

# Proposal of a multicriteria decision-making approach for the choice between refurbishing or reconstructing an existing building

Pierfrancesco Fiore\*, Giuseppe Donnarumma

---

## Highlights

State of the art on the recovery or demolition and reconstruction of existing buildings.  
Proposal of a multicriteria decision-making methodology for the choice of the most appropriate intervention.  
Verification of the method on a case-study of a school building.

---

## Abstract

The choice to refurbish or demolish/rebuild a building requires the analysis of numerous aspects. This paper highlights the role of the main factors involved and describes the methodological approach adopted, based on a multi-criteria analysis, for the definition of a decision support index. The final part presents the results of applying the methodology to a case-study of a school building, representative of a category of buildings with recurring typological and constructive characteristics.

---

## Keywords

Existing Buildings, Refurbishment, Demolition, Reconstruction, Decision-Making Strategy

---

## 1. INTRODUCTION

A substantial part of the European property patrimony consists of buildings that were built after the Second World War and are now over 50 years old [1]. In Italy, almost half of the buildings were built in the period 1946 – 1991, with most of them dating back to the 1960 – 70s [2]. The structure of these buildings is generally made of reinforced concrete (RC), often used in the absence of any modern anti-seismic criteria, while also lacking any form of energy efficiency and indoor comfort. In recent decades, European and national policies have encouraged not only a number of interventions for the redevelopment of buildings aimed at reducing energy consumption and polluting emissions but also strategies for rationalizing the use of

### **Pierfrancesco Fiore**

*DICIV - Dipartimento di  
Ingegneria Civile, Università di  
Salerno, via Giovanni Paolo II  
132, Salerno, 84084, Italia*

### **Giuseppe Donnarumma**

*DICIV - Dipartimento di  
Ingegneria Civile, Università di  
Salerno, via Giovanni Paolo II  
132, Salerno, 84084, Italia*

\* Corresponding author  
Tel.: +39-089964127;  
Fax: +39-089968731,  
e-mail: pfiore@unisa.it

resources through the use of renewable energy sources, the limiting of soil consumption of new constructions and the reusing of abandoned buildings. At the same time, in countries with medium-high seismicity such as Italy, recent earthquakes have highlighted a structural vulnerability, with a large part of the buildings being significantly damaged, whereas those buildings that have been reinforced according to modern technical standards [3] presented good behaviour under seismic conditions. The seismic prevention strategy in Italy, among other things, has recently provided significant tax breaks for anyone voluntarily participating in the classification and mitigation of the seismic risk of buildings [4]. In this context, the choice between refurbishing the existing building and demolishing it, subsequently rebuilding it, requires numerous aspects to be analysed. In the second paragraph, in the light of recent studies, the role of the main factors involved in the decision-making process is highlighted. The methodological approach adopted for the definition of a decision support index is described in the third paragraph. Finally, the results obtained from applying the methodology to the case-study of a school built at the end of the 1960s, representative, due to its typological and constructive characteristics, of a good part of the school buildings in Italy at that time, are presented.

## 2. STATE OF THE ART: REFURBISHMENT VS. DEMOLITION/RECONSTRUCTION

Excluding from this study the case of buildings of historical-architectural interest or those subject to protection constraints, the main factors that generally influence the comparison between alternatives of intervention on an existing building are: structural safety, energy efficiency, environmental impact and costs.

Structural reinforcement presents greater complexity when compared to the realising a completely new project for a number of reasons: often limited knowledge of the structure, presence of the effects of past earthquakes or other accidental actions that are not sufficiently evident as well as errors and/or negligence that occurred during the construction phase. The extent of any reinforcement intervention is linked to the current state of deterioration/damage, the degree of seismic vulnerability of the building and the level of structural safety that is intended to be achieved in compliance with the requirements imposed by current technical standards.

Regarding the energy aspects, while on the one hand, new buildings must meet high performance standards, European and national policies continue

### 1. INTRODUZIONE

*Una parte consistente dell'intero patrimonio immobiliare europeo è costituita da edifici con un'età di oltre 50 anni, costruiti dopo la Seconda Guerra Mondiale [1]. In Italia quasi la metà del patrimonio edilizio è stata costruita nel periodo 1946-1991, di cui la maggior parte risale agli anni '60 e '70 [2]. Questi edifici presentano generalmente una struttura portante intelaiata in c.a. concepita in assenza dei moderni criteri antisismici e sono carenti dal punto di vista dell'efficienza energetica e del confort indoor. Negli ultimi decenni le politiche europee e nazionali hanno incentivato sia numerose azioni di riqualificazione edilizia tese a ridurre i consumi energetici e le emissioni inquinanti, sia strategie di razionalizzazione nell'uso delle risorse attraverso l'impiego di fonti energetiche rinnovabili, la limitazione dei consumi di suolo per nuova edificazione, il riuso di edifici dismessi. Al contempo, in paesi a medio-alta sismicità come l'Italia, i terremoti degli ultimi anni hanno palesato la vulnerabilità strutturale di un'ampia parte del costruito che ha riportato rilevanti danni, mentre gli edifici rinforzati secondo le moderne normative tecniche [3] hanno esibito un buon comportamento sotto azioni sismiche. La strategia della prevenzione sismica in Italia ha recentemente previsto forti agevolazioni fiscali a tutti i cittadini che partecipano ad un piano volontario di classificazione e mitigazione del rischio sismico delle costruzioni [4]. Nel contesto descritto la scelta tra recupero dell'esistente e demolizione con ricostruzione richiede l'analisi di numerosi aspetti. Nel paragrafo secondo, alla luce delle recenti ricerche, viene evidenziato il ruolo dei principali fattori coinvolti nel processo decisionale. Al paragrafo terzo viene descritto l'approccio metodologico adottato per la definizione di un indice di supporto decisionale. Sono infine illustrati i risultati derivanti dall'applicazione della metodologia al caso di un edificio scolastico realizzato alla fine degli anni '60, rappresentativo, per caratteristiche tipologiche e costruttive, di una buona parte dell'edilizia scolastica diffusa in Italia in quel periodo.*

### 2. STATO DELL'ARTE: RECUPERO VS. DEMOLIZIONE/ RICOSTRUZIONE

*Escludendo da questa trattazione il caso di edifici di interesse storico-architettonico o comunque soggetti a vincoli di tutela, generalmente i principali fattori che condizionano il confronto tra alternative di intervento su un edificio esistente sono: la sicurezza strutturale, l'efficienza energetica, l'impatto ambientale, i costi.*

*Il rinforzo strutturale presenta una maggiore complessità rispetto alla progettazione ex-novo per una serie di ragioni: conoscenza spesso limitata della struttura, presenza non sufficientemente manifesta di effetti di terremoti passati o di altre azioni accidentali o ancora di errori e/o di negligenze avvenute in fase di realizzazione. L'entità degli interventi di rinforzo è legata allo stato attuale di degrado/danno, al grado di*

to promote energy efficiency measures of existing buildings, urging the increased use of renewable energy sources. Belleri and Marini [5] have shown how, especially in areas of medium to high seismicity, integrated approaches to energy redevelopment and structural improvement can be more sustainable than the alternatives of demolition-reconstruction of the building or the mere energy requalification. In the latter case, the advantages, both in terms of lower costs and environmental impact, could be completely eliminated by the extent of the expected damage following seismic events.

The environmental impact involves the entire building life cycle. One of the most shared results in current literature indicates that the most impactful phase of the life cycle is that of use [6, 7, 8]. According to Asdrubali et al. [7], this phase contributes up to 78% of the total impact, while the construction and end-of-life phases account respectively for up to 23% and 4%. The study by Alshamrani et al. [9] shows that, with regard to most of the building types studied (including reinforced concrete buildings with boxed brick infill), the environmental impact in terms of Global Warming Potential (GWP) produced during the end-of-life phase is approximately double compared to the construction phase. In general, the demolition and disposal phases make reconstruction interventions more onerous than the recovery ones. However, it is also necessary to consider the possible benefits deriving from the recycling and re-use of waste material. Blengini [10] carried out an LCA study of a 1960s building with a mixed frame-walls structure in RC and brick cladding demolished in 2004. The results showed that: 1. the final recycling activity can allow for a reduction of the impact on the entire life of between 0,2% and 2,6%; 2. from the recycling of steel, a material with excellent characteristics can be obtained, saving almost 50% of the energy necessary for the production of “virgin” steel.

From a study by Paleari and Campioli [11], based on data obtained from the demolition plan of 51 buildings built with a framed structure in RC or in load-bearing masonry, it was found that: 1. inert materials (concrete and bricks) have a high preponderance by weight (about 97%) compared to the total waste; 2. the most significant environmental loads are due to the demolition of the load-bearing structures and the infill panels; 3. the presence of a basement floor leads to a not inconsiderable burden on the environmental impact; 4. only 33% of the inert waste can be considered pure concrete and may originate aggregates that are not contaminated by other elements. It should be noted that in Italy most of the recycled aggregates are used as drainage material or for screeds and sub-floors, while re-use for quality applications (e.g. for the production of structural concrete) is still limited [11], despite the objectives

vulnerabilità sismica dell'edificio, e al livello di sicurezza strutturale che si intende conseguire nel rispetto dei requisiti imposti dalle norme tecniche. Per quanto riguarda gli aspetti energetici, se da un lato le nuove costruzioni devono soddisfare elevati standard prestazionali, le politiche europee e nazionali continuano ad incentivare interventi di efficientamento energetico dell'edilizia esistente, sollecitando l'uso in misura crescente di fonti energetiche rinnovabili.

Belleri e Marini [5] hanno evidenziato come, specie in aree a medio-alta sismicità, approcci integrati di riqualificazione energetica e di miglioramento strutturale possono risultare più sostenibili rispetto alle alternative della demolizione-ricostruzione dell'edificio o della sola riqualificazione energetica. Infatti in quest'ultimo caso i vantaggi, sia in termini di minor costo e di minor impatto ambientale, potrebbero essere completamente vanificati dall'entità del danno atteso a seguito di eventi sismici.

L'impatto ambientale coinvolge l'intero ciclo di vita edilizio. Uno dei risultati maggiormente condivisi in letteratura indica che la fase del ciclo di vita più impattante è quella d'uso [6, 7, 8]. Secondo Asdrubali et al. [7] tale fase contribuisce fino al 78% dell'impatto complessivo, mentre le fasi di costruzione e di fine vita incidono rispettivamente fino al 23% e al 4%. Lo studio di Alshamrani et al. [9] evidenzia che, relativamente alla maggior parte delle tipologie costruttive esaminate (tra cui edifici in c.a. con tamponature in laterizio a cassetta), l'impatto ambientale in termini di GWP (Global Warming Potential) prodotto durante la fase di fine vita è circa il doppio rispetto alla fase di costruzione. In generale le fasi di demolizione e smaltimento rendono gli interventi di ricostruzione più onerosi rispetto a quelli di recupero. Occorre, tuttavia, considerare anche i possibili benefici derivanti dal riciclo e riutilizzo del materiale di risulta. Blengini [10] ha effettuato uno studio LCA di un edificio degli anni '60 con struttura mista telaio-pareti in c.a. e tamponature in laterizio demolito nel 2004. I risultati hanno evidenziato che: 1. l'attività di riciclo finale può consentire una riduzione degli impatti sull'intera vita compresa tra lo 0,2% e il 2,6%; 2. dal riciclo dell'acciaio si può ottenere un materiale di ottime caratteristiche risparmiando quasi il 50% dell'energia necessaria alla produzione di acciaio “vergine”. Dalla ricerca di Paleari e Campioli [11], basata sui dati ottenuti dal piano di demolizione di 51 edifici realizzati con struttura intelaiata in c.a. o in muratura portante, è emerso che: 1. i materiali inerti (calcestruzzo e laterizio) hanno un'elevata preponderanza in peso (97% circa) rispetto al totale dei rifiuti; 2. i carichi ambientali più rilevanti sono ascrivibili alla demolizione delle strutture portanti e delle tamponature; 3. la presenza di un piano interrato determina un aggravio non trascurabile sugli impatti ambientali; 4. solo il 33% dei rifiuti inerti può essere considerato calcestruzzo puro e può originare aggregati non contaminati da altri elementi. Occorre rilevare che in Italia gran parte degli

set out by the European directives [12] and the important research initiatives carried out in recent years [13].

Regarding the “cost” factor, a detailed analysis of the economic convenience should consider both the initial costs of the intervention as well as the future costs of maintenance and management along with the savings obtainable in terms of reducing energy consumption and lower structural vulnerability (and therefore less expected damage) and reduction of environmental impact. The monetization of the benefits connected to these last two aspects is without doubt a complex operation. With reference to only the initial costs, maximum indications on a limit of recovery/reconstruction convenience can be inferred from the national decrees for the granting of contributions for post-earthquake building interventions. In the context of economic analysis, another aspect of considerable importance is the increase in the post-intervention property value. According to Zavadskas et al. [14], it is convenient to recover a building when the sum of the costs of the intervention and the current market value is sufficiently lower than the market value of the reconstructed building.

Further factors that may influence the choice of the most appropriate building intervention are the expected post-operam useful life, the completion time and the level of difficulty during the execution phase in relation to the “disturbance” caused to the occupants [15].

### 3. METHODOLOGY

The proposed decision analysis tool is based on the use of the multi-criteria Analytic Hierarchy Process (AHP) method [16]. AHP provides for the construction of an evaluation matrix composed of “k” criteria and “n” decision alternatives. In relation to the objectives of the analysis, a set of the most appropriate evaluation criteria is identified (Figure 1), and a relative weight is assigned to each criterion. By adopting an appropriate technique for resolving the evaluation matrix (Figure 2), it is possible to obtain, for each alternative, a synthetic index that allows to compare and order the  $n$  alternatives. Research developments have led to a revision in the selection of the evaluation criteria compared to those initially identified and described by the authors in a previous work [15]. Figure 1 shows the updated set of criteria adopted and the related indicators.

The “Energy Performance” criterion ( $P_{ENER}$ ) is assessed through the Energy Performance Index  $EP_{gl,nren}$ , according to the calculation method of the national standards UNI/TS 11300. The “Seismic Safety Level” criterion ( $L_a$ ) is associated with the Seismic Risk Index, the relationship between demand and

aggregati riciclati è impiegata come materiale drenante di riempimento o per massetti e sottofondi mentre il riutilizzo per applicazioni di qualità (ad es. per la produzione di calcestruzzi strutturali) è ancora limitato [11], nonostante gli obiettivi fissati dalle direttive europee [12] e le importanti iniziative di ricerca condotte negli ultimi anni [13]. Per quanto riguarda il fattore “costo”, un’analisi rigorosa di convenienza economica dovrebbe considerare sia i costi iniziali dell’intervento sia i costi futuri di manutenzione e gestione unitamente ai risparmi conseguibili in termini di riduzione dei consumi energetici, di minore vulnerabilità strutturale (e quindi di minor danno atteso) e di riduzione degli impatti ambientali. La monetizzazione dei benefici connessi a quest’ultimi due aspetti è certamente un’operazione complessa. Con riferimento ai soli costi iniziali, indicazioni di massima su un limite di convenienza recupero/ricostruzione sono desumibili dai decreti nazionali per la concessione di contributi per interventi edilizi post-sisma. Nell’ambito dell’analisi economica, un altro aspetto di notevole importanza è l’incremento del valore immobiliare post intervento. Secondo Zavadskas et al. [14] è conveniente recuperare un edificio quando la somma dei costi dell’intervento e del valore di mercato corrente risulta sufficientemente inferiore al valore di mercato del fabbricato ricostruito. Ulteriori fattori che possono influire sulla scelta dell’intervento edilizio più opportuno sono la vita utile attesa post operam, i tempi di realizzazione, il livello di difficoltà in fase esecutiva in relazione, il “disturbo” arrecato agli occupanti [15].

### 3. METODOLOGIA

Lo strumento di analisi decisionale proposto è basato sull’impiego del metodo multicriterio AHP, acronimo di Analytic Hierarchy Process [16]. L’AHP prevede la costruzione di una matrice di valutazione composta da “k” criteri ed “n” alternative decisionali. In relazione agli obiettivi dell’analisi viene individuato l’insieme dei criteri di valutazione più opportuni (Figura 1) e viene attribuito a ciascun criterio un peso relativo. Adottando un’opportuna tecnica di risoluzione della matrice di valutazione (Figura 2), si ottiene, per ciascuna alternativa, un indice sintetico che consente di confrontare e ordinare le  $n$  alternative. Gli sviluppi della ricerca hanno portato ad una revisione nella scelta dei criteri di valutazione rispetto a quelli inizialmente individuati e descritti dagli Autori in un precedente contributo [15]. In Figura 1 è riportato l’insieme aggiornato dei criteri assunti e dei relativi indicatori. Il criterio “Prestazione Energetica” ( $P_{ENER}$ ) è valutato attraverso l’Indice di Prestazione Energetica  $EP_{gl,nren}$  secondo la metodologia di calcolo delle norme nazionali UNI/TS 11300. Il criterio “Livello di Sicurezza Sismica” ( $L_a$ ) è associato all’Indice di Rischio Sismico, rapporto tra domanda e capacità sismica in termini di accelerazioni o spostamenti, da valutare tramite analisi statica non lineare (Pushover Analysis). Per la stima del criterio “Impatto Ambientale” ( $I_{AMB}$ ) è proposto un



seismic capacity in terms of accelerations or displacements, to be evaluated using non-linear static analysis (Pushover Analysis).

indicatore che tiene conto del bilancio tra la produzione e il recupero dei rifiuti. La quantità di rifiuti prodotta,  $Q_{TOT}$  espressa in tonnellate, è stimata

N.	Initials	Criterion Description	Indicator Description	Unit
1	$C_I$	Intervention Cost	Total cost by metric-estimative calculation	€
2	$P_{ENER}$	Energy Performance	Energy performance index (calculated according to UNI/TS 11300)	kWh/m <sup>2</sup> year
3	$I_{AMB}$	Environmental Impact	Production balance/waste recovery	t
4	$L_\alpha$	Seismic Safety Level	Seismic capacity/demand ratio	-
5	$T_R$	Realization Times	From work schedule	days
6	$D$	Disturbance	Degree of disturbance attributed on a qualitative scale	-

Figure 1. Description of the evaluation criteria adopted and related indicators.

	$C_I$	$P_{ENER}$	$I_{AMB}$	$L_\alpha$	$T_R$	$D$
Alternatives/Criteria	€	kWh/m <sup>2</sup> year	t	-	days	score
$A_1$	$x_{11}$					
$A_2$	$x_{21}$					
...	...					
$A_i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	...	...	...	$x_{i6}$
...	...					
$A_N$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	...	...	...	$x_{n6}$

Figure 2. Evaluation matrix of the n intervention alternatives with respect to the 6 evaluation criteria.

For the estimate of the “Environmental Impact” criterion ( $I_{AMB}$ ), an indicator is proposed that takes into account the balance between the production and recovery of waste. The quantity of waste produced,  $Q_{TOT}$  expressed in tons, is estimated on the basis of the specific building intervention. In a simplified way, the diversification of waste in terms of environmental impact is not taken into account: this aspect can be considered through the introduction of appropriate weighting factors in the further developments of this work. Regarding the quantity of recovered waste,  $Q_{REC}$ , in the absence of specific data, it is possible to refer to the minimum percentages set by European and/or national regulations [12]. In the case-study, a minimum amount of recovery equal to 10% of the waste produced was hypothesised, based on data from an ANPAR study [17]. The  $Q_{TOT}$  quantity constitutes a “cost” in terms of environmental impact and therefore must be standardized according to the rules of minimization; the  $Q_{REC}$  quantity expresses a “benefit” and therefore must be normalized according to the rules of maximization. The Environmental Impact Indicator,  $I_{AMB}$ , is finally defined by the following expression:

$$I_{AMB} = \alpha Q'_{TOT} + \beta Q'_{REC} \quad (1)$$

in base allo specifico intervento edilizio. In via semplificata non si tiene conto della diversificazione tra i rifiuti in termini di impatto ambientale: tale aspetto potrà essere considerato attraverso l'introduzione di opportuni fattori di ponderazione nei prossimi sviluppi di questo lavoro. Per quanto riguarda il quantitativo di rifiuti recuperati,  $Q_{REC}$  in assenza di dati specifici, è possibile far riferimento alle percentuali minime fissate da normative europee e/o nazionali [12]. Nel caso studio esaminato è stata ipotizzata una quantità minima di recupero pari al 10% dei rifiuti prodotti, in base ai dati di uno studio dell'ANPAR [17]. La quantità  $Q_{TOT}$  costituisce un “costo” in termini di impatto ambientale e pertanto va normalizzata secondo regole di minimizzazione; viceversa la quantità  $Q_{REC}$  esprime un “beneficio” e quindi va normalizzata secondo regole di massimizzazione. L'Indicatore d'Impatto Ambientale,  $I_{AMB}$  è infine definito tramite la seguente espressione:

$$I_{AMB} = \alpha Q'_{TOT} + \beta Q'_{REC} \quad (1)$$

dove  $\alpha$  e  $\beta$  sono coefficienti di peso relativo, mentre l'apice indica i valori normalizzati delle quantità  $Q$ . I coefficienti di peso sono stati ricavati come media aritmetica dei valori ad essi attribuiti da dieci esperti del settore. In particolare è risultato  $\alpha = \beta = 0,5$ .

Il criterio “Disturbo” ( $D$ ) considera il grado di “disturbo” arrecato dalla realizzazione dell'intervento a coloro

where  $\alpha$  and  $\beta$  are coefficients of relative weight, while the apex indicates the normalized values of the Q quantities. The weight coefficients have been obtained as an arithmetic mean of the values attributed to them by ten experts in the sector, using specially prepared cards. In particular,  $\alpha = \beta = 0.5$  was found.

The “Disturbance” criterion (D) considers the degree of “disturbance” caused by the realization of the intervention to those who reside or carry out activities in the building. The disturbance level is expressed through a score, attributed according to a qualitative judgment scale (Figure 3).

*che risiedono o che svolgono attività nell'edificio. Il livello di disturbo è espresso tramite un punteggio, attribuito secondo una scala di giudizio qualitativa (Figura 3). Per l'attribuzione dei pesi relativi dei 6 criteri di valutazione assunti è stato consultato un campione di venti esperti, composto da ricercatori universitari e liberi professionisti. Ciascun esperto ha distribuito i sei criteri su una scala di importanza relativa a 5 gradini; attraverso la tecnica del confronto a coppie proposta da Mondy e Noe [18], sono stati ricavati venti vettori dei pesi relativi corrispondenti agli ordinamenti espressi dagli esperti. Il vettore finale dei pesi relativi dei*

Criterion n. 6 – “D”		
Disturbance caused to occupants, activities and interactions with the site		Score
Low	Intervention that does not require the occupation of premises and does not involve the suspension of activities.	0,125
Medium	Intervention that requires the occupation of premises and involves the temporary suspension of activities or their reorganization.	0,375
High	Intervention that requires a partial relocation of users.	0,625
Very High	Intervention that requires the delocalization of the entire user.	0,875

Figure 3. Evaluation according to qualitative scale of disturbance levels and translation of qualitative judgments into scores.

For the attribution of the relative weights of the 6 evaluation criteria, a sample of twenty experts, composed of university researchers and freelance professional, was consulted. Each expert distributed the six criteria on a scale of importance related to 5 steps; through the pair comparison technique proposed by Mondy and Noe [18], twenty vectors of the relative weights corresponding to the systems expressed by the experts were obtained. The final vector of the relative weights of the criteria was then calculated as the vector of the relative average weights (Figure 4).

*criteri è stato quindi calcolato come vettore dei pesi medi relativi (Figura 4). Le fasi successive del metodo multicriteriale prevedono la normalizzazione della matrice di valutazione e infine la risoluzione attraverso il metodo SAW, Simple Additive Weighing [19], che consente di ottenere, per ciascuna alternativa di intervento, un indice sintetico di preferenza. Tale parametro di supporto decisionale è stato denominato ed è espresso dalla seguente:*

$$I_{SL,i} = \sum_j w_j x'_{ij} \quad (2)$$

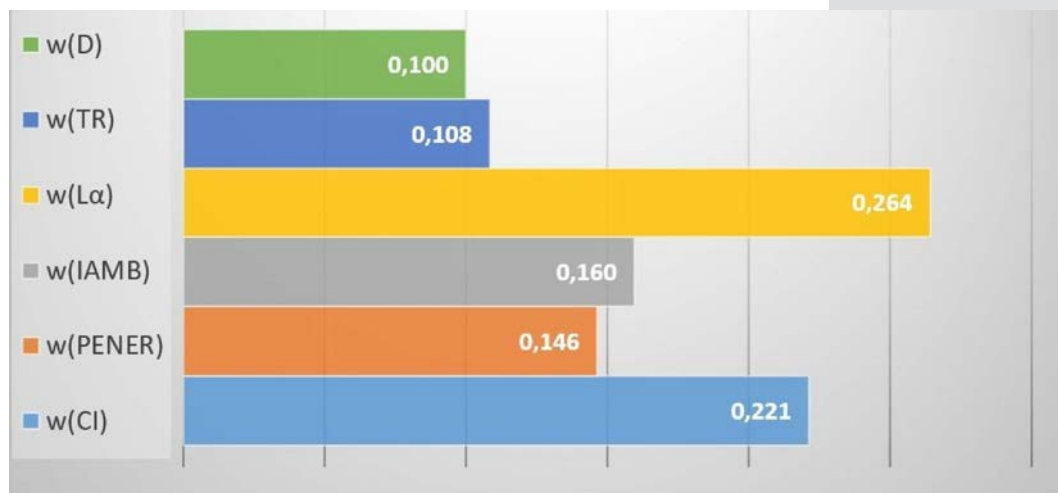


Figure 4. Vector histogram of the relative weights assigned to the criteria.

The successive phases of the multicriteria method provide for the normalization of the evaluation matrix and finally the resolution through the Simple Additive Weighing (SAW) method, [19], which allows to obtain, for each intervention alternative, a synthetic index of preference. This decision support parameter has been called the “Second Life Index” of the building and is expressed by the following:

$$I_{SL,i} = \sum_j w_j x'_{ij} \quad (2)$$

where  $j$  varies from 1 to 6,  $w_j$  is a coefficient that expresses the relative weight of the  $j$ -th criterion, the apex indicates the normalized values of the evaluation matrix. Standardization takes place with maximization formulas if the criterion expresses a “benefit” or vice versa of minimization if the criterion is a “cost”. For a more detailed description of these last operations, refer to the publication of the first phase of this study [15]. Through the proposed tool, the decision-maker is oriented, according to a rational and structured process, towards the more “convenient” alternatives i.e., that best satisfy the predefined evaluation criteria from a global point of view.

## 4. RESULTS

The proposed multicriteria approach was applied to the case of the school “G. Pisapia” located in the municipality of Cava de’Tirreni, in the province of Salerno (Southern Italy). The building has a regular and symmetrical plan and is spread over three floors. The structure, a frame in RC, was built in the late 1960s and is seismically inadequate. The building envelope is highly dispersive from a thermal point of view, while the systems have been partially modernized. Six intervention alternatives have been proposed  $A_i$ :

- $A_1$ : seismic adaptation through localized confinement interventions of the columns using fiber-reinforced materials, FRP, and energy improvement with the replacement of the fixtures;
- $A_2$ : seismic adaptation through the creation of reinforced concrete walls and energy improvement with the replacement of the fixtures;
- $A_{3,1}$ : demolition and reconstruction of the building according to the performance standards required by current technical regulations; furthermore, a minimum recovery percentage of 50% for window frames is assumed, and 10% for all other waste deriving from the demolition;
- $A_{3,2}$ : differs from the alternative  $A_{3,1}$  with a different demolition mode based on a selective strategy that allows to obtain higher recovery rates

dove  $j$  varia da 1 a 6,  $w_j$  è un coefficiente che esprime il peso relativo del  $j$ -esimo criterio, l'apice indica i valori normalizzati della matrice di valutazione. La normalizzazione avviene con formule di massimizzazione se il criterio esprime un “beneficio” o viceversa di minimizzazione qualora il criterio è un “costo”. dell'edificio Per una descrizione più estesa di queste ultime operazioni si rimanda alla pubblicazione della prima fase di questa ricerca [15]. Attraverso lo strumento proposto, il decisore viene orientato, secondo un processo razionale e strutturato, verso quelle alternative più “convenienti”, ovvero che soddisfano meglio dal punto di vista globale i criteri di valutazione predefiniti.

### 4. RISULTATI

L'approccio multicriteriale proposto è stato applicato al caso dell'istituto scolastico « G. Pisapia » situato nel Comune di Cava de' Tirreni, in provincia di Salerno (Sud Italia). L'edificio presenta una pianta piuttosto regolare e simmetrica e si sviluppa su tre piani. La struttura, a telaio in c.a., è stata realizzata alla fine degli anni '60 ed è sismicamente inadeguata. L'involucro è fortemente disperdente dal punto di vista termico mentre il sistema impiantistico è stato parzialmente ammodernato. Sono proposte sei alternative di intervento  $A_i$ :

- $A_1$ : adeguamento sismico attraverso interventi localizzati di confinamento dei pilastri tramite materiali fibrorinforzati, FRP, e miglioramento energetico con sostituzione degli infissi;
- $A_2$ : adeguamento sismico tramite realizzazione di setti in calcestruzzo armato e miglioramento energetico con sostituzione degli infissi;
- $A_{3,1}$ : demolizione e ricostruzione dell'edificio secondo gli standard prestazionali previsti dalle vigenti normative tecniche; si ipotizza inoltre una percentuale minima di recupero pari al 50% per gli infissi, e al 10% per tutti gli altri rifiuti derivanti dalla demolizione;
- $A_{3,2}$ : differisce dall'alternativa  $A_{3,1}$  unicamente per la differente modalità di demolizione basata su una strategia selettiva che consente di ottenere percentuali di recupero più elevate (Figura 5);
- $A_4$ : adeguamento sismico attraverso gli stessi interventi previsti per l'alternativa  $A_1$  e miglioramento energetico più consistente attraverso sostituzione degli infissi, isolamento termico a cappotto con pannelli in EPS di spessore 120 mm in facciata e 50 mm in copertura, installazione di un impianto fotovoltaico;
- $A_5$ : adeguamento sismico con gli stessi interventi previsti per  $A_2$ , e stessa strategia di miglioramento energetico proposta per l'alternativa  $A_4$ . Gli infissi esistenti in ferro e vetro singolo vengono sostituiti, in ciascuna alternativa, da infissi in PVC a taglio termico dotati di triplo vetro.

Occorre evidenziare che tutte le alternative ipotizzate risultano confrontabili dal punto di vista della sicurezza sismica, mentre dal punto

(Figure 5);

- $A_4$ : seismic adaptation through the same interventions as for alternative  $A_1$  and more consistent energy improvement by replacing the fixtures, thermal insulation with EPS panels with a thickness of 120 mm on the façade and 50 mm on the roof, installation of a photovoltaic system;
- $A_5$ : seismic adaptation with the same interventions planned for  $A_2$ , and the same energy improvement strategy proposed for  $A_4$ . The existing fixtures in single iron and glass are replaced, in each alternative, by PVC thermal break frames equipped with triple glazing.

	Q <sub>REC</sub> [%]
Demolition of partition walls	25
Demolition of external walls	25
Window removal, including the glazed part	50
Demolition of elements in RC (pillars, beams)	70
Demolition of floor slabs	30
Roof demolition	30
Removal of internal doors	10

Figure 5. Recovery percentages in the case of “selective” demolition.

It should be noted how all the hypothetical alternatives are comparable from the point of view of seismic safety, while from the point of view of energy efficiency only the alternatives  $A_{3,1}$ ,  $A_{3,2}$ ,  $A_4$  and  $A_5$  can be compared since  $A_1$  and  $A_2$  provide for lower level energy requalification interventions. The proposed decision-making methodology was then applied separately in the following two cases:

1. for the comparison between the alternatives  $A_1$  and  $A_2$ ;
2. for the comparison of alternatives  $A_{3,1}$ ,  $A_{3,2}$ ,  $A_4$  and  $A_5$ .

From the application 1.) it has emerged that, with the same energy performance, the alternative  $A_1$  has a preference index greater than  $A_2$ , i.e. with a seismic adaptation intervention with FRP being more convenient compared to the realization of RC walls (Figure 6). The second case 2.) shows a greater overall convenience of refurbishment alternatives than demolition alternatives and confirms the preference for interventions with FRP, as regards refurbishment alternatives (Figure 6).

Alternative	ISL
$A_1$	0,9890
$A_2$	0,8754

Alternative	ISL
$A_{3,1}$	0,5541
$A_{3,2}$	0,5473
$A_4$	0,8400
$A_5$	0,7773

Figure 6. Calculation of the decision support index for the comparison of the two different groups of intervention alternatives.

di vista dell'efficienza energetica solo le alternative  $A_{3,1}$ ,  $A_{3,2}$ ,  $A_4$  e  $A_5$  possono essere confrontate in quanto  $A_1$  e  $A_2$  prevedono interventi di riqualificazione energetica di livello inferiore. La metodologia di analisi decisionale proposta è stata quindi applicata separatamente nei due casi seguenti:

1. per la comparazione tra le alternative  $A_1$  e  $A_2$ ;
2. per la comparazione tra le alternative  $A_{3,1}$ ,  $A_{3,2}$ ,  $A_4$  e  $A_5$ .

Dall'applicazione 1.) è emerso che, a parità di performance energetica, l'alternativa  $A_1$  ha un indice di preferenza maggiore rispetto all' $A_2$ , ovvero risulta più opportuno un intervento di adeguamento sismico con

FRP rispetto alla realizzazione di setti in c.a. (Figura 6). L'applicazione 2.) evidenzia una maggiore convenienza globale delle alternative di recupero rispetto a quelle di demolizione (Figura 6) e conferma, relativamente alle alternative di recupero, la preferenza per gli interventi con FRP. In particolare, dall'esame dei valori assunti da ciascuna alternativa rispetto al singolo criterio di valutazione, risulta che le alternative di recupero consentono una significativa riduzione dei costi, degli impatti ambientali (Figura 7) e dei tempi di realizzazione, garantendo al contempo un elevato livello di sicurezza sismica (Figura 8). Per quanto il criterio energetico, l'edificio ricostruito risulta molto più performante: ciò suggerisce, nell'ipotesi di recupero, la ricerca di una migliore strategia di riqualificazione energetica del sistema involucro-impianti.

## 5. CONCLUSIONI

La necessità di intervenire sul patrimonio edilizio esistente in maniera adeguata per garantire standard di sicurezza sismica ed efficienza energetica, unitamente ad un'ottimizzazione delle spese



In particular, by examining the values assumed by each alternative with respect to the single evaluation criterion, it appears that the refurbishment alternatives allow for a significant reduction of costs, environmental impacts (Figure 7) and construction times, while ensuring a high level of seismic safety (Figure 8). Regarding the energy criterion, the reconstructed building is much more performing: this suggests, in the hypothesis of recovery, the search for a better energy requalification strategy of the building envelope – plant systems.

occorrenti e al controllo degli impatti ambientali, impone una valutazione della scelta del tipo di intervento più appropriato: recuperare o demolire e ricostruire? In una prima fase di questa ricerca si è data ampia illustrazione agli studi sul tema in questione al fine di predisporre un modello di analisi multicriteri [15]. Gli sviluppi successivi, qui discussi, hanno portato ad una ridefinizione dei criteri di valutazione assunti e degli indicatori associati. In particolare la matrice di valutazione aggiornata si compone dei seguenti sei criteri generali: 1.)

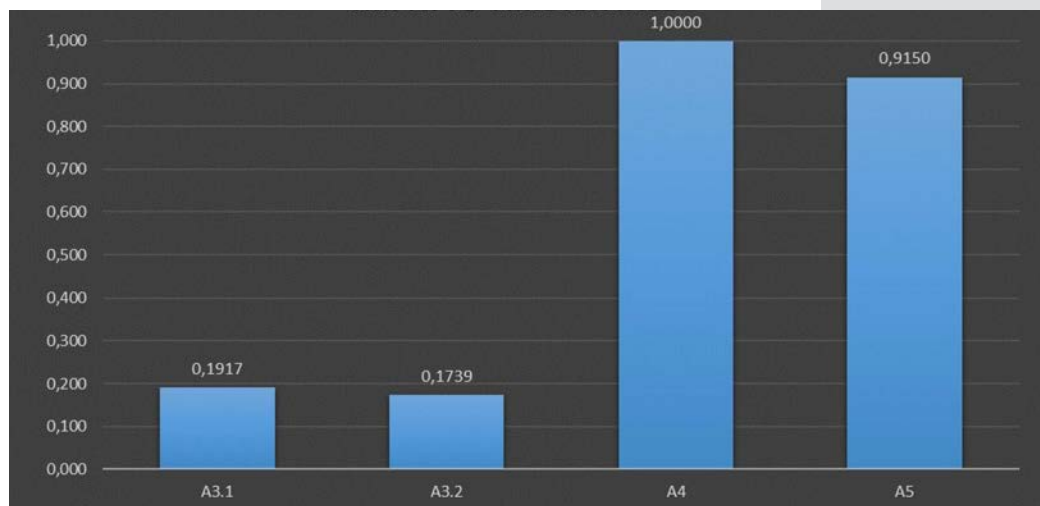


Figure 7. Normalized values of the “Environmental Impact” criterion (IAMB) for each alternative.

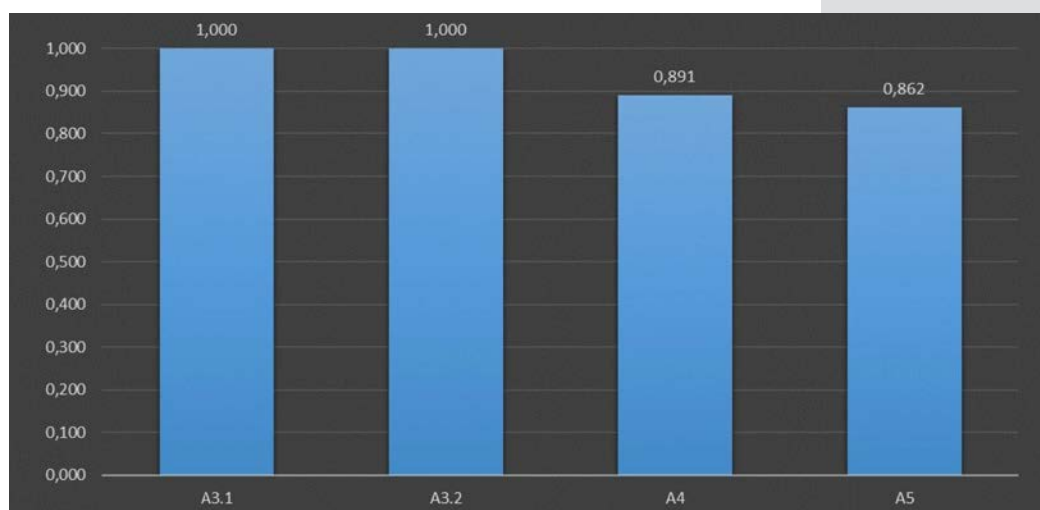


Figure 8. Normalized values of the “Seismic Safety Level” criterion (La) for each alternative.

## 5. CONCLUSIONS

The need to intervene on existing buildings in an appropriate mode to guarantee seismic safety standards and energy efficiency, together with an optimization of the necessary costs and the control of environmental impact, requires an assessment of the most appropriate type of intervention: refurbish

costo dell'intervento; 2.) prestazione energetica; 3.) impatto ambientale; 4.) livello di sicurezza sismica; 5.) tempi di realizzazione; 6.) disturbo arrecato. L'applicazione del modello al caso di un edificio scolastico ha consentito di evidenziarne i pregi: attraverso un indice sintetico di supporto decisionale è possibile comparare e ordinare le alternative di intervento, orientando il decisore verso la soluzione che globalmente risulta più soddisfacente. I principali

or demolish and rebuild?

The first phase of this study included a general review of the studies dealing with this topic so as to create a multicriteria analysis model [15]. The following developments have led to a redefining of the evaluation criteria adopted and the associated indicators. The updated assessment matrix consists of the following six general criteria: 1.) cost of the intervention; 2.) energy performance; 3.) environmental impact; 4.) seismic safety level; 5.) construction times; 6.) disturbance. The application of the model to the case of a school building has allowed to highlight its merits: through a synthetic index of decision support, it is possible to compare and order the intervention alternatives, directing the decision maker towards the solution that is overall more satisfactory. The main limitations of the model are in the simplified assessment of the costs and environmental impact. These aspects are being studied in greater detail so as to define the indicators more accurately. The cost indicator will consider not only the initial costs but also the discounted future costs of management and maintenance, as well as the availability of any incentives/financing. Regarding the estimation of the environmental impact, the research is oriented to defining an indicator that takes into account the different environmental “weight” of the various types of demolition construction waste, in relation to the entire life cycle including also the recycling/reuse phases. Finally, it is worth highlighting how the proposed decision-making approach can be usefully adopted by public administrations both for planning the regeneration of property assets as well as to promote the recovery of existing buildings by modulating the economic contributions that can be granted to private investors.

## 6. REFERENCES

- [1] Building Performance Institute Europe (BPIE), *Europe's buildings under the microscope*. Brussels (Belgium): 2011. <http://bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope/>. (Last Consultation: 18/04/18)
- [2] Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), 15° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni. Roma (Italia): 2012. <http://dati.censimento.popolazione.istat.it/Index.aspx>. (Last Consultation: 18/04/18)
- [3] European Committee for Standardization, EN 1998:2005 Eurocode 8: *Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*. Brussels (Belgium): 2005.
- [4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), D.M. 28 febbraio 2017 - *Linee guida per la classificazione del rischio sismico*. Roma: 2017.
- [5] Belleri A., Marini A., *Does seismic risk affect the environmental impact of existing buildings?* Energy and Buildings 2016, vol. 110, pp. 149–158.
- [6] Adalberth K., Almgren A., Holleris Petersen E., *Life-cycle assessment of four multifamily buildings*. International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, 2001, vol. 2, pp. 1-21.
- [7] Asdrubali F, Baldassarri C, Fthenakis V., *Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings*. Energy and Buildings, 2013, vol. 64, pp. 73-89.
- [8] Cuéllar-Franca R.M., Azapagic A., *Environmental impacts of the UK residential sector:*

limiti del modello risiedono invece nella valutazione semplificata dei costi e degli impatti ambientali. Tali aspetti sono in corso di approfondimento per la definizione di indicatori più accurati. In particolare, l'indicatore dei costi prenderà in considerazione non solo i costi iniziali ma anche i costi futuri attualizzati di gestione e manutenzione, nonché la disponibilità di eventuali incentivi/finanziamenti. Per quanto riguarda la stima degli impatti ambientali, la ricerca è orientata alla formulazione di un indicatore che tenga conto del diverso “peso” ambientale dei vari tipi di rifiuti edili da demolizione, in relazione all'intero ciclo di vita comprendente anche le fasi di riciclo/riutilizzo. Si sottolinea infine che l'approccio decisionale proposto può essere utilmente adottato dalle Amministrazioni pubbliche sia per la programmazione degli interventi di rigenerazione del patrimonio immobiliare sia per promuovere il recupero dell'esistente modulando i contributi economici concedibili ai soggetti privati.

- Life cycle assessment of houses*. Building and Environment, 2012, vol. 54, pp. 86-99
- [9] Alshamrani O.S., Galal K., Alkass S., *Integrated LCA-LEED sustainability assessment model for structure and envelope systems of school buildings*. Building and Environment, 2014, vol. 80, pp. 61-70.
- [10] Blengini G.A., *Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy*. Building and Environment, 2009, vol. 44, pp. 319-30
- [11] Paleari M., Campioli A., *I rifiuti da costruzione e demolizione: LCA della demolizione di 51 edifici residenziali*. Ingegneria dell' Ambiente, 2015, vol. 4, pp. 47-61.
- [12] European Parliament (EP), Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Brussels (Belgium): 2008.
- [13] University of Salerno (coordinator), EnCoRe Project - *Environmentally-friendly solutions for Concrete with Recycled and natural components*. 2012-14. Further information are available on: <http://www.encore-fp7.unisa.it/project>
- [14] Zavadskas E.K., Kaklauskas A., Raslanas S., *Evaluation of investments into housing renovation*. International Journal of Strategic Property Management, 2004, vol. 8, pp. 177-190.
- [15] Fiore P., Donnarumma G., Sicignano C., *Refurbishment vs. demolition and reconstruction: analysis and evaluation in order to choose the intervention*. In: G. Bernardini, E. Di Giuseppe (a cura di), *Colloqui.AT.e 2017 Demolition or Reconstruction?* EdicomEdizioni, 2017, pp. 964-975.
- [16] Saaty T.L., *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [17] Associazione Nazionale Produttori Aggregati Riciclati (ANPAR), *Convegno "La produzione e l'impiego di aggregati riciclati"*, 28 giugno 2017.
- [18] Mondy W., Noe R., *Human Resource Management*. New Jersey (USA): Prentice-Hall, 2008.
- [19] Ching-Lai H., Kwangsun Y., *Multiple attribute decision making*. New York (USA): Springer Verlag, 1981.