

Oscar Eugenio Bellini^a, Alessandra Marini^b, Chiara Passoni^b,

^aDipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

^bDipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università di Bergamo, Italia

oscar.bellini@polimi.it

alessandra.marini@unibg.it

chiara.passoni@unibg.it

Abstract. Il concetto di resilienza può essere applicato ai patrimoni edilizi del dopoguerra sempre più esposti a eventi sismici. Oggi si può far fronte a questa minaccia con pratiche preventive basate sull'impiego di esoscheletri adattivi: sistemi protesici che individuano un campo di sperimentazione dall'indubbio valore sociale, ambientale ed economico. Questa tecnica si basa su una progettualità che permette simultaneamente il *seismic upgrade*, il *retrofit* energetico, l'adeguamento impiantistico e il *remodelage* di quei manufatti residenziali vetusti e a elevata vulnerabilità, e obsolescenza strutturale, estetica e funzionale, sui quali la resilienza può attivare mirate politiche di preservazione della vita umana, di sostenibilità ambientale e uso razionale e scarse risorse economiche disponibili.

Parole chiave: ambiente costruito, resilienza, ciclo di vita, esoscheletro, progettazione integrata.

Alla ricerca di un nuovo equilibrio

Il *resilient thinking* sta introducendo nel mondo della ricerca elementi di innovazione concettuale e procedurale, nonché nuovi sviluppi metodologici e operativi. Gli avanzamenti più rilevanti si registrano nei contesti di una «epistemologia di confine» (Tagliagambe, 1997), dove il campo di indagine viene esplorato attraverso una narrazione multidisciplinare, capace di coinvolgere e ibridare saperi troppo spesso autoreferenziali. Ricerche che riguardano anche le modalità d'intervento per aumentare la resilienza dell'ambiente costruito, un "neoeosistema" da assumere come «organismo vivente ad alta complessità [...] in continua trasformazione, prodotto dall'incontro di eventi culturali e naturali e composto da luoghi dotati di identità, storia, carattere, struttura di lungo periodo» (Magnaghi, 2010), dove la resilienza rappresenta «*the ability of a system, community or society exposed to hazards to resist, absorb, accommodate to and recover from the effects of a hazard in*

the resilient thinking sta introducendo nel mondo della ricerca elementi di innovazione concettuale e procedurale, nonché nuovi sviluppi metodologici e operativi.

Adaptive exoskeleton systems for the resilience of the built environment

Abstract. The concept of resilience can be applied to postwar buildings, which are increasingly exposed to seismic events. Today this threat can be dealt with through preventive practices, based on the use of adaptive exoskeletons: prosthetic systems that identify a field of experimentation marked by an undoubted social, environmental and economic value. This technique is based on a design that simultaneously allows *seismic upgrade*, energy *retrofit*, plant-engineering adjustment and the *remodelage* of those structurally, aesthetically and functionally obsolete and highly vulnerable residential buildings, on which resilience can activate targeted policies aimed at the preservation of human life, environmental sustainability and the rational use of the scarce economic resources available.

Keywords: built environment, resilience, life cycle, exoskeleton, integrated design.

a timely and efficient manner, including through the preservation and restoration of its essential basic structures and functions» (UNISDR, 2009).

Per loro natura i contesti urbanizzati hanno una capacità ridotta sia di resistere agli *shock* ambientali, sia di recuperare i danni conseguenti, evidenziando spesso una resilienza bassa, scarsa o addirittura nulla. Quando un sistema ha un livello basso di resilienza perde adattabilità (Folke, 2006) e diminuisce la capacità di subire mutamenti dovuti all'esposizione a *stress* (De Sherbinin et al., 2007). La resilienza in termini di capacità di resistenza ai cambiamenti e all'auto-conservazione funzionale può trasformarsi in opportunità per riorganizzarsi (Folke, 2006): un'occasione per trasferire i risultati della ricerca dal concetto di vulnerabilità e di *risk management* ad azioni destinate alla conservazione del sistema.

Ciò interessa in particolare l'ambiente costruito, dove si rende necessaria la rivisitazione epistemologica del concetto di sostenibilità nella triplice declinazione di salvaguardia ambientale, utilizzo razionale delle risorse e benessere e salute dell'utenza. In questo modo si individua una prospettiva ermeneutica e disciplinare originale, per cui l'«*humanity might finally achieve a lasting equilibrium with our planet [...] and it looks for ways to manage an imbalanced world*» (Zollie, Healy, 2013), spingendo la scienza verso l'idea che la realtà che ci circonda non sia stabile, ma che per poterla mantenere integra si debba ricercare un nuovo equilibrio. La sostenibilità diventa allora inadeguata, in quanto interviene su un orizzonte basato sull'illusione di poter ripristinare un equi-

Looking for a new balance

Resilient thinking is introducing in the world of research elements of conceptual and procedural innovation, as well as new methodological and operational developments. The most significant advances are observed in the contexts of a «border epistemology» (Tagliagambe, 1997), where the field of investigation is explored through a multidisciplinary narrative able to involve and crossbreed a knowledge that too often is self-referential. These studies also regard the methods of intervention to increase the resilience of the built environment, a "new ecosystem" to be considered as «a highly complex living organism [...] in continuous transformation, resulting from the combination of different cultural and natural events and made of places with their own identity, history, character, long-term structure» (Magnaghi, 2010), where resilience is «the

ability of a system, community or society exposed to hazards to resist, absorb, accommodate to and recover from the effects of a hazard in a timely and efficient manner, including through the preservation and restoration of its essential basic structures and functions» (UNISDR, 2009).

By their very nature, highly urbanized contexts have a reduced ability both to resist to environmental shocks, and to recover from the resulting damages, and often present a low or poor resilience, or even no resilience at all. Having this system a low level of resilience, it loses adaptability (Folke, 2006), with a consequent regression of its ability to undergo the changes due to exposure to stress (De Sherbinin et al., 2007). Resilience, therefore, in terms of ability to resist both changes and functional self-preservation, may transform itself into an opportunity to reorganize (Folke,

librio ambientale perfetto, mentre la resilienza disegna un mondo più realistico e scientificamente corretto con cui pianificare azioni in risposta a turbamenti eco-sistemici nell'ottica di raggiungere un equilibrio ambientale (Zollie, Healy, 2013). Assunta come ambito scientifico, la resilienza diventa valore aggiunto delle azioni trasformatrici, riportando al centro del ragionamento la capacità dell'ambiente di reagire alle catastrofi (Lucarelli et al., 2017), definendo la capacità di prepararsi alla vulnerabilità e all'entità del disturbo, che deve essere assorbito prima che il sistema muti il suo stato (Walker et al., 2014).

Se applicata alle condizioni di obsolescenza in cui versa parte del patrimonio costruito, in Europa, negli anni del secondo dopoguerra, la resilienza consente di elaborare una diversa dimensione fenomenologica delle azioni di recupero da mettere in campo. Preordina ogni intervento alla necessità di controllare la fragilità strutturale del sistema, di implementare la gestione pro-attiva dei possibili rischi, di aumentare il livello prestazionale e performante e di garantire il mantenimento/recupero d'efficienza post-crisi. Ciò spinge verso pratiche preventive che riducono la vulnerabilità strutturale dovuta ad azioni sismiche, pianificando operazioni che promuovono un uso accorto e razionale delle risorse, una valorizzazione del manufatto e una salvaguardia della vita umana (Marotta, Zirilli, 2015). Interventi che rappresentano una valida alternativa alla tradizionale "rottamazione/demolizione" e trascendono la prassi dell'"abbandonare ciò che non funziona", affrancandosi dalla "cultura architettonica del nuovo" tipica dalla modernità (De Matteis, 2009). Opportunità che migliorano l'ecosistema della "città generica", eludono la contrapposizione ideologica fra moderno/antico e demolizione/conservazione (Choay, 1996) e inaugurano una "terza via" progettuale fra inter-

vento *ex-novo* e conservazione dell'esistente, che oggi si prefigura nella *Parasite Architecture*, nell'*Infill Architecture*, nel *Hybrid architecture* e nel *Remodelage* (Boeri et al., 2012; Angi, 2016).

Sul piano dei contenuti progettuali, si giunge al superamento delle modalità convenzionali che vedono la sostenibilità legata al solo miglioramento energetico, introducendo interventi anche sugli aspetti di sicurezza e stabilità strutturale connessi ai sempre più frequenti fenomeni sismici (Marini et al., 2016). La sostenibilità di un intervento risiede infatti anche nel considerare l'impatto dei danni o dei crolli causati da un possibile terremoto durante la vita utile dell'edificio che si sta riqualificando (Belleri, Marini, 2016).

Rispetto a questo scenario, e a dispetto di strategie tra loro antitetiche che vanno dalla "rottamazione" (Micelli, 2011) al "rammendo" (Piano, 2014), appare ragionevole introdurre le potenzialità del sistema individuabile e definibile come esoscheletro adattivo (Marini et al., 2017): una modalità che grazie all'impiego di forme di progettazione integrata consente di migliorare la resilienza strutturale del manufatto. Questo dispositivo migliora le caratteristiche prestazionali attraverso una protesi portante e collaborante esterna, la cui funzione non è semplicemente sismoresistente, ma è anche tecnologica, considerato che agevola la realizzazione di soluzioni "a doppia pelle integrata" (*recladding*, *overcladding*, *refitting* ecc.) con cui ottenere una nuova frontiera tra esterno e interno, per migliorare l'efficienza energetica e favorire il *restyling* architettonico (Caverzan et al., 2015) (Fig. 1). L'impiego dell'esoscheletro facilita il ripensamento morfo-tecnologico dell'esistente e permette di attivare politiche di densificazione (Antonini et al., 2011) e di rigenerazione urbana del substrato sociale e funzionale (Di Giulio et al., 2013).

2006), an opportunity to transfer research results from the concept of vulnerability and risk management to activities aimed at preserving the system. This is of particular relevance for the built environment, where we are witnessing an epistemological review of the concept of sustainability itself, in its triple declination of environmental protection, rational use of resources and well-being and health of users. This way, an original hermeneutic and disciplinary perspective can be identified, so that «humanity might finally achieve a lasting equilibrium with our planet [...] and it looks for ways to manage an imbalanced world» (Zollie and Healy, 2013), leading science towards the idea that reality is not stable, but – in order for it to be preserved – a new balance should be found.

Sustainability becomes therefore inadequate, since it operates on a horizon

based on the illusion of being able to restore a perfect environmental balance, while resilience traces a much more realistic and scientifically correct world, one with which to plan actions in response to possible eco-systemic disturbances, in the perspective of achieving an environmental balance within which its basic regulatory characteristics are preserved (Zollie and Healy, 2013). Taken as a scientific context, resilience becomes an added value of the transformative actions, bringing back at the center of the argument the environment's ability to react to disasters (Lucarelli et al., 2017), defining the ability to get ready for the vulnerability and the extent of the disturbance, which must be absorbed before the system can change its state (Walker et al., 2014).

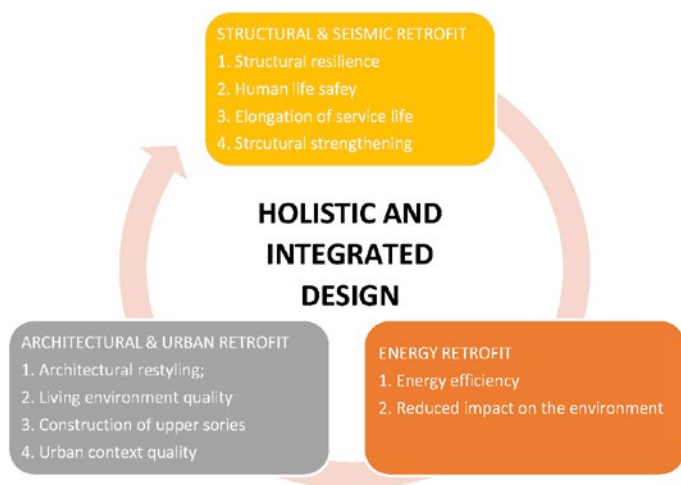
If applied to the obsolescent conditions of the post-WWII European building

stock, resiliency allows to develop a different phenomenological dimension for the recovery actions to be implemented. It subordinates any intervention to the need to check the system's structural fragility, to implement the pro-active management of the possible risks, to increase the performance level and to ensure the maintenance/recovery of a post-crisis efficiency.

This leads towards preventive practices that reduce the structural vulnerability due to seismic actions, planning operations that promote a prudent and rational use of resources, an enhancement of the building and the preservation of human life (Marotta and Zirilli, 2015). These are interventions that provide an alternative to the traditional "scrapping/demolition" and transcend the practice of "abandoning what does not work", freeing themselves from the "architectural culture of the new", typi-

cal of modern times (De Matteis, 2009). These opportunities improve the ecosystem of the "generic city", evade the ideological contrast between modern/antique and demolition/conservation (Choay, 1996) and inaugurate a "third design way", between intervention from scratch and preservation of the existing, which today is prefigured in *Parasite Architecture*, *Infill Architecture*, *Hybrid architecture* and in the *Remodelage* (Boeri et al., 2012; Angi, 2016).

As for the project contents, they go beyond the conventional methods that define sustainability as related just to energy upgrade, by introducing interventions also on the structural safety and stability aspects related – especially in Italy – to the increasingly frequent seismic phenomena (Marini et al., 2016). The sustainability of an intervention is also related to the impacts of damage and collapse due to possible



Potenzialità operative del sistema a esoscheletro

L'esoscheletro adattivo, quindi in grado di adeguarsi all'ambiente, si ispira alla struttura esterna di alcuni invertebrati, come un dispositivo che interviene sull'elemento ammalorato ripristinandone e implementandone le caratteristiche. Il suo perfezionamento si deve alle biotecnologie mediche, quale supporto protesico per la riabilitazione post-traumatica e ausilio alla deambulazione di persone con disabilità. Applicato agli edifici, si traduce in un'espansione volumetrica indipendente, definita da una struttura su fondazioni autonome, da giustapporre ai fronti, dove può ospitare nuovi spazi e fare da supporto a un nuovo involucro personalizzabile e a nuovi eventuali sopralzi dell'edificio. I livelli su cui interviene sono: strutturale, come sistema per il consolidamento statico e sismico; energetico, quale dispositivo di riduzione dei consumi e dell'impatto ambientale e di aumento del *comfort* abitativo; tipologico, in termini

L'esoscheletro adattivo, quindi in grado di adeguarsi all'ambiente, si ispira alla struttura esterna di

earthquakes during the life cycle of the retrofitted building (Belleri and Marini, 2016). Against this scenario, and despite antithetical strategies, ranging from "scraping" (Micelli, 2011) to "mending" (Piano, 2014), it seems reasonable to introduce the potential of the identifiable system, defined as adaptive exoskeleton (Marini et al., 2017): a method that – thanks to the use of integrated design forms – allows to implement the structural resilience. This device improves the performance, through an external supporting and cooperating prosthesis, which is not simply earthquake-resistant, but also technological, considering that it facilitates the realization of "double integrated skin solutions" (*recladding, overcladding, refitting* etc.) with which to obtain a new frontier between exterior and interior, in order to improve energy efficiency and promote

the architectural restyling of the building (Caverzan et al., 2015), (Fig. 1). The use of the exoskeleton facilitates the morpho-techno-typological rethinking of the existent structure and allows the activation of urban densification policies (Antonini et al., 2011) and urban regeneration of the social and functional substrate (Di Giulio et al., 2013).

The operational potential of the exoskeleton system

The adaptive exoskeleton is inspired by the external structure of some invertebrates, as a device that intervenes on the deteriorated element, restoring and implementing its characteristics. Its improvement is due to medical biotechnology, as prosthetic support for post-traumatic rehabilitation and walking aid for people with disabilities. Applied to buildings, it translates into an independent volumetric expansion,

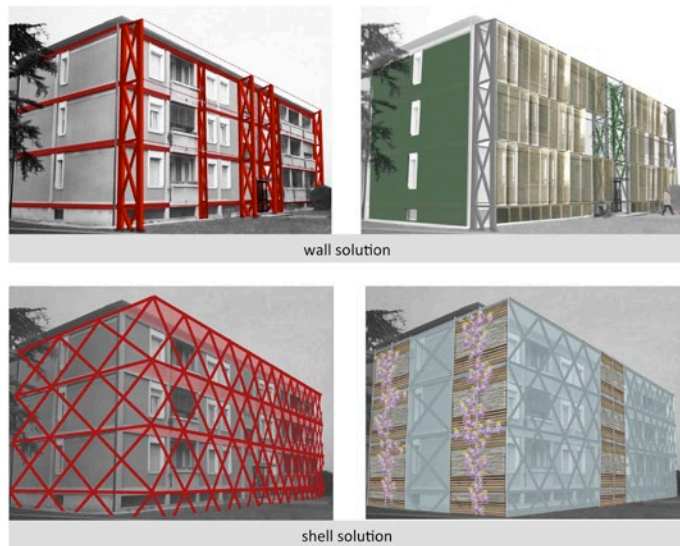
di occasione per riorganizzare e ridisegnare i tagli degli alloggi; funzionale, come opportunità per inserire nuovi connettivi verticali e orizzontali; architettonico, per il ripensamento tecnologico delle interfacce fra interno e esterno. Ciò presuppone un'analisi di fattibilità dell'intervento non di pura convenienza economica, ma anche di natura ecologica per tener conto dei "costi" ambientali derivanti da eventuale demolizione e ricostruzione (Boeri et al., 2012). In termini di eco-efficienza energetica, gli esoscheletri sono da preferire al "cantiere radicale", che demolisce per ricostruire, in quanto minimizzano fin dalle fasi iniziali della progettazione l'uso di materie prime e riducono i rifiuti di cantiere.

Le principali tecniche di rinforzo antisismico sono riassumibili nell'approccio locale, che consiste nel consolidamento della struttura con un rinforzo puntuale dei nodi del telaio, delle travi e dei pilastri (mediante placcaggio e incamiciatura) e nell'approccio globale, in cui il manufatto viene rinforzato tramite l'affiancamento di elementi sismoresistenti. Tale approccio globale può tradursi nell'aggiunta di un esoscheletro, che lavora dall'esterno in forma di doppio involucro, e può essere concepito con soluzioni tra loro alternative: l'adozione di controventi integrati all'interno dell'esoscheletro (soluzione a pareti) o, in modo innovativo, tramite una progettazione del nuovo involucro come sistema scatolare sismo-resistente (soluzione a guscio) (Fig. 2). La scelta della soluzione strutturale dipende dalla rigidità iniziale dell'edificio e può essere concepita come sovra-resistente o dissipativa. La soluzione scatolare permette di contenere le sollecitazioni negli elementi, riducendo quindi lo spessore della nuova pelle, e di impiegare elementi studiati ad-hoc per rispondere al duplice obiettivo di migliorare l'efficienza energetica e la sicurezza dell'edificio. Le soluzioni a pareti contemplano ad

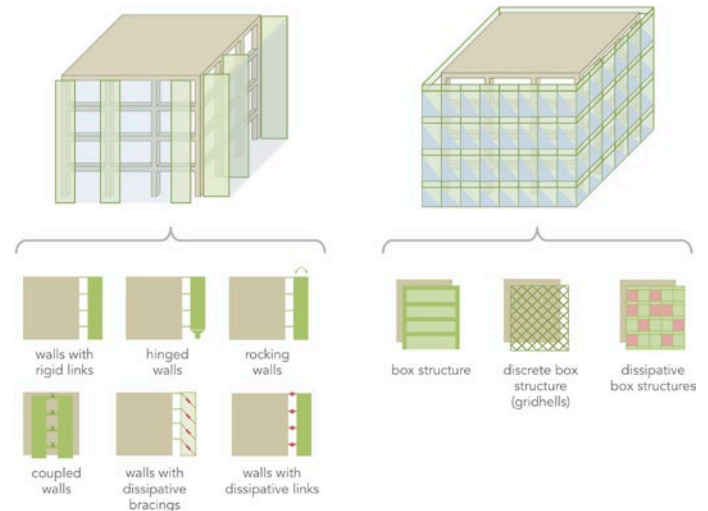
defined by a structure of autonomous foundations, to be juxtaposed to the fronts, where it can accommodate new spaces and act as a support to a new customizable covering and to possible additional floors. The intervention levels are: structural, as a system for static and seismic strengthening; energy, as a device used to reduce consumption and the environmental impact and to increase the living comfort; typological, in terms of opportunity to reorganize and redesign the housing sizes; functional, as an opportunity for the inclusion of new horizontal and vertical connections; and architectural, for the technological rethinking of the interface between inside and outside. This requires a feasibility analysis of the intervention, not only for an economic, but also for an ecological convenience, in order to take into account, the environmental "costs" resulting from

any demolition and reconstruction (Boeri et al., 2012). In terms of energy eco-efficiency, exoskeletons are to be preferred to the "radical construction site" – which demolishes in order to reconstruct – since they minimize, from the initial stages of the design, the use of raw materials and reduce yard waste. The main techniques for the aseismic reinforcement are summarized in the local approach, which consists in the consolidation of the structure with a punctual strengthening of the frame nodes, beams and pillars (by means of jacketing and wrapping) and in the global approach, in which the building is retrofitted through the addition of earthquake-resistant elements. As for the latter, an exoskeleton structure may be added to the building, which works from the outside in the form of a double skin. This can be designed in two alternative ways: integrating additional

02 | Esempio di due modalità per il retrofit di edificio mediante esoscheletro adattativo: soluzione a parete e a guscio
Example of two possible retrofits of the existing building by an adaptive exoskeleton: wall and shell solutions



03 | Possibili soluzioni di rinforzo strutturale: soluzione a parete e a guscio
Possible structural retrofit solutions: wall and shell solutions.



esempio l'uso di setti di controvento con collegamenti rigidi o dissipativi, controventi dissipativi, pareti incernierate alla base, pareti *rocking* o pareti sismiche adattive. Il guscio comporta la realizzazione di una nuova pelle, un diaframma in cui la struttura della facciata diventa elemento sismoresistente (es. *upgrade di gridshell e curtain wall* o rivestimento con pannelli resistenti) (Fig. 3) (Marini et al., 2016).

Tali tecniche, integrandosi e sovrapponendosi su base olistica, producono ricadute e benefici a vari livelli (Fig. 4): favoriscono l'*up-cycling* della struttura dell'edificio; migliorano la resistenza e la resilienza sismica; riducono l'impatto ambientale associato al rischio sismico; incrementano il valore immobiliare; proteggono sul lungo termine l'investimento economico; riducono il costo della ristrutturazione in seguito all'aumento della resilien-

bracing walls within the exoskeleton (walls solution) or by designing the exoskeleton itself as an earthquake-resistant box-shaped system (shell solution) (Fig. 2). The choice of the structural solution depends on the initial stiffness of the building and may be conceived as over-resistant or dissipative. The box-shaped solution allows the reduction of the stresses in the elements, by reducing the thickness of the additional skin, and the adoption of ad-hoc elements with the double objective of improving energy efficiency and safety.

The walls solutions include, among others, the use of braces or walls with rigid or dissipative connections, walls hinged at the base, rocking walls, adaptive seismic walls, dissipative braces. The shell solution involves the creation of a new skin, a diaphragm in which the entire façade structure becomes an

earthquake-resistant element (eg. upgrade of gridshell and curtain wall or coating with resistant panels) (Fig. 3) (Marini et al., 2016).

These techniques, integrating and overlapping on a holistic basis, produce effects and benefits at various levels (Fig. 4): they promote the up-cycling of the building structure; improve seismic resistance and resilience; reduce the environmental impact associated with the seismic risk; increase real estate value; protect the long-term economic investment, which could be compromised by the damage caused by earthquakes; reduce the cost of restructuring due to increased resilience; ensure the coexistence in a single construction site of the architectural, structural and energy renovation; cancel the costs for the relocation of the residents during work, by intervening from the outside; allow the addition or expansion of the hous-

ing (rooftop, addition, etc.), thanks to new indoor and outdoor surfaces, the sale of which can partially compensate the renovation costs; promote urban densification policies, through volumetric expansions, by reducing the consumption of land; allow the morpho-techno-typological redefinition of the building, that can be redesigned in its vertical and horizontal connecting elements; promote urban regeneration; create more pleasant, sustainable and resilient environments (Marini et al., 2017).

To increase the environmental value of the renovation, it is necessary to reconsider the operational approaches within the "life cycle thinking", aiming at maximizing performance and minimizing the impacts and environmental costs of the building life cycle (Fig. 5). In order to obtain this, the involvement of the required skills is

necessary since the very first steps of the project, through multidisciplinary goals. In addition to protecting the static aspects and the monitoring of the borderline states of the system (adopting a "Performance-based design"), the structural design – in a life cycle design perspective – governs the choice of materials – eco-efficient and recyclable – and technologies – prefabricated, dry, repairable and adaptable – according to principles of minimization of the environmental and economic impacts (life cycle assessment and life cycle costs), implementing the concepts of sustainability and resilience of the system.

The adaptive exoskeleton: a new challenge for a resilient technological design
 Compared to the resilience of the building assets exposed to seismic risks, the exoskeleton promotes a new

Per aumentare le valenze ambientali della ristrutturazione è utile riconsiderare le tecniche e gli approcci operativi in base al *life cycle thinking*, puntando alla massimizzazione delle prestazioni

The adaptive exoskeleton: a new challenge for a resilient technological design

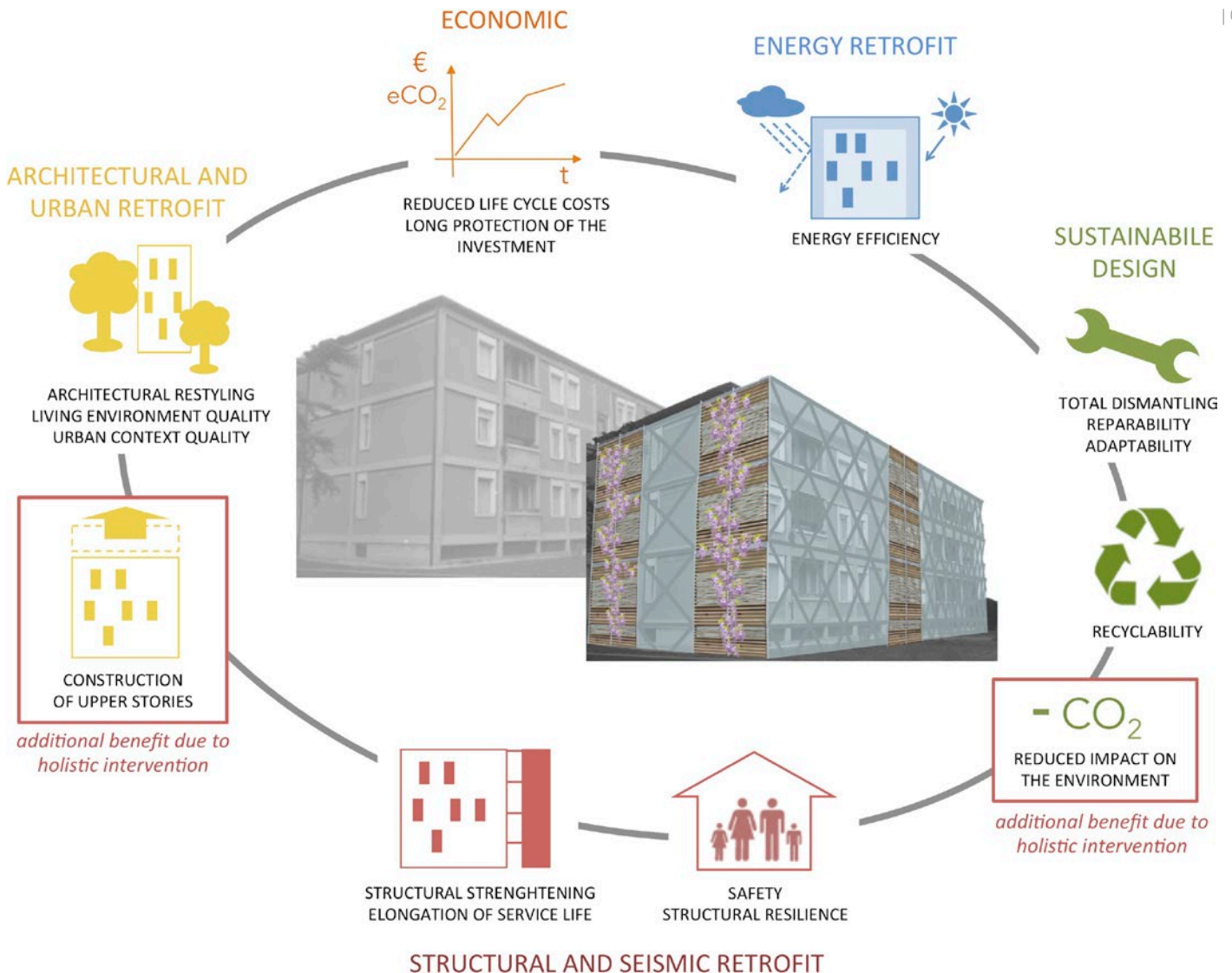
Compared to the resilience of the building assets exposed to seismic risks, the exoskeleton promotes a new

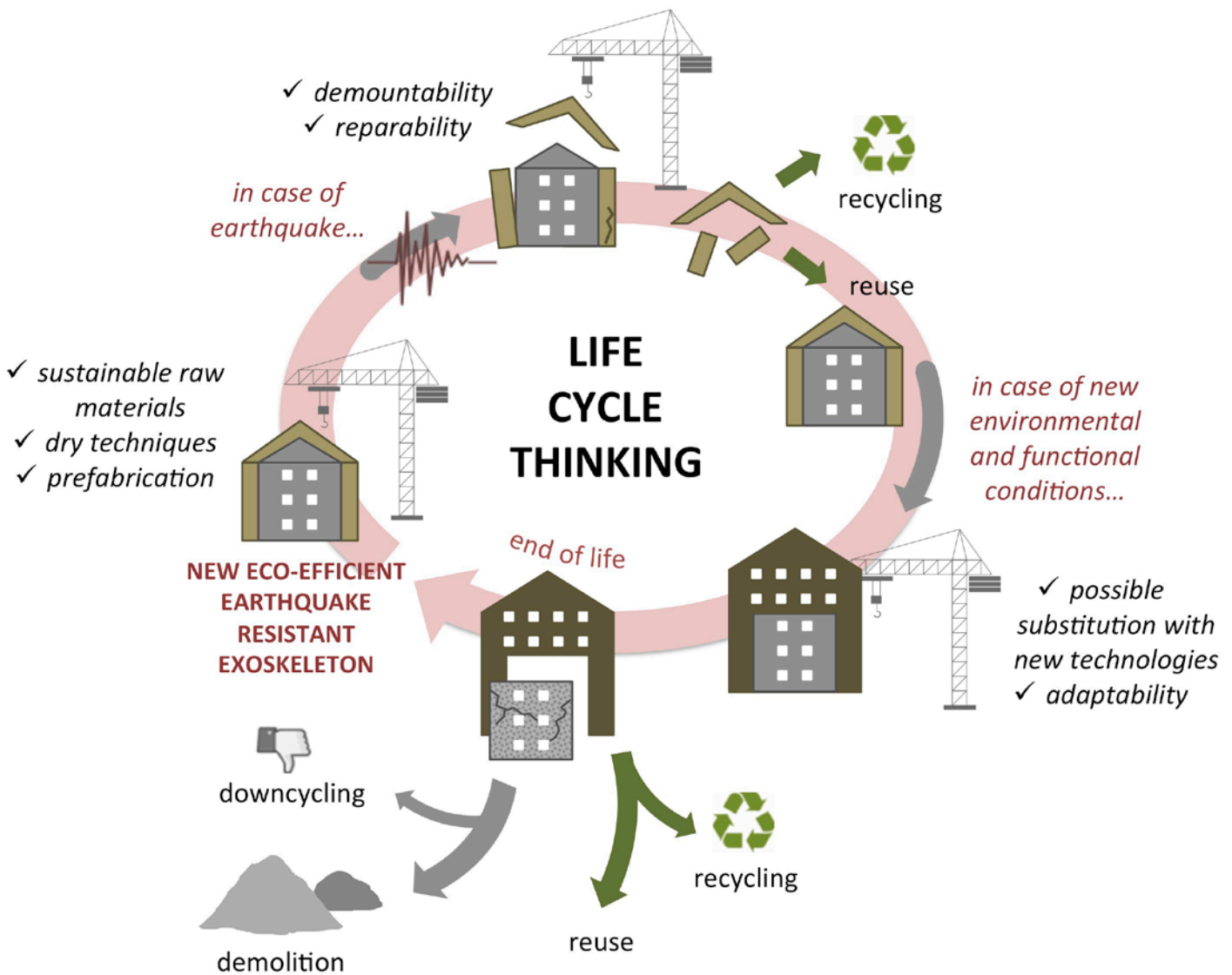
e minimizzazione degli impatti e dei costi ambientali del ciclo di vita dell'edificio (Fig. 5). Per ottenere ciò è necessario il coinvolgimento delle competenze necessarie sin dalle prime fasi di progetto, attraverso obiettivi multidisciplinari. La progettazione strutturale, in un'ottica *life cycle design*, oltre a salvaguardare gli aspetti statici e di controllo degli stati limite del sistema (garantiti mediante *Performance based-design*), guida la scelta dei materiali, eco-compatibili e riciclabili, e delle tecnologie, prefabbricate, a secco, facilmente smontabili, riparabili e adattabili, secondo principi di minimizzazione delle ricadute ambientali ed economiche (*life cycle assessment* e *life cycle costs*), implementando i concetti di sostenibilità e resilienza del sistema.

**L'esoscheletro adattivo
 nuova sfida per una
 progettazione tecnologica
 resiliente**

adaptive reuse di un manufatto risulta possibile solamente a partire da interventi finalizzati a dare risposte adeguate per azzerare la vulnerabilità strutturale dovuta ad azioni sismiche. Intervendo sulla *firmitas*, l'esoscheletro promuove in modo sistematico lo *structural & seismic retrofit*, a cui fa seguire l'*energy retrofit* e l'*architectural & urban retrofit*, secondo una sequenza processuale che porta non solo al miglioramento delle *performance* del

Rispetto alla resilienza dei patrimoni edilizi esposti a rischi sismici, l'esoscheletro promuove una nuova cultura di processo e di progetto, in quanto l'effettivo





process and project culture, since the actual adaptive reuse of a product is possible only starting from interventions aimed at giving answers suitable to cancel the structural vulnerability due to seismic actions. Intervening on the *firmitas*, the exoskeleton promotes in a systematic way the structural & seismic retrofit, which is followed by the energy retrofit and the architectural & urban retrofit, according to a procedural sequence which leads not only to the implementation of the performance of the built element, but also to the possible participative involvement of the user, after the implementation of adequate sociological skills, which are essential to ensure an urban and social regeneration (Di Giulio, 2013). Among the skills to use alongside the engineering sciences, there are those pertaining to the methodological-design rudiments of Architectural

Technology, by virtue of the ability of the latter to consider the project as a research and the research as a project (Losasso, 2011, 2014). The application of this system allows, even date, an in-progress research and experimentation activity, within a definitional framework not completely formalized, which is measured with a designing skill able to interact simultaneously with multiple technological units of the building organism: structure, vertical and horizontal closures, external and internal partitions etc. (Fig. 6). Considering that «architectural technology is the realization of architecture through the application of building science, forming the constructive link between the abstract and the physical [...] it is a way of thinking and a way of acting» (Emmit, 2013), resilience becomes the context in which the design idea and its realization connect

with the formal and structural notion, by reason of a technological mastery, which becomes a critical methodological and operational precondition. This leads to the opening of disciplinary discretizations with which to deal with the complexity of the reconfiguration processes of the existing structure and to direct and coordinate, in a dynamic and inter-systemic way, the transformations of the built environment from the building to the landscape scale (Angelucci et al., 2015). Searching for balances that enhance the capability for resilience, adaptation and mitigation with respect to the environmental issues. Resilience requires an advance in terms of content, meaning and the processes related to project developments, whereby the socio-ecological aspect requires, for example, a methodological and disciplinary realignment in the

relationship between living space and construction technology. This requires new methodological openings and the redefinition of the theoretical-applicative systemic foundations of the design of the existing structure, as a radical and systemic process of technological and environmental transformation, in which man, nature, buildings and society interact. “Responsiveness”, “Adaptability” and “Transformability” become design process paradigms for an approach, which identifies different necessities and needs, promoting an exigential performance and inter-scalar dimension, of ecological, environmental, but also organizational-procedural and technological-spatial nature (Angelucci et al., 2013). New interventions should follow a logic that subordinates the transformation of the existing structure to the assessment of the environmen-

06 | Il "Sistema esoscheletro" è composto da un insieme di elementi tecnici che appartengono a diverse unità tecnologiche: struttura, chiusure verticali esterne, chiusure orizzontali e sistema di progettazione impianti (Guidolin, 2016)

The "exoskeleton system" is composed by a set of technical elements that belong to different technological units: the structure, external vertical closures, horizontal closures and plant design system (Guidolin, 2016)

costruito, ma al possibile coinvolgimento partecipativo dell'utenza, previa messa in campo di appropriate competenze sociologiche, indispensabili per garantire una rigenerazione urbana e sociale (Di Giulio, 2013).

Tra le abilità da affiancare alle scienze ingegneristiche, ci sono quelle che attonano ai fondamenti metodologico-progettuali della Tecnologia dell'architettura, in virtù della capacità di intendere il progetto come ricerca e la ricerca come progetto (Losasso, 2011, 2014). L'applicazione di questo sistema permane tutt'oggi un'attività di ricerca e sperimentazione *in progress*, all'interno di un quadro definitorio non completamente formalizzato, che si misura con una progettualità che interagisce simultaneamente con più unità tecnologiche dell'organismo edilizio: struttura, chiusure verticali e orizzontali, partizioni esterne e interne ecc. (Fig. 6).

Considerato che l'«*architectural technology is the realization of architecture through the application of building science, forming the constructive link between the abstract and the physical [...] it is a way of thinking and a way of acting*» (Emmit, 2013), la resilienza diventa l'ambito nel quale idea progettuale e realizzazione si rinsaldano con la concezione formale e strutturale, in ragione di una padronanza tecnologica che diventa preconditione metodologico-operativa fondamentale.

Ciò porta all'apertura di discretizzazioni disciplinari con cui affrontare la complessità dei processi di riconfigurazione dell'esistente, indirizzare e coordinare in modo dinamico e intersistemico le trasformazioni del costruito, dalla scala del manufatto a quella paesaggistica (Angelucci et al., 2015), ricercando equilibri che esaltino la capacità di resilienza, adattamento e mitigazione rispetto alle criticità ambientali.

La resilienza richiede un avanzamento nei contenuti, significati e processi legati agli sviluppi progettuali, in cui la declinazione socio-ecologica richiede un riallineamento metodologico e disciplinare nei rapporti fra spazio abitativo e tecnologie costruttive. Ciò richiede nuove aperture metodologiche e la ridefinizione dei fondamenti sistemici teorico-applicativi del progetto, quale processo di trasformazione tecnologico-ambientale radicale e sistemico, nel quale interagiscono uomo, natura, manufatti e società. *Responsiveness*, *Adaptability* e *Transformability* diventano paradigmi processuali e progettuali per un approccio con cui indentificare una differente classe di necessità e bisogni, promuovendo una dimensione esigenziale, prestazionale e interscalare, non solo di natura ecologica e ambientale, ma anche organizzativo-procedurale e tecnologico-spaziale (Angelucci et al. 2013). I nuovi interventi dovrebbero così seguire una logica che subordina la trasformazione dell'esistente alla verifica di requisiti di *Responsiveness* ambientale, cioè l'adattamento dinamico dell'ambiente costruito per sostenere nel tempo le trasformazioni antropiche e naturali, e che rispetti il criterio di compatibilità con le risorse ecologiche, energetiche, sociali ed economiche disponibili. Alla *Responsiveness* va aggiunta l'*Adaptability* del sistema organizzativo-procedurale, quale insieme delle condizioni di intervento coordinato, integrato e interscalare, per la valorizzazione delle variazioni di adattamento al cambiamento e di accettazione delle innovazioni da parte degli attori (utenti, progettisti ecc.) attivi nei processi di trasformazione dell'ambiente costruito. A ciò si uniscono i requisiti di *Transformability* tecnologico-spaziali, ovvero del rispetto delle condizioni di rispondenza dinamica di spazi e soluzioni tecniche alla variabilità delle richieste prestazionali sottese alla riqualificazione, per garantire adeguati livelli di



| 06

correlazione con i fattori topologici, antropologici e tecnologici dell'ambiente costruito.

Conclusioni

L'inderogabile necessità di promuovere il rinnovamento e la riqualificazione sostenibile del costruito sta indirizzando la ricerca e in parte la didattica (Fig. 7), verso soluzioni performanti ed efficaci, che non contempiono la demolizione *tout court* dei manufatti, ma ne promuovono la valorizzazione. Oggi è possibile intervenire sull'esistente con strategie innovative, che avvalendosi di approcci integrati danno risposte versatili e polivalenti ai problemi di obsolescenza, vulnerabilità e resilienza, impiegando tecniche che vanno oltre gli interventi "episodici e puntuali" e allungano il ciclo di vita utile del costruito.

Il *seismic upgrade* con sistema a esoscheletro è una soluzione che innova il *maquillage* architettonico, per sostenere uno sviluppo equo e sostenibile basato sulla prevenzione e il *risk management* connesso a eventi sismici imprevedibili. Una modalità per tenere nella giusta considerazione gli ormai imprescindibili aspetti di sicurezza strutturale e integrità fisica dell'utenza. Lo *structural & seismic retrofit* con esoscheletro, applicato dall'esterno, mette in sicurezza il manufatto, introduce uno sviluppo sostenibile, si integra con l'*energy retrofit*, per migliorare il dato ambientale e concludersi con l'*architectural & urban retrofit*. Una strategia che consente ampliamenti volumetrici, mitigazioni del *deficit* strutturale, implementazione del *comfort* ambientale, riorganizzazione dei sistemi distributivi, allungamento del ciclo di vita, controllo dei tempi di cantiere, introduzione di principi di industrializzazione edilizia, possibilità di mantenere *in loco* gli occupanti, implementazione dell'eco-efficienza, riduzione dell'im-

tal "Responsiveness" requirements, as a dynamic adaptation of the built environment to support, over time, the anthropic and natural changes, and respects the compatibility criteria with the available ecological, energy, social and economic resources. Organizational-procedural "Adaptability" should be added to Responsiveness, as a set of conditions for a coordinated, integrated and inter-scalar intervention, for the enhancement of the variations in the adaptation to change and acceptance of innovations by different actors (users, designers, etc.) of the transformation of the built environment. This is integrated by the technological-spatial "Transformability" requirements, as a set of conditions for a dynamic responsiveness of spaces and technical solutions to the variability of the performance requirements required by the requalification, in order to ensure adequate

levels of correlation with the topological, anthropological and technological factors of the built environment.

Conclusions

The imperative need to promote the renewal and the sustainable requalification of the built environment is directing scientific research and partly the didactics (Fig. 7), towards solutions as much efficient and effective as possible, which do not provide for the outright demolition of the building but promote, at all levels, its enhancement. Today it is possible to intervene on the existing structure with innovative strategies which, making use of integrated design approaches, give versatile and multipurpose answers to the issues of resilience, using techniques that go beyond the "episodic and timely" interventions and extend the useful life cycle of the built environment.

patto ambientale della ristrutturazione e soddisfacimento degli obiettivi di adattabilità, manutenibilità, riparabilità, smontabilità e riciclabilità.

Un approccio sistemico che, partendo dal dato strutturale, incrementa il livello di resilienza del manufatto, attivando approcci multidisciplinari, transdisciplinari e multiscalari, per cui l'obsolescenza diventa opzione per far convergere, con pari dignità, attori dalle competenze individuate, sovrapponibili e integrabili. Una processualità nella quale la Progettazione tecnologica assume carattere strategico, a partire da una rinnovata ipotesi interpretativa prestazionale-esigenziale, che porta al superamento dell'intervento sul costruito come risposta specifica e temporalmente circoscritta a problemi localizzati. Ciò in un quadro in cui si attivano azioni programmatiche, decisionali, trasformative e gestionali, con interdipendenze che coinvolgono dimensione individuale e collettiva e fanno convivere strategie di mantenimento, rigenerazione e adattamento degli oggetti, delle risorse e degli individui.

Per promuovere un patrimonio edilizio "ecologicamente resiliente", diventa basilare l'assunzione di un nuovo schema teorico e pratico, progettuale e processuale, critico e operativo, che - secondo l'ecologista Stanley Holling, pioniere della resilienza (Holling, 1973) - dà risposte adeguate a eventi caotici, non lineari, al di là dei parametri stretti della "resilienza ingegnerizzata", ma al medesimo tempo definisce un sistema "antifragile", in grado di imparare e trarre beneficio dal disordine, ricercando un nuovo equilibrio (Taleb, 2013).

The seismic upgrade with an exoskeleton system is a solution that innovates the architectural make-up, to support an equitable and sustainable development based on the prevention and the risk management connected to unexpected seismic events. A way to take into due consideration the now unavoidable aspects of structural safety and physical integrity of the users. The structural and seismic retrofit with exoskeleton secures the building, introduces an equitable and sustainable development, based on prevention and risk management related to unexpected earthquakes, integrates with the energy retrofit, to improve environmental sustainability, and ends with the architectural and urban retrofit. A strategy that simultaneously allows for volumetric expansions, mitigation of structural deficits, implementation of the environmental comfort, reorganization of

the distribution systems, extension of the life cycle of the building, control of the construction site times, introduction of the principles of construction industrialization, possibility of maintaining the occupants on site, implementation of eco-efficiency, reduction of the environmental impact of restructuring and meeting of the objectives of adaptability, maintainability, reparability, disassembly and recyclability.

A systemic approach that, starting from the structural data, implements the resilience level of the building, activating multidisciplinary, trans-disciplinary and multi-scalar approaches, whereby obsolescence becomes an option on which to converge, with equal dignity, actors with identified, overlapping and integrated expertise. A process in which the Technological Design assumes a strategic character, starting from a renewed performance-exigen-



cial interpretation hypothesis, which leads to the overcoming of the intervention on the built environment as a specific response, temporally circumscribed to localized problems. This in a framework in which programmatic, decisional, transformative and managerial actions are activated, with interdependencies that involve an individual and collective dimension and bring together strategies for the maintenance, regeneration and adaptation of objects, resources and individuals.

In order to promote an “ecologically resilient” housing, the adoption of a new theoretical and practical, critical and operational, layout for design and process which – according to ecologist Stanley Holling, pioneer of resilience (Holling, 1973) – gives adequate responses to chaotic, non-linear events, beyond the narrow parameters of “engineered resilience”, but at the same

time defines an “anti-fragile” system, able to learn and benefit from the disorder, seeking a new equilibrium (Taleb, 2013).

REFERENCES

- Angelucci, F., Di Sivo, M. and Ladiana, D. (2013), "Responsiveness, Adaptability, Transformability: the new quality requirements of the built environment", *Techne*, No. 5, pp.53-59.
- Angelucci, F., Braz, R. Afonso, R., Di Sivo M. and Ladiana, D. (2015), *The Technological Design of Resilient Landscape. Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente*, FrancoAngeli, Milano.
- Angi, B. (Eds.) (2016), *Eutopia urbana/Eutopia Urbanscape*, LetteraVentidue, Siracusa.
- Antonini, E., Gaspari, J. and Olivieri, G. (2011), "Densifying to upgrading: strategies for improving the social housing built stock in Italy", *Techne*, No. 4, pp. 306-314.
- Belleri, A. and Marini, A. (2016), "Does seismic risk affect the environmental impact of existing buildings?", *Energy and Buildings*, Vol. 110, No. 1, pp. 149-158.
- Boeri, A. and Longo, D. (2012), "From the Redevelopment of High-density Suburban Areas to Sustainable Cities", *Architectoni.ca*, Vol. 2, pp. 118-130.
- Choay, F. (1996), "De la démolition", in Foster, B. (Ed.), *Métamorphoses parisiennes*, Mardaga, Paris, FR.
- Caverzan, A., Lamperti Tornaghi, M. and Negro, P. (2016), "Taxonomy of the redevelopment methods for non-listed architecture: from façade refurbishment to the exoskeleton system", *JRC, Conference and workshop Reports, Proceedings of Safesust Workshop*, Ispra, November, pp. 26-27.
- De Matteis, F. (2009), *Architettura in trasformazione*, FrancoAngeli, Milano
- De Sherbinin, A., Schiller, A. and Pulsipher, A. (2007), "The vulnerability of global cities to climate hazards", *Environment Urbanization*, Vol. 19, No. 1, pp. 39-64.
- Di Giulio, R. (2013), *Paesaggi periferici. Strategie di rigenerazione urbana*, Quodlibet Studio, Città e Paesaggio, Macerata.
- Emmitt, S. (2013), *Architectural Technology: research and practice*, Wiley-Blackwell, Oxford, UK.
- Folke, C. (2006), "Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses", *Global Environment Change*, Vol. 16, No. 3, pp. 253-267.
- Guidoli F. (2016), "Taxonomy of the redevelopment methods for non-listed architecture: from façade refurbishment to the exoskeleton system", in Alesio Caverzan A., Lamperti Tornaghi M. and Paolo Negro P. (eds), *A roadmap for the improvement of earthquake resistance and eco-efficiency of existing buildings and cities*, Proceedings of SAFESUST Workshop Joint Research Centre, Ispra November 26-27, 2015, pp.97-102.
- Holling, C.S. (1973), "Resilience and stability of ecological systems" *Annual Review of Ecology and Systematics*, No. 4, pp. 1-23.
- Losasso, M. (2011), "Il progetto come prodotto di ricerca scientifica", *Techne*, No. 2, pp. 78-85.
- Losasso, M. (2014), "La ricerca tecnologica per l'architettura: fondamenti e avanzamenti disciplinari", in Claudi de Saint Mihiel, A. (Ed.), *Tecnologia e progetto per la ricerca in Architettura*, Clean, Napoli, pp. 7-14.
- Lucarelli, M.T., D'Ambrosio, V. and Milardi, M. (2017), *Resilienza e adattamento dell'ambiente costruito. Architettura, Città e Territorio verso la Green Economy*, Edizioni Ambiente, Milano, pp. 186-201.
- Magnaghi, R. (2010), *Il progetto locale*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Marini, A., Passoni, C., Belleri, A., Feroldi, F., Preti, M., Metelli, G., Riva, P., Giuriani, E. and Plizzari, G. (2017), "Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: a proof of concept", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-20.
- Marini, A., Passoni, C., Belleri, A., Feroldi, F., Preti, M., Riva, P. and Plizzari, G.A. (2016), "Need for coupling energy refurbishment with structural strengthening interventions", in Angi, B. (Ed.), *Eutopia Urbanscape. The combined redevelopment of social housing*, pp. 83-115.
- Marotta, N. and Zirilli, O. (2015), *Disastri e Catastrofi. Rischio, esposizione, vulnerabilità e resilienza*, FrancoAngeli, Milano.
- Micelli, E. (2011), *La gestione dei piani urbanistici*, Marsilio, Venezia.
- Piano, R. (2014), *Il rammendo delle periferie*, Il sole24ore.
- Tagliagambe, S. (1997), *Epistemologia del confine*, Il Saggiatore, Milano.
- Taleb, N.N. (2013), *Antifragile. Prosperare nel disordine*, Il saggiatore, Milano.
- UNISDR (2009), "Terminology on Disaster Risk Reduction", available at: <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/7817> (accessed 19 December 2017).
- Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S. and Kilzig, A. (2004), "Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems", *Ecology and Society*, Vol. 2, No. 9, available at: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5> (accessed 20 December 2017).
- Zollie, A. and Healy, A.M. (2013), *Resilience: Why Things Bounce Back*, Simon & Schuster, New York, USA.