

Ernesto Antonini, Andrea Boeri, Jacopo Gaspari, Danila Longo,
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Bologna

ernesto.antonini@unibo.it
andrea.boeri@unibo.it
jacopo.gaspari@unibo.it
danila.longo@unibo.it

Abstract. Recenti indagini sullo stato del patrimonio italiano di edilizia scolastica ne registrano i livelli di sicurezza sismica e di prevenzione antincendio, ma non forniscono informazioni sulle condizioni di comfort termoigrometrico né sul comportamento energetico degli edifici, benché le prime incidano sensibilmente sulla fruibilità e salubrità degli spazi e il secondo sia causa di una quota rilevante dei costi di esercizio. Uno studio condotto su un campione di edifici scolastici italiani, documentato in questo articolo, conferma gli elevati livelli di consumi, ne individua le principali cause tramite l'applicazione di una specifica metodica di analisi e suggerisce alcune possibili strategie di intervento per la riqualificazione energetica e ambientale, simulandone gli effetti e verificandone i benefici.

Parole chiave: Edifici scolastici, Sostenibilità, Riqualificazione, Efficienza energetica, Involucro edilizio

Consistenza e condizioni del patrimonio di edilizia scolastica

La recente pubblicazione dei primi dati dell'Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica¹ conferma quanto già più volte rilevato dalle indagini "Ecosistema scuola" di Legambiente² in merito al preoccupante livello di obsolescenza della maggior parte degli edifici scolastici italiani, inadeguati a soddisfare i requisiti normativi di salubrità, fruibilità ed economia di esercizio, e ancor più le esigenze emergenti, indotte dall'adozione di nuovi modelli pedagogici e di più severi standard funzionali. Il parco italiano di edilizia scolastica attualmente in uso consiste in oltre 40.000 edifici, frequentati da circa 10 milioni di studenti di varie fasce d'età. Oltre il 60% delle scuole italiane risale a prima del 1974, e di queste quasi un terzo è anteriore al 1940. Le scuole realizzate dopo il 1990, invece, sono meno del 7%: negli ultimi venti anni, cioè, sull'intero territorio nazionale si sono costruiti mediamente meno di 140 nuovi edifici scolastici all'anno, che significa una scuola nuova ogni 280 in servizio, con un tasso di rinnovo del parco inferiore allo 0,4%

annuo. Gli edifici scolastici anteriori al 1940 sono circa il 26% al Nord, il triplo che al Sud, mentre quasi il 50% delle scuole del Sud e il 53% di quelle delle Isole è stato costruito dopo il 1974 (e per oltre la metà addirittura dopo il 1990), quando invece al Centro e al Nord gli edifici scolastici nati dopo il 1974 ammontano rispettivamente al 42% e al 30% del parco. Nell'ultimo quinquennio, oltre un terzo degli edifici ha continuato a richiedere interventi di manutenzione urgente, anche se più della metà del parco è stata oggetto di manutenzione straordinaria, evidentemente insufficiente, stante anche la sensibile riduzione del valore degli investimenti (Tab. 1).

Degli indicatori del livello di sicurezza e benessere degli utenti, tanto l'Anagrafe Nazionale MIUR quanto le indagini Legambiente rilevano quelli legati al rischio di incendio e al rischio sismico, mentre non forniscono riscontri della qualità dell'aria e del benessere termoigrometrico all'interno dei locali, né informazioni riguardo ai livelli di consumo degli edifici.

La qualità dell'aria indoor risulta in media molto scadente, con livelli di polveri sottili, NO_x, Formaldeide e CO₂ che superano ampiamente le soglie raccomandate³.

L'insufficiente ventilazione dei locali è il principale fattore di amplificazione dei fenomeni, che presentano cause molteplici, ma sulla cui intensità incidono in misura decisiva l'assenza di efficaci sistemi di ricambio dell'aria, cioè condizioni strettamente dipendenti dalle caratteristiche dell'edificio e delle sue dotazioni funzionali e impiantistiche^{4,5}.

Sul versante dell'efficienza energetica, le conseguenze dei consumi di combustibile sui costi di gestione del parco costruito si impongono spesso come fattore critico per l'edilizia scolastica, il cui mantenimento in esercizio è vincolante, costoso, e pesa in

Integrated quality: a target for sustainable schools

Abstract: Recent surveys on the condition of the Italian school building stock provide information on its relevant seismic behavior and fire safety levels, however no information is made available on its thermo-hygrometric conditions and energy behaviour, despite the fact that the former has a considerable impact on the use and physical conditions of indoor environments and the latter plays a fundamental role in limiting the buildings operating costs, as literature abundantly shows.

This paper reports the results of a study carried out on a sample of Italian school buildings, substantiating their high levels of energy consumption, and describes the application of a specific method of analysis used for identifying the main causes of these, therefore allowing to propose some possible strategies for retrofitting, aimed to improving the building energy efficiency and environmental quality, by way of simulations and validation of their relevant effects and benefits.

Keywords: School buildings, Sustainability, Retrofitting, Energy efficiency, Building envelope

Size and characteristics of Italian school building stock

The Italian National Registry for School Buildings¹ attests to the results of "Legambiente" surveys² concerning the severe level of obsolescence of the Italian school building stock and its non compliance with the current health, safety and energy saving standards, and even more so with the new emerging needs that are rising from the adoption of new educational models and from the much more restricting functional standards. Over 40.000 school buildings out of this stock are currently used by approximately 10 million students belonging to different age groups. Over 60% of these school buildings was

built before 1974, and almost one third of it before 1940. Schools built after 1990 amount to less than 7%: this means that during the last twenty years less than 140 new schools per year were built in Italy, meaning one new school building per 280 in existence, with a renewal rate of less than 0.4% per year.

In the northern part of Italy, the percentage of school buildings resulting pre-1940 is equal to about 26%, three times higher than in the South. Nearly 50% of the schools located in the South of Italy and 53% of the ones located on its major islands were built after 1974 (and more than half of them even after 1990), whereas school buildings built after 1974, located in the central and center-northern parts of Italy, amount to 42% and 30%, respectively, of the total stock. Urgent maintenance interventions are increasingly needed

misura rilevante sui bilanci sempre più risicati degli Enti locali, ai quali spetta il compito di provvedervi.

Uno screening energetico condotto nel 2009 sulle scuole della Regione Veneto⁶ ha rilevato livelli di dispersione annuali che si aggirano tra i 250 kWh/m² e i 350 kWh/m² (media 290 kWh/m²), equivalenti a circa 80-110 kWh/m³, per contrastare i quali, ai prezzi attuali, è necessario sostenere una spesa per combustibili dell'ordine di 40 €/m². L'indagine segnala che la causa largamente prevalente di simili livelli di consumo è imputabile alle disper-

ni dovute all'inefficienza degli involucri e alle perdite per ventilazione (Antonini, Boscolo e Romagnoni, 2009). Perché le scuole pubbliche possano conseguire, insieme a standard accettabili di sostenibilità ambientale e di contenimento delle emissioni climateranti, anche adeguati livelli di servizio, appare indispensabile agire in modo combinato su più fattori: ridurre i costi di esercizio, razionalizzare la manutenzione e migliorare i livelli di salubrità e comfort, orientando coerentemente a questi obiettivi le strategie di intervento in occasione di operazioni di riqualificazione.

MAINTENANCE	YEAR	YEAR	YEAR	YEAR
	2008	2009	2010	2011
Buildings requiring urgent maintenance	32,82%	36,10%	36,47%	35,79%
Buildings object of extra-ordinary maintenance during the last five years	48,95%	56,00%	55,21%	56,40%

	TOTAL FUNDING	TOTAL FUNDING	TOTAL FUNDING
FUNDS	2009	2010	2011
Extra-ordinary maintenance	€ 208.186.758	€ 179.642.866	€ 168.361.086
Planned maintenance	€ 52.408.810	€ 45.576.021	€ 47.662.389

TAB. 1 | Quadro sintetico degli interventi di manutenzione e degli investimenti (dati: Legambiente, 2012)
Summary table of maintenance interventions and funds (From: Legambiente, 2012)

on more than a third of these buildings, even if more than half of them has undergone extra-ordinary maintenance interventions (Tab.1), during the last five years.

Both the Italian National Registry data and the Legambiente surveys offer no information concerning the levels of energy consumption of school buildings, and no parameter is made available on the air quality or on the levels of the indoor thermo-hygrometric comfort, as well as on the energy performance of the buildings.

However, several studies have shown that most of the Italian school building stock is largely deficient as it results not compliant with the basic standards of comfort level and presents a very high level of energy consumption.

The quality of indoor air is on average very poor, with levels of particulate

(PM10), NOx, CO₂ and formaldehyde far exceeding the recommended thresholds.

The levels of CO₂ result just as severe, almost always twice – if not three times – higher than the 1000 ppm OMS recommended threshold for school buildings³.

The main factor of magnification of the phenomena above is the insufficient ventilation of the premises, that, even if due to multiple causes, mainly depends on a lack of an efficient air-change, a condition strictly related to the building characteristics and its functional equipment, such as plants and systems^{4,5}.

With reference to the issue of energy efficiency, the influence of fuel consumption on the operating costs of this stock is considered a crucial factor, since the keeping in operation is compulsory for school buildings and

very costly, therefore a considerable burden on the increasingly limited budgets of the local authorities responsible for their management.

An energy screening carried out in 2009 on the schools of the Veneto Region⁶, detected levels of energy losses ranging between 250 kWh/m² and 350 kWh/m² (average 290 kWh/m²), per year, equal to about 80-110 kWh/m³, resulting in costs, at today's rate, of about 40 €/m² (Antonini, Boscolo and Romagnoni, 2009).

This survey reported that the main cause of such levels of consumption is related to the heat transmission through the envelope and to the losses due to ventilation.

In order to reach acceptable levels of both environmental sustainability and energy efficiency, as well as proper levels of use, it is essential to intervene on more than one factor: reduce the

operating costs, rationalize the maintenance interventions and improve the health and safety and indoor comfort levels, these could be achieved through the adoption of effective strategies for retrofitting.

Diagnosics

Since 2008, the University of Bologna-Department of Architecture has been carrying out a research program concerning the development of effective design criteria for a sustainable retrofitting of school buildings⁷ to investigate the possible strategies to be adopted to meet the many crucial issues reported above. Although the case studies carried out are not yet sufficient to support a statistical evaluation, they made possible a definition and testing of a diagnostic protocol based on which a specific methodology, even if currently evolving, was

Diagnostica preliminare

Nella prospettiva di indagare le possibili strategie adottabili per far fronte alle molte criticità registrate, presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna è in corso dal 2008 un programma di ricerca riguardante la progettazione e la riqualificazione degli edifici scolastici⁷. La casistica affrontata, anche se ancora insufficiente per elaborazioni statisticamente significative, ha tuttavia consentito di definire e collaudare una diagnostica delle criticità, di sviluppare ed applicare una specifica metodica per l'individuazione delle cause di inefficienza e di simulare gli effetti di interventi di riqualificazione correttivi degli inconvenienti riscontrati.

Tre casi rappresentativi delle più ricorrenti tipologie di edificio analizzate consentono di esemplificare l'applicazione del procedimento e di evidenziarne gli esiti. I tre casi differiscono per tipologie di utenza, per epoca di costruzione e per dimensioni, mentre sono accomunati da condizioni climatiche e geografiche molto simili, nonché da profili di consumo analoghi, attestati su livelli elevati, sebbene inferiori a quelli medi nazionali. Gli edifici sono stati oggetto di una preliminare diagnostica che ne ha rilevato il comportamento energetico, censiti i fattori di criticità e rilevati i principali deficit prestazionali (Tronchin e Fabbri, 2008). Dopo un accurato rilievo che ha determinato dimensioni e caratteristiche degli elementi costruttivi e dei dispositivi impiantistici installati, tramite l'ausilio di software idonei⁸ sono state verificate le prestazioni energetiche dello stato di fatto, considerando le condizioni di irraggiamento in relazione all'esposizione e all'orientamento (Tab. 2).

developed to identify the causes of non performance and to simulate the effects of any corrective measure adopted.

Three case studies, representing the most common types of building analyzed, allowed us to typify the procedure and highlight the results. The three schools selected differ by type of users, year of construction and size, however they all share similar climatic conditions, geographic context and levels of energy needs, that proved to be very high even if below national average. The buildings were made object of preliminary investigative tests, that recorded their energy behaviour, identified the critical factors and their performance main deficits (Tronchin and Fabbri, 2008). After a careful survey concerning the size and characteristics of the building elements and their installed devices, the current

energy performance was validated through a relevant software⁸, taking also in consideration the conditions of irradiation in relation to solar exposure and orientation (Tab. 2).

Strategies of intervention

The diagnostic activity carried out highlighted some recurrent deficits which, despite their different degrees of concentration, allowed a grouping of the phenomena by main topics, in terms of their impact on both the energy consumption and the comfort and usability of indoor spaces:

- failings of building envelope (insulation of opaque elements, heat transmission and air tightness of windows, thermal bridges);
- insufficient ventilation systems (indoor air quality, air leakages);
- no control of natural/artificial lighting and their efficient combination.

	BUILDING 1	BUILDING 2	BUILDING 3
Type of school	Nursery + pre-school	Pre-school + primary+ secondary school	Secondary school
Location	BERTINORO (FC)	CESENA (FC)	BERTINORO (FC)
Year of construction	1980	1972	1990
Floor area - m ²	1250	5250	3500
Pupils nr.	130	720	132
Climatic area	E	E	E
Degree Day	2.435	2.130	2.435
EP tot	54,81 kWh/m ² a	51,60 kWh/m ² a	61,64 kWh/m ² a

TAB. 2 | Quadro sintetico delle informazioni relative ai tre casi analizzati
Characteristics of the case-studies

Strategie d'intervento

A seguito delle attività diagnostiche condotte sui vari casi, sono emersi alcuni deficit ricorrenti che, pur manifestandosi con differente intensità, consentono una sistematizzazione dei fenomeni per tematiche tra loro correlate, sia in termini di ricadute sui consumi energetici, sia rispetto ai livelli di comfort e fruibilità dell'ambiente confinato:

- inefficienza dei sistemi di chiusura (isolamento delle porzioni opache dell'involucro, trasmittanza e tenuta all'aria dei serramenti, ponti termici);
- inadeguatezza dei sistemi di ventilazione (qualità dell'aria indoor, dispersioni);

Given the comparable conditions of the three buildings in question and to establish a common reference for all the situations analyzed, the achieving of an Energy Class "A" (Emilia Romagna region) was set as final target for the retrofitting interventions.

To this purpose, effective strategies were fine-tuned and a first 'minimum intervention' was set up for each case study, consisting in improving the building envelope transmittance values to the levels required by law. The consequent energy behaviour of the relevant building was simulated and the resulting energy need was calculated and compared with the original one (Boeri, Longo and Olivieri, 2011). Subsequent to this first step, the process focused on the deficits affecting the building and on assessing the causes of the critical factors detected. Then, a step by step process was estab-

lished in order to proceed by succeeding approximation in formulating the possible actions capable of improving the energy performance of the building envelope different elements, starting from those deemed responsible for the most considerable thermal losses due to high transmittance. Technically feasible solutions were configured and their effects on the building energy balance were assessed.

Even if the three case studies showed some relevant differences in their functional programs, once the recurring critical factors were identified the simulations and the tests demonstrated that the contribution of the building envelope is a key element for a successful retrofitting action and that the effectiveness of only upgrading plants and systems often results negligible as regards the improvement of the level of indoor comfort.

– mancanza di controllo dell'illuminazione naturale, di quella artificiale e della loro efficace combinazione.

Al fine di fissare un riferimento comune a tutte le situazioni analizzate, si è stabilito come obiettivo degli interventi di riqualificazione il conseguimento della classe energetica A dell'Emilia Romagna.

Per calibrare meglio le strategie sugli edifici campione si è preliminarmente ipotizzato un 'intervento minimo' che permettesse di conseguire i valori limite di trasmittanza degli elementi di involucro prescritti dalla normativa, verificandone gli effetti sul fabbisogno termico totale dell'edificio (Boeri, Longo e Olivieri, 2011).

Procedendo per successive approssimazioni, sono stati quindi ipotizzati gli ulteriori miglioramenti delle trasmittanze dei diversi elementi di involucro, a partire da quelli a cui risultavano imputabili le più rilevanti dispersioni, configurando soluzioni tecnicamente fattibili e quindi verificandone gli effetti sul fabbisogno termico totale.

Nonostante il programma funzionale dei tre interventi presentasse alcune non marginali differenze, in tutti i casi considerati, una volta individuate le aree di criticità ricorrenti, le simulazioni e le verifiche hanno dimostrato che il contributo dell'involucro risulta decisivo per il successo dell'azione di riqualificazione e che l'efficacia del solo aggiornamento impiantistico risulta spesso di entità modesta e pressoché irrilevante rispetto al miglioramento delle condizioni di benessere.

Per ogni edificio considerato, il processo di definizione delle soluzioni progettuali è stato condotto per fasi successive (step) verificate passo-passo tramite il modello di simulazione, grazie al quale è stato possibile verificare i miglioramenti conseguiti.

Implementazione per step successivi

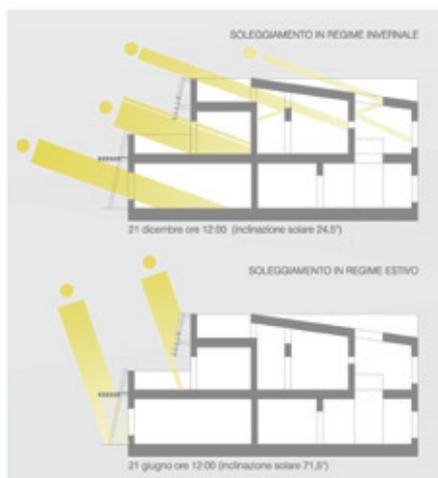
Nel caso della scuola materna di Bertinoro, la sostituzione di alcuni componenti dell'involucro, al fine di rientrare nei limiti di trasmittanza fissati dalla normativa (step 1), ha conseguito una riduzione dei consumi pari al 14% rispetto allo stato di fatto.

Lo step 2 ha quindi previsto l'abbattimento del 40% del valore di trasmittanza delle porzioni opache di involucro, tramite l'adozione di un rivestimento isolante a cappotto, e l'installazione di serramenti dotati di vetrocamera basso emissivi. In questo modo si è diminuito del 42% il fabbisogno energetico rispetto alla situazione di partenza, introducendo anche un significativo miglioramento degli apporti di luce naturale.

Lo step 3 ha previsto l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica con recuperatore di calore, al fine di controllare il grado igrometrico e il tasso di inquinamento all'interno degli ambienti, limitando le dispersioni per ventilazione, incidenti per il 37% sul consumo totale. Con questa azione, l'indice Ep si è ridotto del 57% e si è ottenuto il tasso di ricambio dell'aria prescritto dalla normativa.

Con lo step 4 si è intervenuti sulle centrali impiantistiche, riducendo il fabbisogno energetico del 71% e raggiungendo un indice Ep di 15,90 kWh/m³a (Fig. 1).

Nel secondo caso, relativo al plesso pluricomprendivo di Cesena, in cui era richiesta una quota consistente di ampliamento, lo step 1 interviene sul rapporto di forma dell'edificio, studiandone le strategie di possibile ottimizzazione. Con la soluzione prospettata dall'Amministrazione Comunale proprietaria, l'edificio ampliato presentava un rapporto S/V pari a 0,75, che ipotizzando i valori minimi di trasmittanza degli elementi di



01 | Schematizzazione dei livelli di illuminamento ottenuto all'interno delle aule (da: Bruschi e Giunchi, 2010)

Outline of the lighting levels achieved in the classrooms (From: Bruschi and Giunchi, 2010)

02 | Strategia adottata e conseguente classe energetica raggiunta
(da: Castellani e Montalti, 2009)

*Implementation strategy and consequent energy class reached
(From: Castellani and Montalti, 2009)*

03 | Il complesso scolastico di Bertinoro prima e dopo l'intervento di riqualificazione
(da: Milandri e Ugolini, 2010)

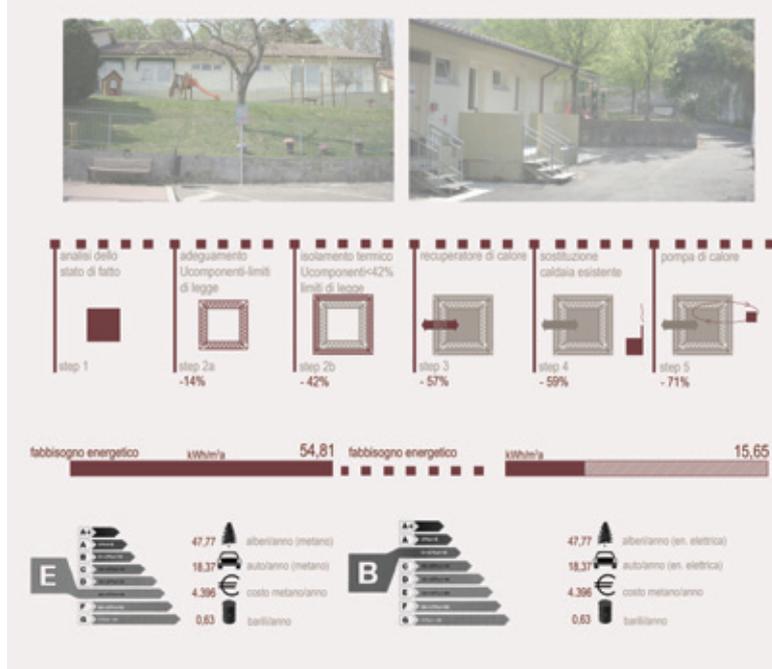
*The school complex of Bertinoro before and after retrofitting
(From: Milandri and Ugolini, 2010)*

involucro imposti dalla normativa conseguono un indice E_p tot di $51,60 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, equivalente alla classe E. Mantenendo invariate le stratigrafie di involucro, lo step 2 propone una soluzione volumetrica più compatta ($S/V=0,43$), che consente di ridurre l' E_p tot a $24,50 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, classe C. Assunta come fissata questa conformazione volumetrica, lo step 3 ha migliorato le trasmittanze di involucro rispetto ai limiti di norma, riducendo l'indice E_p tot a $15,97 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, classe B.

Nello step 4, il software di modellazione è stato impiegato per l'ottimizzazione delle dimensioni e della disposizione delle parti finestrate, in modo da configurare soluzioni in grado di rispondere alle prescrizioni normative sul comfort visivo degli ambienti interni e di caratterizzare formalmente le facciate. L'esito è un edificio scolastico ad alta efficienza energetica: E_p tot $5,08 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, classe A Emilia Romagna (Fig. 2).

Nel caso della scuola media di Bertinoro, lo step 1 prevede l'implementazione dell'involucro attraverso l'adozione sul fronte nord-ovest di un sistema di facciata leggera ventilata a montanti e traversi in legno, dotata di 20 cm di isolamento in lana di roccia e ridotte aperture vetrate, con trasmittanza di $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. I fronti sud-est vengono invece dotati di una nuova facciata leggera a montanti e traversi in legno e alluminio, in gran parte vetrata, schermata da pannelli frangisole girevoli sul loro asse verticale. In copertura è previsto l'uso di verde tecnico estensivo. Il consumo di energia viene ridotto del 55% per un valore EP pari a $28,12 \text{ kWh/m}^3\text{a}$ (classe energetica C).

Lo step 2 prevede di intervenire sulla centrale termica, portando l'indice E_p a $23,17 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, con una riduzione del consumo di energia pari al 62%. Lo step 3 interviene ulteriormente sulla dotazione impiantistica, con l'installazione di un genera-



03 |

A step-by-step approach was applied to progressively increase the energy efficiency of each building, and the performance of each specific solution was assessed through the simulation model and the levels reached and the induced effects on the building's energy balance were verified.

Step by step implementation

In the case of the Bertinoro pre-school, the replacement of some components of the building envelope, to meet the limits of thermal transmittance provided by law (step 1), resulted in a reduction in consumption equal to 14% when compared to the actual status quo. A further reduction of 40% in the envelope thermal transmittance was obtained in Step 2 through the application of an additional insulation coating and the installation of high performance windows with low

emission glazing, resulting in a 42% reduction in energy needs when compared to the original status and in an improvement of the natural lighting. Step 3 provided for the installation of a mechanical ventilation system with heat recovery, in order to ensure suitable airflows and limit the losses due to bad ventilation, responsible for about 37% of the total energy needs. This action resulted in the achievement of the air exchange rate required by law and in a reduction of the E_p index equal to 57%.

Step 4 provided for an upgrading of the heating system, resulting in a reduction in energy needs equal to 71%, reaching an E_p index of $15,90 \text{ kWh/m}^3\text{a}$ (Fig. 1).

As regards the school complex in Cesena, our case study nr. 2, a significant extension was requested by the authorities. Therefore, the optimization

of the possible volumetric patterns was studied. The extension proposed by the municipal authority increased by 0.75% the S/V ratio of the building, when compared to the actual one. For this configuration, Step 1 assumed that all components of the building envelope were achieving the minimum transmittance level required by law, with consequent E_p tot index of $51,60 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, equivalent to Class E. The same stratigraphy applied to a more compact volumetric solution ($S/V = 0,43$), as performed above, in Step 2, resulted in a reduction of the E_p tot to $24,50 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, equivalent to Class C. Step 3 provided for a further improvement of the envelope transmittance ratio of this volumetric pattern resulting in a reduction of the E_p tot index to $15,97 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, equivalent to Class B. Step 4 contemplated the use of a modeling software for the optimization

of the dimensions and the arrangement of the glazed elements in order to meet the visual comfort regulatory requirements and formally characterize the facade. This approach resulted in an energy efficient school building, with an E_p tot of $5,08 \text{ kWh/m}^3\text{a}$, equivalent to Class A for the Emilia Romagna region (Fig. 2).

For our case-study nr. 3, Bertinoro secondary school, Step 1 provided for the implementation of the building envelope through the addition of new facades. A ventilated façade on the building north-west side, provided with 20 cm of rock wool insulation and small glazed openings, resulted in a level of transmittance equal to $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. The building south-east side was also provided with a new and light ventilated façade, mostly glazed and sun shielded through screen panels swiveling on their vertical axis. An

tore a pompa di calore con recuperatore integrato, che permette di coprire sia il fabbisogno per il riscaldamento invernale, che quello per la climatizzazione estiva, portando l'indice Ep a 8,68 kWh/m³a (classe energetica B), corrispondente ad una riduzione globale del consumo di energia dell'86%. Lo step 4 prevede l'applicazione di un impianto fotovoltaico su parte della copertura, che permette di conseguire un indice Ep finale di 2,98 kWh/m³a (classe energetica A), con consumi energetici inferiori del 95% rispetto allo stato di fatto (Fig. 3).

	BUILDING 1	BUILDING 2	BUILDING 3
Type of school	Nursery + kindergarten	Kindergarten+ primary+ secondary school	Secondary school
Location	BERTINORO (FC)	CESENA (FC)	BERTINORO (FC)
EP tot current status (kWh/m ³ a)	54,81	--	61,64
EP tot step 1 (kWh/m ³ a)	47,14	51,60	28,12
EP tot step 2 (kWh/m ³ a)	31,79	23,50	23,17
EP tot step 3 (kWh/m ³ a)	23,57	15,97	8,68
EP tot final (kWh/m ³ a)	15,90	5,08	2,98
Δ EP tot %	- 71%	-90%	- 95%

TAB. 3 | Riduzione dei fabbisogno energetico ottenuta nei successivi step di intervento ipotizzati per i tre casi studio / Reduction in energy demand related to the subsequent steps of intervention on the three case studies

extensive technical green was implemented on the roof. These interventions resulted in a reduction in energy consumption of 55% equal to an EP of 28.12 kWh/m³y (Class C).

Step 2 foresaw the improvement of the heating system performance, Ep index down to 23.17 kWh/m³y, resulting in a reduction in energy consumption equal to 62%. Step 3 provided for a further improvement of the systems through the installation of a heat pump with a built-in heat recovery system, therefore meeting the needs for both winter heating and summer air-conditioning, resulting in an Ep index reduction to 8,68 kWh/m³y (Class B), corresponding to an overall reduction in energy consumption of 86%. The installation of a photovoltaic system on the roof, envisaged in step 4, allowed to achieve a final Ep index of 2.98 kWh/m³y (Class A), with a re-

duction in energy needs equal to 95% when compared to the original condition (Fig. 3).

Conclusions

The application of this methodology to real case studies provided us with a validation of an approach useful to guiding the design process towards more suitable environmental targets. As regards each design option, a definition of the effects of each decision on the building energy behaviour, in terms of energy consumption and level of indoor comfort was made possible through the application of effective diagnostic tools and of relevant software. This procedure is based on an integrated design approach, where several factors are analyzed by a multi-criteria matrix, their effects are assessed and subsequently combined and selected in order to obtain the most

Conclusioni

L'esperienza applicativa ha permesso di delineare una metodica con cui orientare la fase progettuale, grazie all'impiego di adeguati strumenti diagnostici e conoscitivi, quindi di indirizzare l'intervento di riqualificazione controllando, con l'ausilio dei software di simulazione, le ricadute che ciascuna scelta tecnologica compiuta produce sul comportamento energetico complessivo dell'edificio, non solo in termini di consumo energetico, ma anche in relazione al controllo delle condizioni di soleggiamento e ai livelli di comfort indoor.

Ne deriva un approccio integrato alla progettazione in cui i vari fattori sono analizzati secondo una matrice multicriteriale, confrontati nei loro effetti e quindi combinati in modo tale da ottenere la configurazione più favorevole (Gaspari, 2012).

Malgrado la relativa eterogeneità dei casi analizzati, l'implementazione dell'involucro esistente tramite l'applicazione di una nuova 'pelle' si propone sempre come il più efficace intervento di riqualificazione, in grado di costituire la soluzione più adeguata per integrare in modo ottimizzato isolamento, dispositivi di schermatura, serramenti, reti e terminali degli impianti di ventilazione meccanica (Fig. 4).

La verifica della fattibilità economica e della redditività degli investimenti necessari per le riqualificazioni, rispetto ai benefici che essi inducono sui futuri costi di gestione degli edifici sarà oggetto di una successiva fase della ricerca. Tuttavia, la sola applicazione di metodiche mutate dall'analisi finanziaria risulta inadeguata a formulare stime efficaci, se esse non permettono di contabilizzare nei bilanci anche i benefici indotti dal miglioramento delle condizioni di comfort e salubrità offerti dagli edifici.

beneficial solutions (Gaspari, 2012). Despite the diversity of the cases analyzed, the improvement of the energy and comfort performance of the existing school buildings through the application of a new 'skin' appears to be the most effective retrofitting action, capable of optimizing the integration of insulation, shading elements, windows and ventilation systems, as well as providing a new image to the building.

An additional benefit consists in drastically reducing the need for invasive operations on elements located inside the existing volume with consequent non operational periods for the building (Fig. 4).

The assessment of the financial feasibility and profitability of the investments required by the retrofitting actions will be the subject of further studies at a later stage of this research.

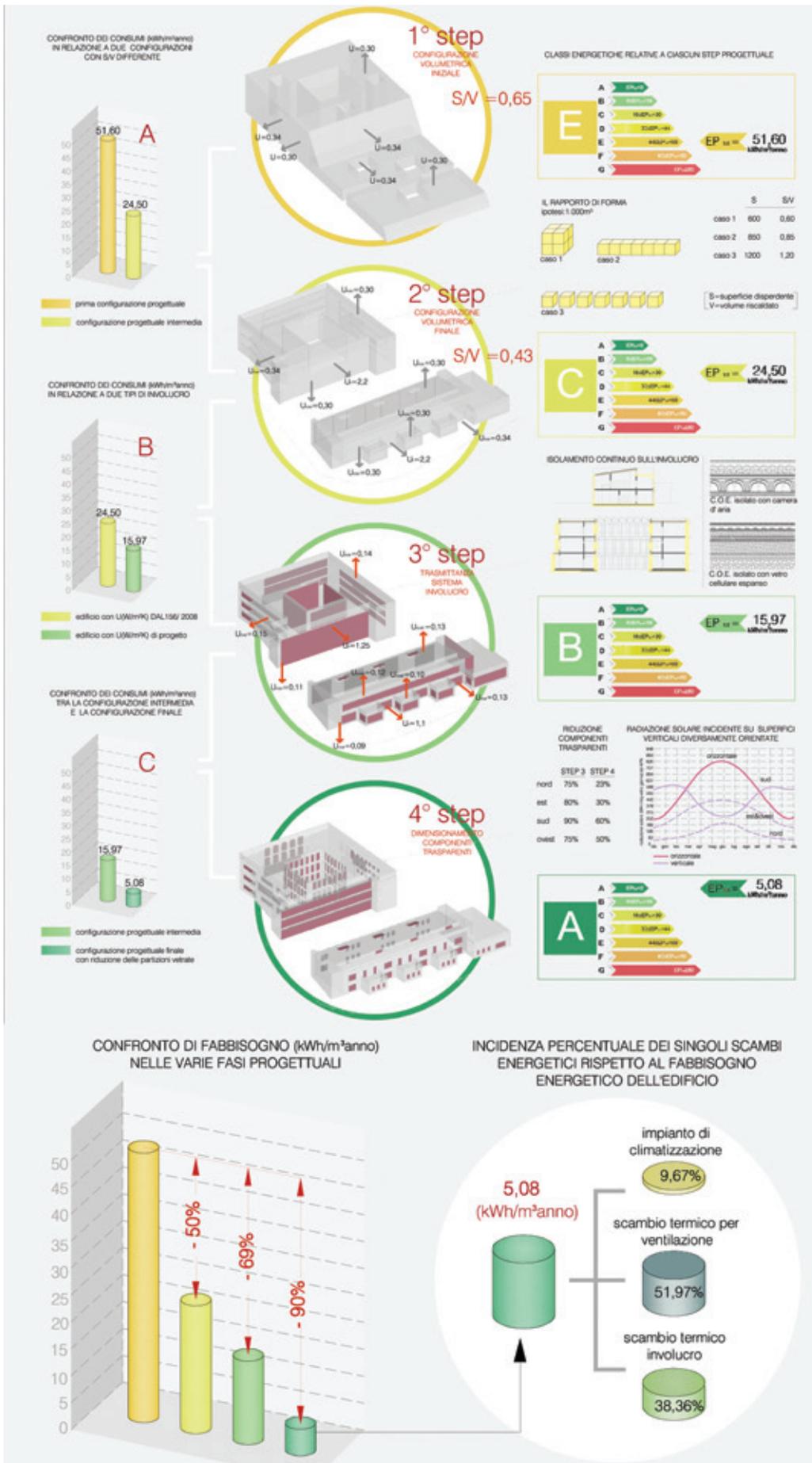
Nonetheless, the application of methods based mainly on a financial analysis appears to be insufficient for an effective evaluation if a value is not assigned to the benefits induced by the improvements in health and safety and indoor comfort conditions in the relevant balance sheets.

NOTES

¹ In September 2011, the Italian Ministry for Education (MIUR) published a first set of data (9,806 on 10,219 schools) of the Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica, a registry of public school buildings as provided by Art. 7 of Law 01/11/1996 n. 23 "Norme per l'edilizia scolastica".

² The thirteenth edition of this survey provides a set of information on a large sample of school buildings of different type throughout Italy (L'ambiente, 2012).

Reductions in energy needs resulted from the different steps of intervention (From: Bruschi and Giunchi, 2010)



NOTE

¹ La pubblicazione da parte del MIUR, a settembre 2012, di una prima serie di dati (9.806 istituzioni scolastiche su 10.219) dà tardiva applicazione al compito di redazione dell'Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica, previsto dall'art. 7 della Legge 11-01-1996 n. 23 "Norme per l'edilizia scolastica".

² L'indagine "Ecosistema scuola", giunta alla sua XIII edizione, fornisce un insieme di informazioni sulle condizioni di un esteso campione di edifici che ospitano scuole di diverso ordine e grado, in tutte le regioni italiane (Legambiente, 2012).

³ Indagini eseguite su 55 classi di 13 scuole italiane nell'ambito dello studio SEARCH (School Environment And Respiratory Health of Children) hanno registrato valori superiori agli 80 µg/m³ per le polveri sottili (PM10) e concentrazioni di formaldeide di 35 µg/m³ in media (con picchi di 100 e oltre), sensibilmente più elevate rispetto alla media delle scuole europee (Ministro della Salute, 2012).

⁴ Nel campione di scuole italiane rilevato dallo studio-pilota HESE (Health Effects of School Environment) le concentrazioni medie di CO₂ sono risultate pari a 1900 ppm. Il tasso di ricambio d'aria di 7,5 litri al secondo per persona raccomandato da ASHRAE viene raggiunto solo nel 6% delle aule (Simoni, 2010).

⁵ Misure eseguite nel 2001 in tre scuole di Torino hanno registrato concentrazioni di CO₂ sistematicamente superiori a 1800 ppm, con picchi prossimi a 3000 ppm dopo circa tre ore di permanenza degli alunni (Fontanone e Starnini, 2002).

⁶ La campagna "Accendi il risparmio" condotta nel corso del 2009 da Legambiente, Regione Veneto e Ance del Veneto, ha analizzato oltre 50 complessi edilizi pubblici ad uso scolastico valutandone stato di conservazione e comportamento energetico (Antonini, Boscolo, Cappelletti e Romagnoni, 2009).

⁷ Il programma è inquadrato nell'ambito del Laboratorio di laurea "Architettura Sostenibile", il cui staff è costituito da: Andrea Boeri (Responsabile), Ernesto Antonini, Kristian Fabbri, Andreina Milan, Tomaso Trombetti, assistiti da Francesca Dallacasa, Giulia Olivieri e Valeria Zacchei.

⁸ Per le verifiche sono stati impiegati i software Ecotect di Autodesk ed EC7 di Edilclima, validato per la certificazione energetica in ambito nazionale.

³ SEARCH (School Environment And Respiratory Health of Children) investigated 55 classes at 13 Italian schools, recording PM10 levels of more than 80 µg/m³ and formaldehyde concentration of 35 µg/m³ (with peaks of 100 and above), significantly higher than the average recommended for European Schools (Ministry for Health, 2012).

⁴ The Italian schools analyzed by the pilot study HESE (Health Effects of School Environment) shows an average concentration of CO₂ equal to 1900 ppm. The rate of air change of 7.5 liters per second per person recommended by ASHRAE is reached only in 6% of all classrooms (Simoni, 2010).

⁵ Measurements made in 2001 in three schools in Turin recorded concentrations of CO₂ systematically higher than 1800 ppm, with peaks

close to 3000 ppm after about three hours of students permanence (Fontanone and Starnini, 2002).

⁶ The campaign "Accendi il risparmio" carried out in 2009 by Legambiente Veneto, Veneto Regional Government and Ance Veneto, analyzed more than 50 public school, assessing the state of conservation and energy behaviour (Antonini, Boscolo, Cappelletti and Romagnoni, 2009).

⁷ The program is part of the Graduation Workshop "Sustainable Architecture"; the staff of the Laboratory are: Andrea Boeri (Head), Ernesto Antonini, Kristian Fabbri, Andreina Milan, Tomaso Trombetti, assisted by: Giulia Olivieri, Francesca Dallacasa and Valeria Zacchei.

⁸ The softwares used for the assessments are Autodesk "Ecotect" and Edilclima "EC7", compliant with CE-EPBD standards.

REFERENCES

Antonini, E., Boscolo, M., Cappelletti, F. e Romagnoni, P. (2009), "Riqualficazione degli edifici scolastici: risultati di una campagna di monitoraggio energetico", in AA.VV., *Atti del 4° Energy Forum*, Bressanone, Energy Forum, pp.139-143.

Antonini, E., Boscolo, M. e Romagnoni, P. (2009), "Riqualficazione degli edifici scolastici. L'esperienza della Regione Veneto", *Il progetto sostenibile*, n. 22-23, pp. 104-107.

Boeri, A., Longo, D. e Olivieri, G. (2011), "Analytical simulation tools for energy retrofitting school buildings", in *Solar Building Skins*, Munich, EF Economic Forum 2011, pp. 155-159.

Bruschi, E. e Giunchi, C. (2010), *Percorsi di sostenibilità Progetto di riqualificazione energetico-funzionale e ampliamento della scuola materna "Coccinella" a Bertinoro*, Tesi di Laurea in Architettura, Università di Bologna, A.A. 2009-10, Relatore Prof.: E. Antonini.

Castellani, M. e Montalti, V. (2009), *Progetto d'ampliamento dell'istituto comprensivo Villarco a Cesena: per-corsi verso la sostenibilità*, Tesi di Laurea in Architettura, Università di Bologna, A.A. 2008-09. Relatore Prof.:A. Boeri.

Fontanone, R. e Starnini, F. (2002), *Qualità dell'aria indoor negli edifici scolastici. Caso studio di due Scuole elementari di Torino*; Tesi di laurea in Architettura, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura 1, Relatore Prof.: G. Peretti.

Gaspari, J. (2012), *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto di recupero*, Edicomedizioni, Monfalcone (GO).

Legambiente (2012), *Ecosistema scuola 2012. XIII. Rapporto di Legambiente sulla qualità dell'edilizia scolastica, delle strutture e dei servizi*, Legambiente, Roma.

Milandri, G. e Ugolini, S. (2010), "Scatola di luce, un polo scolastico per Bertinoro: riqualificazione e ampliamento della scuola media "P. Amaducci"; Tesi di Laurea in Architettura, Università di Bologna, A.A. 2009-2010, Relatore: prof.: E. Antonini.

Ministero della Salute (2012), "La qualità dell'aria indoor nelle scuole: rischi per malattie respiratorie e allergiche - Quadro conoscitivo della situazione italiana e strategie di prevenzione. Atti del Workshop, Roma 15 dicembre 2011", *Igiene e Sanità Pubblica*, vol. LXVIII,1,2012, pp. 107-147.

Simoni, M. et al. (2010), "School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children", *European Respiratory Journal*, April 1, 2010 vol. 35 no. 4, pp. 742-749.

Tronchin, L. e Fabbri, K. (2008), "Analysis of buildings energy consumption by means of energy method", *International Journal of Exergy (IJEX)*, Vol.5, Issue 5/6 2008, pp. 605-635.