

---

## **X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA 2016**

### **Life Cycle Thinking, sostenibilità ed economia circolare**

**Ravenna  
23 - 24 giugno 2016**

---

**a cura di Arianna Dominici Loprieno, Simona Scalbi, Serena Righi**



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
CAMPUS DI RAVENNA



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Atti del X Convegno della Rete Italiana LCA 2016  
Life Cycle Thinking, sostenibilità ed economia circolare  
Ravenna - 23-24 giugno 2016

*A cura di Arianna Dominici Loprieno, Simona Scalbi, Serena Righi*

*Grafica del volume a cura di Sara Ganassali, Anna Dalla Valle e Paola Sposato*

ISBN: 978-88-8286-333-3

ENEA – Servizio Promozione e Comunicazione  
Revisione editoriale: Giuliano Ghisu  
Copertina: Cristina Lanari  
Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA – Frascati  
Giugno 2016

# Effetti del rischio sismico sulla sostenibilità ambientale degli interventi di recupero energetico

Andrea Belleri<sup>1</sup>, Alessandra Marini<sup>1</sup>, Marco Santicoli<sup>2</sup>, Nicola Bettini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Bergamo

<sup>2</sup>Di.Mo.Re. srl, Spin-off accademico dell'Università di Bergamo

Email: [andrea.belleri@unibg.it](mailto:andrea.belleri@unibg.it)

## Abstract

*Il settore delle costruzioni impatta in modo significativo sull'ambiente in ogni fase del ciclo di vita degli edifici. La necessaria transizione verso una società low-carbon ha comportato una crescente attenzione verso la ristrutturazione di edifici esistenti, incentivando in particolare l'efficientamento degli involucri, l'utilizzo di fonti rinnovabili di energia e di materiali eco-compatibili. Tuttavia, in aree geografiche in cui la pericolosità sismica è significativa, la vulnerabilità degli edifici esistenti, non progettati secondo moderni criteri antisismici, potrebbe ridurre l'efficacia del solo efficientamento energetico, oltre a rappresentare un pericolo per la sicurezza. Nel presente lavoro è indagata l'influenza di possibili eventi sismici sulla valutazione dell'impatto ambientale degli edifici, in particolare attraverso la valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>-eq associate agli interventi di riparazione a seguito di un terremoto. Tramite l'applicazione a un caso di studio, viene proposta la valutazione comparativa della effettiva riduzione dell'impatto ambientale nel caso di solo efficientamento energetico oppure in caso di contestuale rinforzo strutturale.*

## 1. Introduzione

La necessità di riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, finalizzata al miglioramento delle prestazioni energetiche e del comfort dell'edificio, rappresenta un'occasione per promuovere la reale transizione verso una società low-carbon. Circa il 50% degli edifici che necessita di lavori di ristrutturazione è stato costruito dopo la seconda guerra mondiale, per soddisfare rapidamente la pressante domanda di abitazioni durante la ricostruzione post-bellica. Questi edifici sono in genere multipiano con struttura portante costituita da telai in cemento armato. Si tratta di edifici di modesta qualità architettonica, spesso costruiti in assenza di pianificazione urbana; edifici caratterizzati da un elevato consumo energetico, principalmente associato al riscaldamento e al raffrescamento degli spazi abitativi, dovuto principalmente alle scarse proprietà di isolamento termico degli involucri e all'obsolescenza degli impianti. La riqualificazione sostenibile di tali edifici è tipicamente affrontata con misure in grado di ridurre il consumo energetico legato all'utilizzo dell'edificio e utilizzando materiali eco-sostenibili, senza tener conto delle carenze strutturali che tuttavia, qualora fossero rese manifeste da eventi eccezionali, quali un sisma, potrebbero vanificare l'efficacia dell'investimento. Tale eventualità è tanto più evidente nelle zone ad elevato rischio sismico.

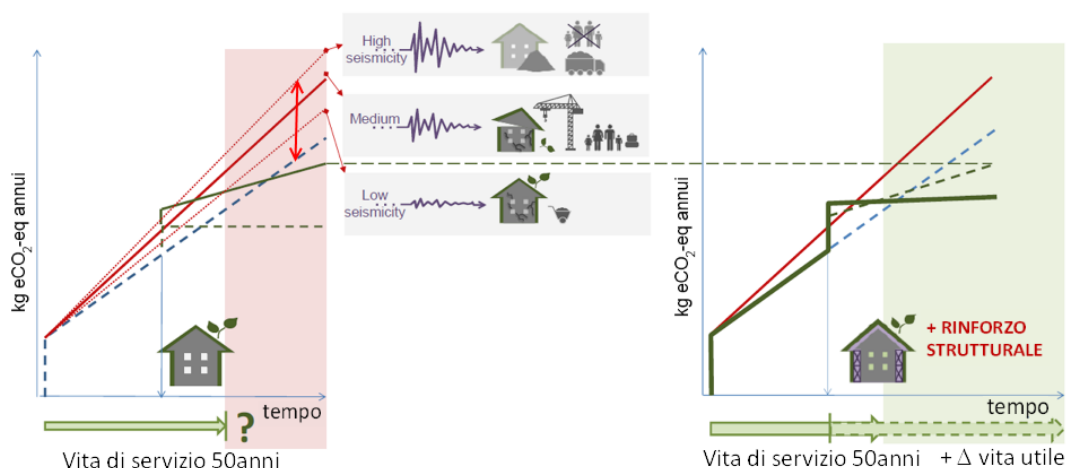


Figura 1: Influenza della vulnerabilità sismica sulle variabili ambientali

Si osserva come l'influenza del rischio sismico nella valutazione dell'impatto ambientale di interventi di riqualificazione energetica non sia stata ancora indagata in modo approfondito.

A tal riguardo si osservi la Figura 1, dove il carbon-footprint è espresso in funzione della vita dell'edificio, a partire dalla sua realizzazione. Allo stato di fatto, tale valore è rappresentato dalla linea blu tratteggiata, che mostra in modo schematico l'embodied carbon equivalente accumulato in fase di costruzione, cui si somma nel tempo il CO<sub>2</sub>-eq dovuto all'operatività. A seguito del possibile intervento di riqualificazione energetica finalizzato alla riduzione dei consumi, e di conseguenza delle emissioni di gas serra, si passa alla linea verde tratteggiata, ipotizzando a scopo illustrativo un intervento che porti a un edificio a energia quasi zero.

Tuttavia tale risparmio è solo virtuale in quanto a seguito di possibili terremoti si andrà a sommare il contributo di carbon-footprint associato agli interventi di riparazione-ricostruzione (linea rossa), che inciderà in maniera tanto più rilevante al crescere dell'intensità dell'evento sismico. Si osserva che il contributo di CO<sub>2</sub>-eq associato al rischio sismico è un valore atteso, in quanto l'evento sismico non può essere previsto in modo deterministico ma solo in termini statistici.

A seguito di queste considerazioni, includendo le perdite attese associate al terremoto, si passa alla linea verde in linea continua, rendendo così evidente la differenza tra impatto ambientale ipotizzato ed effettivamente prodotto (Belleri e Marini, 2016). Si osservi come la linea verde continua, che include gli effetti del terremoto, abbia pendenza inferiore nel caso di intervento con rinforzo strutturale, in quanto a seguito del rinforzo si ha una riduzione delle perdite in caso di possibile sisma e di conseguenza un minore eCO<sub>2</sub>-eq associato agli interventi di riparazione, a scapito però di una produzione di eCO<sub>2</sub>-eq associata alla costruzione dei presidi anti-sismici.

Un altro aspetto rilevante, che incide sull'impatto ambientale dell'edificio, è legato al termine della vita utile nominale, oggi stimata pari a 50 anni per quanto riguarda la parte strutturale di costruzioni ordinarie in assenza di significative opere di riqualificazione programmata (DM 14/01/2008). In questo scenario si evidenzia la necessità di intervenire sull'edificato esistente con soluzioni di riqualificazione integrata, energetica, architettonica e strutturale (Feroldi et al. 2013, Marini et al. 2016).

Tali approcci (Figura 2) si pongono come alternativa più sostenibile alla demolizione-ricostruzione dell'edificio e alla sola riqualificazione energetica e sono caratterizzati da interventi realizzati prevalentemente dall'esterno, in modo di limitare il più possibile l'impatto sui residenti. A differenza di interventi di solo efficientamento energetico, interventi di questo tipo consentono di rilanciare la vita utile dell'edificio.

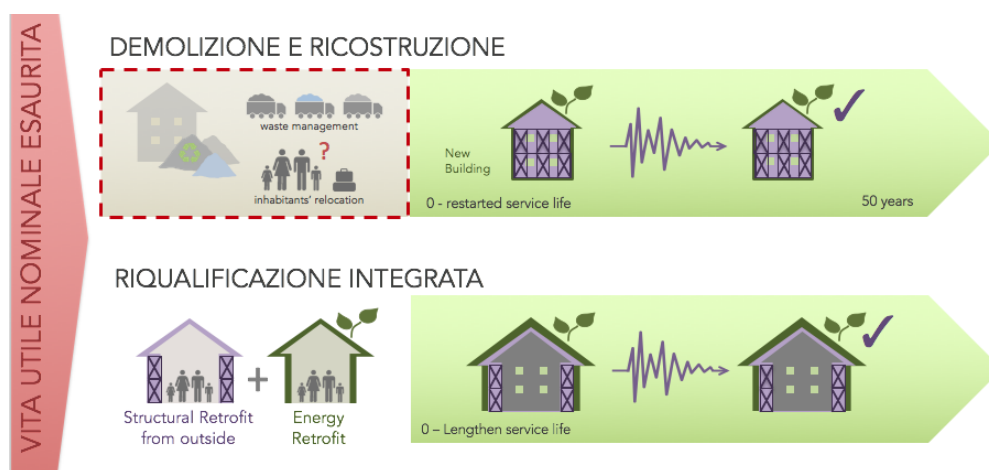


Figura 2: interventi di riqualificazione integrata energetico-strutturale.

Nota: Energy Retrofit – intervento di riqualificazione energetica

Structural Retrofit – intervento di rinforzo strutturale

## 2. Valutazione della sostenibilità ambientale considerando l'influenza di eventi sismici

Una possibile strategia per tenere conto del rischio sismico nella valutazione dell'impatto ambientale di interventi di riqualificazione è l'utilizzo di criteri decisionali combinati quali MIVES acronimo di Model for Integration of Values for Evaluation of Sustainability (San-José e Garrucho, 2010; Pons e Aguado 2012). MIVES è un modello per la valutazione della sostenibilità che consente il confronto di diversi tipi di indicatori, quali ad esempio quello ambientale, economico, estetico e di funzionalità, trasformando ogni indicatore in valori numerici attraverso opportune funzioni, e combinando i valori ottenuti attraverso un sistema che attribuisce pesi alle diverse grandezze.

In questa sede si è optato per l'utilizzo di una metodologia di calcolo mutuata dall'ingegneria sismica.

Il framework considerato è derivato dalla metodologia probabilistica sviluppata al Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, nota come PEER-PBEE. Tale procedura (Gunay e Mosalam, 2013) considera direttamente varie fonti di incertezza e fornisce come risultato la previsione (Figura 3), in termini probabilistici (probabilità di eccedenza  $P$ ), dell'influenza di possibili eventi sismici su un determinato edificio in una data posizione, in termini di una variabile decisionale (DV), tipicamente i costi di riparazione, il periodo di dismissione/mancata operatività dell'edificio e il numero di vittime. L'analisi è disaggregata in 4 fasi: analisi di pericolosità, analisi strutturale, analisi di danno e analisi delle perdite.

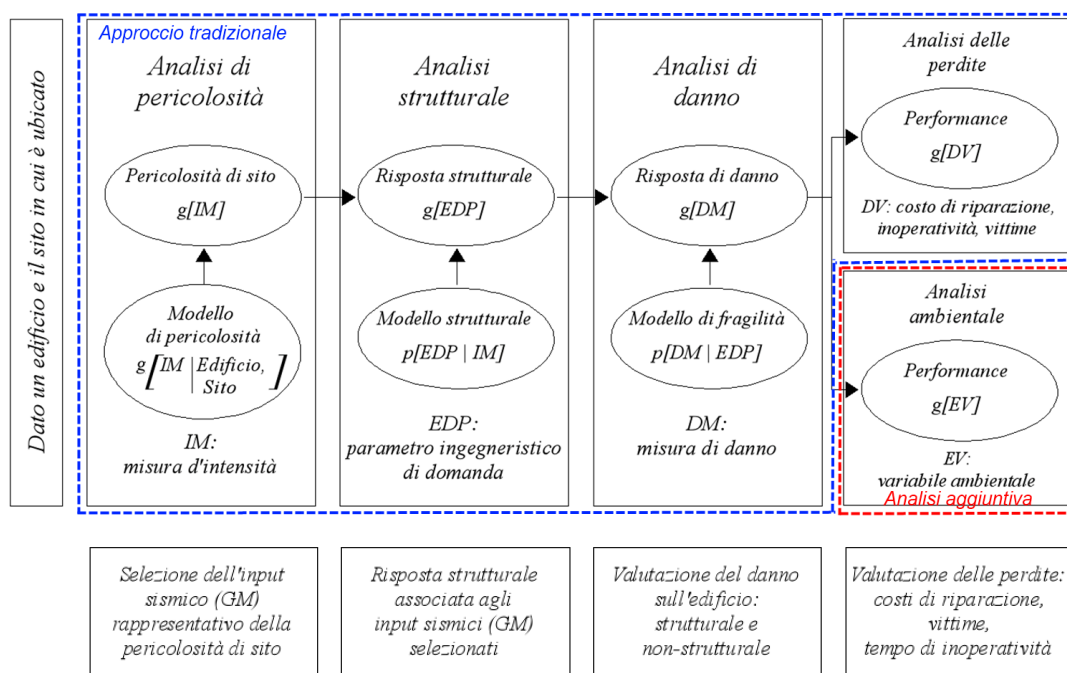


Figura 3: framework probabilistico tipicamente utilizzato nell'ambito dell'ingegneria sismica.

L'analisi ambientale è qui introdotta come ulteriore risultato della procedura.

Nota:  $p[X|Y]$  è la probabilità condizionata di  $X$  dato  $Y$ ;  $g[X]$  è la frequenza di occorrenza di  $X$

Nell'analisi di pericolosità si definisce una curva che tiene conto in particolare del periodo di ritorno dei terremoti (corrispondente al tasso di ricorrenza dei terremoti), della distanza del sito da zone sismogenetiche e delle condizioni locali del suolo. La curva di pericolosità rappresenta la frequenza annua di superamento di un determinato valore di un indicatore chiamato misura di intensità ( $IM$ ).

L'analisi strutturale riguarda la creazione di un modello numerico ad elementi finiti che rappresenta il sistema strutturale dell'edificio considerato. I risultati dell'analisi sono espressi in termini di un parametro ingegneristico di domanda ( $EDP$ ) condizionati all'eccitazione sismica  $p[EDP|IM]$ , dove  $p[X|Y]$  è la probabilità condizionata di  $X$  dato  $Y$ .

L'analisi di danno permette di quantificare il danno di uno o più gruppi di elementi in relazione alla risposta strutturale. Tali gruppi di elementi sono ad esempio i pilastri di un dato piano, le finestre e i tamponamenti. Il livello di danno è espresso da misure di danno (DM) corrispondenti agli interventi di riparazione necessari per ripristinare ogni membro alle sue condizioni originali.

L'analisi delle perdite fornisce la probabilità di superamento di una variabile decisionale (DV), come ad esempio le perdite economiche, l'inattività o il numero di vittime, in funzione delle misure di danno DM ( $P[DV|DM]$ ).

I risultati di ciascuna analisi sono combinati tra loro secondo il teorema della probabilità totale in termini di probabilità di superamento della variabile decisionale (DV):

$$P[DV] = \int \int \int P[DV | DM] p[DM | EDP] p[EDP | IM] p[IM] dIM dEDP dDM$$

Per considerare l'impatto ambientale di un evento sismico (Belleri e Marini, 2016), alla procedura appena descritta si aggiunge un'ulteriore analisi (Figura 3) in cui l'impatto di ogni livello di danno viene valutato in termini di una variabile ambientale, come il carbon-footprint o l'energia immagazzinata, associata agli interventi di riparazione strutturale o non-strutturale necessari.

### 3. Applicazione della procedura a un caso studio

La procedura di valutazione di impatto ambientale associato a eventi sismici è stata applicata a un edificio di riferimento caratterizzato da carenze energetiche e strutturali e ubicato in zona sismica. Il caso studio considerato (Figura 4) è rappresentativo di edifici residenziali con struttura in cemento armato tipici del secondo dopo guerra nel territorio italiano; tali edifici rappresentano circa il 50% del patrimonio edilizio nazionale (Marini et al., 2014). Una possibile soluzione di riqualificazione integrata energetica, architettonica e strutturale è rappresentata da interventi a doppia-pelle strutturale, come proposto in Feroldi et al. (2013) e in Marini et al. (2016).

L'edificio di riferimento è ubicato a Brescia (media sismicità) ed è costituito da tre piani e un seminterrato (pianta rettangolare 27 m x 10 m). L'*embodied carbon equivalente* (eCO<sub>2</sub>-eq) dell'edificio, prima dei lavori di riqualificazione energetica, è valutato pari a 1'180'000 kg, tale valore è derivato dall'assunzione di 1000 kg di eCO<sub>2</sub>-eq per m<sup>2</sup> associato a ogni appartamento (Langdon, 2009). L'edificio è classificato in classe energetica "D", con un consumo annuo di 90 kWh/m<sup>2</sup>, corrispondenti a 72'600 kWh all'anno. Dopo la riqualificazione energetica il consumo annuo è pari a 30 kWh/m<sup>2</sup>, pari a 24'200 kWh all'anno, corrispondente ad una classe energetica "A". Gli interventi di riqualificazione energetica consistono nel cambio dei serramenti, nel rivestimento a cappotto con pannelli di poliuretano e nell'introduzione di pannelli solari e fotovoltaici, con impatti di eCO<sub>2</sub>-eq pari a 28 kg/m<sup>2</sup> per il rivestimento, 126 kg per finestra e 208 kg/m<sup>2</sup> per i pannelli solari (Hammond e Jones, 2008). Le emissioni di CO<sub>2</sub>-eq associate alle condizioni di utilizzo dell'edificio prima e dopo la riqualificazione termica sono rispettivamente pari a 48'444 kg di e CO<sub>2</sub>-eq all'anno.

Questi valori sono basati su un fattore di conversione pari a 0,667 kg di CO<sub>2</sub>-eq per kWh associato al sistema di produzione energetica italiano (Jancovici, 2003) e sono stati ottenuti convertendo in CO<sub>2</sub>-eq l'energia annua stimata attraverso audit energetici con simulazione in regime dinamico (Feroldi 2014).



*Figura 4: Edificio considerato*

La procedura proposta è stata applicata all'edificio di riferimento considerando il danno da terremoto associato agli elementi della struttura portante (pilastri, travi e scale) e agli elementi non strutturali (partizioni interne ed esterne, finestre, copertura e pannelli esterni del cappotto isolante). È stato inoltre considerato il caso di riqualificazione strutturale, in particolare di miglioramento sismico, tramite l'introduzione di setti esterni in cemento armato in grado di ridurre sia la probabilità di collasso dell'edificio sia il danno associato al terremoto. Il valore di eCO<sub>2</sub>-eq associato agli interventi di riparazione è pari a 39'900 kg, corrispondenti a 5'700 kg per ogni setto (Belleri e Marini, 2016).

Il principale risultato dell'analisi è espresso in termini di eCO<sub>2</sub>-eq annuo atteso; il eCO<sub>2</sub>-eq è associato agli interventi di ripristino a seguito di eventi sismici compatibili con la sismicità del sito in cui sorge l'edificio. La vita utile presa come riferimento è 50 anni. Tali risultati possono essere confrontati con il CO<sub>2</sub>-eq associato all'operatività dell'edificio.

In questo modo è possibile valutare l'efficacia nel ridurre le emissioni di anidride carbonica associate alla sola riqualificazione termica. I risultati della procedura sono riportati in forma grafica in Figura 5 considerando varie ubicazioni dell'edificio sul territorio italiano.

Si osserva come, per la tipologia di edificio selezionato, la sola riqualificazione energetica ("Senza Retrofit" in Figura 5) non garantisca la sostenibilità ambientale in aree a medio-alta sismicità, specialmente in assenza di interventi di miglioramento/adeguamento sismico.

In particolare, a valle dell'intervento di efficientamento energetico il rapporto tra eCO<sub>2</sub>-eq atteso associato al rischio sismico e CO<sub>2</sub>-eq legato all'operatività

dell'edificio è pari a 3 % o 25% in funzione che si realizzino o meno contestuali opere di rinforzo strutturale ("Con Retrofit" in Figura 5). Si osserva che l'intervento di riqualificazione strutturale limita i danni a seguito di un terremoto ma non li elimina completamente. È interessante osservare come tale rapporto aumenti fino a 10% e 87% nell'ipotesi di ubicazione dello stesso edificio in una zona ad alta sismicità, quale L'Aquila.

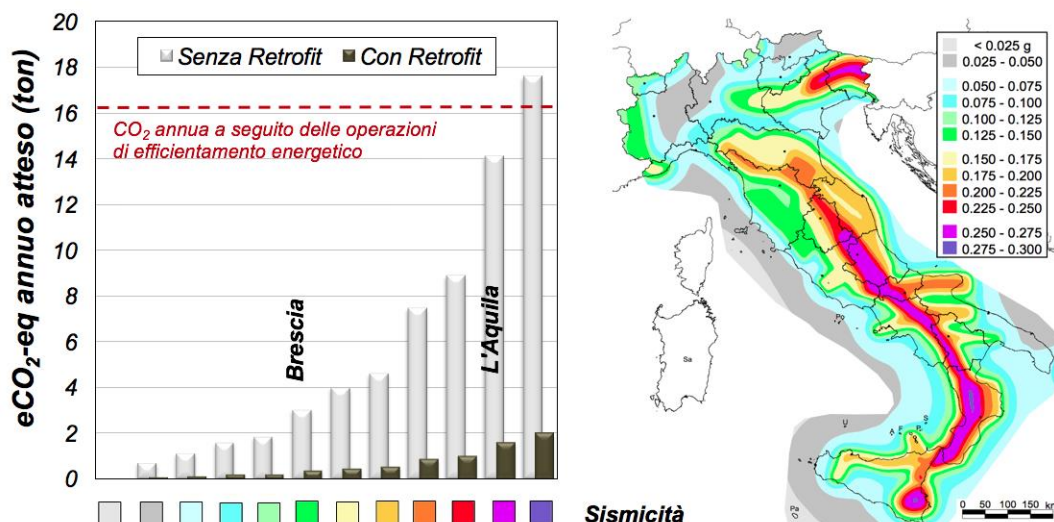


Figura 5: risultati dell'analisi di impatto ambientale in termini di eCO<sub>2</sub>-eq.

*Nota: i risultati si riferiscono all'eCO<sub>2</sub>-eq associato agli interventi di riparazione/ricostruzione a seguito dei danni dovuti a terremoto nel caso di sola riqualificazione energetica ("Senza Retrofit") e con contestuale rinforzo strutturale ("Con Retrofit"). I risultati sono espressi in valori annui attesi considerando una vita utile dell'edificio di 50 anni*

## 4. Conclusioni

La vulnerabilità strutturale degli edifici esistenti può tradursi nel danneggiamento grave o addirittura nel collasso delle costruzioni in caso di eventi sismici. Ciò può compromettere la riduzione dell'impatto ambientale ottenuta con gli interventi di sola riqualificazione energetica, oltre a rappresentare una minaccia per la sicurezza delle persone. A livello distrettuale, ossia considerando un raggruppamento di edifici come ad esempio un quartiere cittadino, trascurare il rischio sismico può portare ad aspettative non realistiche sugli effetti di ampie misure di riqualificazione energetica condotte nell'ambito di interventi di rigenerazione urbana.

A supporto di tale concetto è stata indagata una procedura per la valutazione delle perdite, in termini ambientali, associate al rischio sismico. Tale procedura è stata mutuata da quanto disponibile nell'ambito dell'ingegneria sismica. La procedura è di tipo probabilistico e consente di associare variabili ambientali come l'emissione di gas serra agli interventi di riparazione e/o ricostruzione necessari a seguito di eventi sismici. La procedura è in grado di considerare nello specifico la pericolosità sismica del luogo in cui sorge l'edificio.

Assumendo come variabile ambientale le emissioni di anidride carbonica equivalente (eCO<sub>2</sub>-eq) associate agli interventi di riparazione a seguito di danni causati dal terremoto, il principale risultato dell'analisi è l'eCO<sub>2</sub>-eq annuo atteso associato al rischio sismico. Questi dati possono essere confrontati con le emissioni di anidride carbonica associate all'operatività dell'edificio (CO<sub>2</sub>-eq) al fine di valutare l'efficacia nel ridurre le emissioni di gas serra tramite la sola riqualificazione energetica. Possibili sviluppi della procedura riguardano la sua implementazione in analisi globali per la valutazione del ciclo vita, come ad esempio LCA o LCC.

## 5. Bibliografia

Belleri, A, Marini, A, 2016. Does seismic risk affect the environmental impact of existing buildings? *Energy and Buildings*, 110(1), 149-158

D.M. 14/01/2008, Norme tecniche per le costruzioni.

Feroldi, F, Marini A, Badiani, B, Plizzari, G, Giuriani, E, Riva, P, Belleri, A, 2013. Energy efficiency upgrading, architectural restyling and structural retrofit of modern buildings by means of “engineered” double skin façade. *Structures and Architecture New concepts, applications and challenges*, Edited by Paulo JS Cruz, CRC Press 2013, 1859–1866. Doi:10.1201/b15267-253

Feroldi, F. (2014). Sustainable renewal of the post WWII building stock through engineered double skin, allowing for structural retrofit, energy efficiency upgrade, architectural restyling and urban regeneration (PhD Thesis), University of Brescia.

Günay, S, Mosalam, KM, 2013. PEER Performance-Based Earthquake Engineering Methodology, Revisited. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(6), 829-858.

Hammond, GP, Jones, CI, (2008). Embodied energy and carbon in construction materials, *Proc. Inst. Civ. Eng.—Energy* 161(2), 87–98.

Jancovici, JM, 2003. Doing one’s “good deed” regarding climate change: what is the impact of individual actions? ([http://www.manicore.com/anglais/documentation\\_a/greenhouse/individual\\_acts.html](http://www.manicore.com/anglais/documentation_a/greenhouse/individual_acts.html)).

Langdon, D (2009). Embodied CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from new buildings and the impact of possible changes to the energy standards. <http://www.scotland.gov.uk/Topics/Built-Environment/Building/Building-standards/publications/pubresearch/researchenergy>

Marini, A, Belleri, A, Passoni, C, Feroldi, F, Preti, M, Metelli, G, Giuriani, E, Riva, P, Plizzari, G, 2016. Integrated architectural, energy and seismic renovation of the reinforced concrete building stock targeting sustainability and resilience. Submitted to *Journal of Civil and Environmental Engineering*

Marini, A, Passoni, C, Riva, P, Negro, P, Romano, E, Taucer, F, 2014. Technology options for earthquake resistant, eco-efficient buildings in Europe: Research needs. Report EUR 26497 EN. JRC87425. ISBN 978-92-79-35424-3.

Pons, O, Aguado, A, 2012. Integrated value model for sustainable assessment applied to technologies used to build schools in Catalonia, Spain. *Building and Environment*, 53, 49-58.

San-José, JT, Garrucho, I, 2010. A system approach to the environmental analysis of industrial buildings. *Building and Environment*, 45(3), 673-683.