, molti degli elementi strutturali soddisfano le verifiche strutturali con le dimensioni minime prescritte dalla normativa già con le classi di calcestruzzo ordinarie. Per tali elementi, la scelta di utilizzare classi di calcestruzzo più performanti consente al più di avere un piccolo risparmio di acciaio d'armatura e tale modesto decremento di materiale strutturale non è sufficiente a compensare l'incremento delle emissioni dovuto al maggiore carbon footprint del calcestruzzo ad alta resistenza (vedi Figura 2).

Al contrario, nell'edificio di 60 piani si ha un notevole numero di elementi strutturali con dimensioni maggiori di quelle minime, soprattutto nelle classi di calcestruzzo inferiori. In questo caso, la strategia che prevede l'utilizzo di calcestruzzi più performanti allo scopo di ridurre le emissioni risulta decisamente più efficace perché consente una netta riduzione del volume di calcestruzzo.

Nell'edificio di 30 piani, invece, si ha una prevalenza di elementi strutturali con dimensioni maggiori a quelle minime, ma in proporzione ridotta rispetto all'edificio di 60 piani. Ne consegue che, con il

progressivo aumento della resistenza del calcestruzzo, si ha dapprima un incremento delle emissioni, e successivamente una loro riduzione.

Per rendere confrontabili le emissioni dei tre diversi edifici, si è reso necessario introdurre una nuova *functional unit*, ossia la superficie utile dei tre edifici. In tal modo, è possibile ottenere l'impatto unitario IU, cioè il quantitativo di CO₂ emesso per ogni m² di superficie utilizzabile, di ogni edificio. Tale valore, ottenuto dividendo la CO₂ totale di ciascun edificio per la superficie totale riportata nella Tabella 2, è rappresentato in Figura 6 per ognuna delle classi di calcestruzzo.

Dalla Figura 6 è possibile osservare quanto segue:

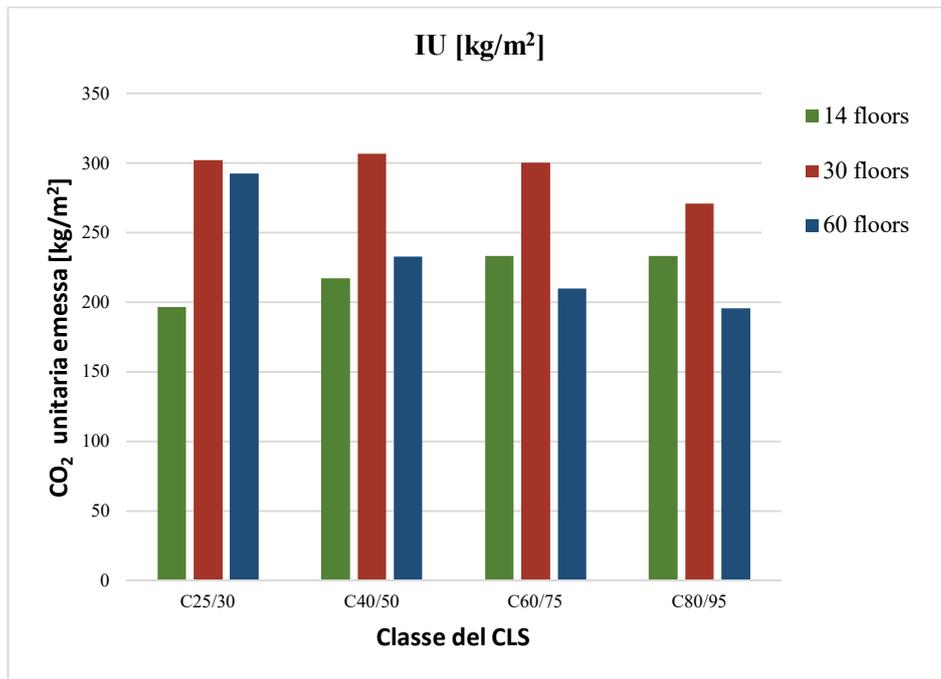


Figura 6 - Impatto ambientale unitario delle tre strutture con le quattro classi di calcestruzzo

- Per calcestruzzi ordinari (classe C25/30) l'IU minore si ha negli edifici a pochi piani (14 piani).
- Per calcestruzzi ad alta resistenza (classe C80/95) l'IU minore si ha negli edifici a molti piani.
- L'edificio di 14 piani costruito con CLS di classe C25/30 ha un IU molto simile all'edificio di 60 piani realizzato con CLS di classe C80/95.
- L'edificio di 30 piani mostra l'IU maggiore per tutti i quattro tipi di calcestruzzo, anche se si osserva una tendenza alla diminuzione per classi di calcestruzzo più elevate.

Si può concludere che:

- Negli edifici a pochi piani (14) è possibile ottenere un ridotto impatto ambientale utilizzando calcestruzzi ordinari (e.g C25/30).
- Al contrario, negli edifici a molti piani (60) è possibile ottenere un ridotto impatto ambientale utilizzando calcestruzzi ad alta resistenza meccanica.

Ne consegue che l'applicazione della performance strategy per ridurre l'impatto ambientale delle strutture in calcestruzzo è efficace solamente negli edifici a molti piani, laddove cioè la riduzione delle sezioni degli elementi strutturali consente di diminuire significativamente il volume di materiale strutturale impiegato. Solo in questi edifici, tale riduzione supera l'incremento delle emissioni unitarie che si osserva con l'aumento della classe di calcestruzzo.