

## vi. CONCLUSIONI

È giunta l'ora di trarre le dovute conclusioni al termine di questa Tesi. Non è semplice riassumere in poche righe tutto il lavoro svolto ma è comunque doveroso fare alcuni ragionamenti.

Durante questi mesi è stato fatto tutto quello che ci si era riproposti di fare mesi prima e può essere affermato con certezza che gli obiettivi iniziali che ci si era posti sono stati soddisfatti. Di particolare interesse è stato lo sviluppo della Tesi stessa, che grazie alla natura dell'argomento trattato, i metodi multicriterio, ha permesso di andare a toccare numerose tematiche di attualità, quali le valutazioni ambientali, economiche e prestazionali.

Il contributo originale di questo lavoro di Tesi è dato dal fatto che questo sistema **permette di analizzare, sintetizzare e valutare parametri** che sarebbero altrimenti considerati separatamente; è quindi un ottimo strumento di sintesi e di gestione delle alternative progettuali, sia in fase di progettazione di una nuova costruzione sia durante la di riqualificazione dell'esistente. In aggiunta a questo, il metodo è stato **utilizzato in combinazione con i più attuali metodi e strumenti di analisi e simulazione**, che verranno in seguito valutati con maggiore dettaglio.

È importante notare anche il fatto che il metodo SMCAM è stato creato in linea con le normative sulla Sostenibilità che attualmente stanno evolvendosi e, grazie alla sua **flessibilità**, permette di essere modificato con semplicità, inserendo o eliminando parametri e criteri e variando l'importanza dei requisiti attraverso il sistema di pesatura. L'innovazione non sta quindi soltanto nell'utilizzo di metodi o strumenti di analisi ma anche nella **semplicità di gestione dei dati**, sia in ingresso sia in uscita, e nella **possibilità di adattare il metodo agli sviluppi normativi**.

Andando maggiormente in dettaglio, il **tema principale** della Tesi è stato lo studio dello stato dell'arte sui metodi multicriterio, la **creazione di un metodo** incentrato sulla valutazione del livello di Sostenibilità e la sua successiva **validazione** tramite l'applicazione a due casi di studio: un edificio esistente e un progetto di nuova costruzione.

Il **metodo SMCAM**, nato dalla necessità di confrontare parametri afferenti a diverse sfere ma comunque strettamente collegati, ha permesso di gestire in maniera chiara e veloce sia le informazioni in ingresso sia quelle in uscita, permettendo di modificare i dati, aggiornandoli in tempo reale in base alle modifiche intervenute.

Questa risorsa, che si è rivelata fondamentale, è nata dalla necessità di modificare in corso d'opera i valori, via via che si pensavano nuove alternative o che si raccoglievano nuovi dati, soprattutto per quanto riguarda l'edificio esistente.

Il metodo SMCAM ha permesso di confrontare i risultati di analisi LCA, LCC e comfort interno mantenendo allo stesso tempo i corretti rapporti di importanza tra le varie componenti

attraverso i pesi; questi ultimi, ricavati tramite un **questionario on-line**, hanno anche permesso di capire come la Sostenibilità viene vista da Professionisti, esperti del settore e neolaureati.

Le analisi di Sostenibilità eseguite sui due casi di studio hanno permesso di testare il metodo su interventi realmente realizzabili, mettendo in luce alcune problematiche, quali la **normalizzazione dei parametri**, la loro corretta valutazione e la **stesura finale delle classifiche**.

I due casi di studio sono principalmente serviti a validare il metodo SMCAM ma le conclusioni a cui si è giunti sono realmente molto interessanti: nel caso della Nave sono state evidenziate le problematiche maggiori (serramenti e impianto elettrico) e sono state trovate delle valide soluzioni mentre per l'edificio di Sospel il confronto di vari soluzioni differenti ha permesso di trovare una soluzione per limitare i costi mantenendo un ottimo livello di Sostenibilità Ambientale, a parità ovviamente di comfort interno.

Il metodo può essere utilizzato anche nell'ottica di un **approccio incrementale**, infatti, soprattutto quando si tratta di riqualificare l'esistente, non è possibile agire immediatamente con tutti gli interventi che si è ipotizzato, ma si deve andare a dilazionare gli interventi nel tempo; con il metodo SMCAM è possibile valutare quali interventi eseguire per primi e quali invece possono essere eseguiti successivamente, in quanto meno importanti.

Nello sviluppo del metodo, si è inoltre riusciti a **valorizzare l'aspetto metodologico**, ottimizzando gli aspetti maggiormente tecnici, quali le fasi di normalizzazione, pesatura e aggregazione dei parametri, senza vincolarle ai casi di studio, ma permettendo un ampio margine di adattabilità. Questo è stato fatto in previsione dell'evoluzione della normativa sulla Sostenibilità e per permettere l'applicazione del metodo stesso a differenti casi di studio.

Riguardo agli strumenti a servizio delle analisi di Sostenibilità, un **tema centrale è stato il BIM** e tutto quello che ad esso è connesso: i file interoperabili, i software che permettono di utilizzare questa tecnologia, le problematiche connesse e il reperimento dei dati. È stato impegnativo creare un modello tridimensionale di entrambi i casi di studio ma i risultati hanno pienamente ripagato gli sforzi: i modelli hanno permesso di inserire, modificare ed estrarre numerosi dati senza bisogno di effettuare ulteriori calcoli. Tutto questo è stato fondamentale per effettuare le simulazioni energetiche e le valutazioni di comfort, che avrebbero altrimenti richiesto un tempo notevolmente maggiore.

Soprattutto il BIM della Nave è stato di notevole aiuto in quanto è stato modificato e aggiornato via via che si raccoglievano informazioni a riguardo. Ora questo BIM potrà essere usato anche in futuro all'interno del Progetto Campus Sostenibile come test per la gestione integrata degli edifici del Campus. Infatti non si parla solo di Sostenibilità Ambientale, Economica e Sociale ma anche di Sostenibilità della fase di gestione dell'edificio, che non deve essere un compito eccessivamente gravoso e difficile, in quanto la complessità di gestione può essere causa di trascuratezza, che porta a sua volta a non accorgersi di problemi che sarebbero altrimenti facilmente risolvibili.

Una **gestione integrata di un patrimonio** edilizio riesce quindi a snellire le procedure e a facilitare le fasi di monitoraggio, controllo e manutenzione.

La creazione di un BIM in fase di progettazione permette invece di gestire al meglio tutte le fasi della progettazione stessa, l'integrazione tra gli impianti e l'edificio, le simulazione e le valutazioni delle prestazioni e le varianti. È uno strumento molto potente che, essendo anche estremamente flessibile, permette di estrarre informazioni molto utili per la progettazione.

Oltre ai BIM sono state utilizzati in questa Tesi delle procedure di calcolo e dei software appositamente dedicati alla valutazione di aspetti della Sostenibilità, quali le analisi ambientali lungo il ciclo di vita o quelle economiche.

Le **problematiche maggiori** che sono state riscontrate durante questi mesi di lavoro sono legate al reperimento dei dati: per gli edifici esistenti è difficile fare una valutazione precisa delle prestazioni residue e quindi non sempre le alternative che si propongono possono essere mirate a risolvere determinati problemi; per gli edifici di nuova costruzione è invece complesso proporre molte alternative in quanto i tempi della progettazione sono molto stretti e quindi con poco tempo si tende a ridurre la fase di proposta e selezione. Ovviamente la soluzione a quest'ultimo problema è accoppiare la progettazione con un sistema come il BIM, integrando maggiormente le fasi di scelta all'interno del processo decisionale.

Una problematica comune a entrambi i casi di studio è invece il reperimento di dati relativi a parametri quali CO<sub>2</sub>, energia incorporata e costi di manutenzione. Per questi stanno sorgendo numerosi database ma non esiste ancora una letteratura approfondita come ad esempio per i costi di costruzione o per i costi e i consumi energetici.

In aggiunta i **dati in uscita** dal metodo possono essere salvati in un **database**, sia esso pubblico o meno, da cui attingere per i futuri progetti e sviluppi, diminuendo notevolmente i tempi di calcolo e di stima dei parametri. Ovviamente il passaggio successivo è quello di creare un **sistema automatizzato** che permetta di inserire nuovi dati ed estrarre quelli storici; un database organizzato fondamentalmente come quelli già esistenti con dati come vita utile, costo di costruzione o altri ancora.

Una Tesi di questo genere ha molti **sviluppi** sia nel campo accademico sia in quello professionale: nel primo caso si può ampliare questo metodo, andando a indagare soluzioni più innovative, nuovi materiali e nuovi strumenti di valutazione, mentre dal punto di vista professionale il metodo SMCAM può essere utilizzato dai progettisti come strumento di aiuto durante la fase di scelta e anche di definizione delle priorità con la committenza.

Un futuro sviluppo sarà inoltre la creazione di un'interfaccia grafica dedicata, l'automatizzazione del sistema di pesatura e della stesura delle classifiche finali. Proprio su queste ultime idee si sta lavorando, per riuscire a ottenere un algoritmo in cui si possa liberamente inserire numero di livelli gerarchici, obiettivi, criteri, alternative e altro ancora.



## vii. BIBLIOGRAFIA

- [1-1]** Ente Italiano di Unificazione, UNI EN 15643-1, Sustainability of construction works – Sustainability assessment of buildings – part 1: General framework;
- [1-2]** International Organization of Standardization, ISO 15392, Sustainability in building construction – general principles, 2008;
- [1-3]** International Organization of Standardization, ISO/TS 21929-1, Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Part 1: Framework for the development of indicators for buildings, 2006;
- [1-4]** International Organization for Standardization, ISO/FDIS 21929-1, Sustainability in building construction – Sustainability framework – part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings, 2011;
- [1-5]** International Organization of Standardization, ISO 15686-5, Buildings and constructed assets – Service-life planning – part 5: Life-cycle costing, 2008;
- [1-6]** European Committee for Standardization, CEN EN 15643-4, Sustainability of construction works – Assessment of buildings – part 4: Framework for the assessment of economic performance;
- [1-7]** International Organization of Standardization, UNI EN ISO 14044, Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, 2006;
- [1-8]** International Organization of Standardization, ISO 14001, Environmental management systems – Requirements with guidance for use, 2004;
- [1-9]** International Organization of Standardization, UNI EN ISO 14004, Environmental management systems – General guidelines on principles, systems and support techniques, 2010;
- [1-10]** Ente Italiano di Unificazione, UNI EN 15643-2, Sustainability of construction works – Assessment of buildings – part 2: Framework for the assessment of environmental performance, 2011;
- [1-11]** European Committee for Standardization, CEN EN 15978, Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method, 2011;
- [1-12]** International Organization of Standardization, ISO 21931-1, Sustainability in building construction – Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works – Buildings, 2010;
- [1-13]** European Committee for Standardization, CEN EN 15643-3, Sustainability of construction works – Assessment of buildings – part 3: Framework for the assessment of social performance;
- [1-14]** European Committee for Standardization, CEN EN 16309, Sustainability of construction works – Assessment of social performance of buildings - Methods;

- [1-15]** Ente Italiano di Unificazione, UNI EN 15251, Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica, 2008;
- [1-16]** Ente Italiano di Unificazione, UNI 10339, Impianti aeraulici a fini di benessere – Generalità, classificazione e requisiti – Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura, 1995;
- [1-17]** International Organization of Standardization, UNI EN ISO 7730 – Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale, 2005;
- [1-18]** ASHRAE Standard 55-92, Thermal Comfort;
- [1-19]** International Organization of Standardization, UNI EN ISO 15265, Ergonomia dell'ambiente termico – Strategia di valutazione del rischio per la prevenzione dello stress o del disagio termico in condizioni di lavoro, 2005;
- [1-20]** International Organization of Standardization UNI EN ISO 7933, Ergonomia dell'ambiente termico – Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile, 2005;
- [1-21]** Ente Italiano di Unificazione, UNI EN 27243, Ambienti caldi – Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro), 1996;
- [1-22]** GBC Italia, *Manuale LEED Italia – Nuove costruzioni e ristrutturazioni*, 2009;
- [1-23]** Dansk Standard, DS/EN 13779, Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, 2007;
- [1-24]** Ente Italiano di Unificazione, UNI EN 15193, Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione, 2008;
- [1-25]** Ente Italiano di Unificazione, UNI 11367, Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera, 2010;
- [1-26]** Decreto legislativo 29 Dicembre 2006, n. 311, Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 Agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia;
- [1-27]** Decreto legislativo 19 Agosto 2005, n. 192, Attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia;
- [1-28]** Legge 9 Gennaio 1991, n. 10, Norme per l'attuazione del piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia;
- [1-29]** [www.cened.it/cenedhome](http://www.cened.it/cenedhome), 30/10/11;
- [1-30]** [www.docet.itc.cnr.it](http://www.docet.itc.cnr.it), 30/10/11;
- [1-31]** International Organization of Standardization, ISO 13790, Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling, 2008;

- [1-32] Ente Italiano di Unificazione, UNI TS 11300-1, Prestazioni energetiche degli edifici – parte 1 - Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;
- [1-33] Ente Italiano di Unificazione, UNI EN 15603, Prestazione energetica degli edifici – Consumo energetico globale e definizione dei metodi di valutazione energetica, 2008;
- [1-34] Ente Italiano di Unificazione, UNI EN 15316-1, Heating systems in buildings - Methods for calculation of system energy requirements and system efficiencies - part 1 – General;
- [1-35] Dansk Standard, DS/EN 15241, Ventilation for buildings – Calculation methods for energy losses due to ventilation and infiltration in commercial buildings, 2007;
- [1-36] [www.ashrae.org/standards-research--technology/standards--guidelines](http://www.ashrae.org/standards-research--technology/standards--guidelines), 18/12/11;
- [1-37] Ente italiano di Unificazione, UNI 10349, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici, 1994;
- [1-38] LEE W., *Achieving sustainable design – Integrated practice and BIM technology*, Autodesk, 2011;
- [1-39] WELLE B., *BIM to SIM – Technology update – Role of standards in BIM to SIM data exchange process*, ASHRAE winter meeting, 2010;
- [1-40] KIVINIEMI A., BALBO R., *BIM and integrated design*, School of the Built Environment, Salford University, 2011;
- [1-41] BENGHI C., *Building Information Modelling*, BIMacademy, 2011;
- [1-42] DANIELS J. H., *Integrated design of NZEBs*, University of Toronto, 2011;
- [1-43] U.S. National Building Information Modelling Standard NBIMS, Version 1 – part 1: Overview, principles and methodologies, National Institute of Building Sciences, 2007;
- [1-44] U.S. GSA, *Information Delivery Manual for BIM based energy analysis*, 2009;
- [1-45] Nemetschek, *Vectorworks Architect – Un'applicazione BIM per la progettazione architettonica*, 2011;
- [1-46] DONATO V., *Building Information Modelling (BIM): analisi applicati al centro affari di Arezzo*, Università degli Studi di Firenze, 2010;
- [1-47] [www.fkaustralia.com/](http://www.fkaustralia.com/), 20/11/11;
- [1-48] International Organization of Standardization, ISO/PAS 16739, Industry foundation classes, Release 2x, Platform specification (IFC2x platform), 2005;
- [1-49] [www.selvaag.no](http://www.selvaag.no), 20/10/11;
- [1-50] [www.byggsok.no](http://www.byggsok.no), 20/10/11;
- [1-51] IAI Italia, *IT e disegno di progetto*, Politecnico di Milano, 2010;
- [1-52] BENGHI C., BALBO R., Seminario sul BIM, Politecnico di Milano, 2011;
- [1-53] CAFFI V., Building Smart Italia, International Alliance for Interoperability IAI, 2011;
- [1-54] International Organization of Standardization, ISO 29481-1, Building information modeling - Information delivery manual – Part. 1 - Methodology and format;
- [1-55] HONG T., CHOU S. K., BONG T. Y., *Building simulation: an overview of developments and information sources*, Building and Environment, 35, 2000, pp. 347-361;

- [1-56]** European Committee for Standardization, CEN EN 15804, Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products, 2011;
- [1-57]** International Organization of Standardization, ISO 15686, Buildings and constructed assets – Service life planning, 2004;
- [1-58]** European Committee for Standardization, CEN EN 15942 Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Communication format business-to-business, 2011;
- [1-59]** International Organization of Standardization, ISO 14020, Environmental labels and declarations – General principles, 2000;
- [1-60]** Direttiva 89/106/CEE del Consiglio relative al ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari ed amministrative degli Stati Membri concernenti i prodotti da costruzione, 11/02/1989;
- [1-61]** D.P.R. n. 246, regolamento di attuazione della direttiva 89/106/CEE relativa ai prodotti da costruzione, 21 Aprile 1993;
- [1-62]** International Organization of Standardization, ISO 21930, Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products, 2007;
- [1-63]** Ente Italiano di Unificazione, UNI EN 15625, Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti mediante metodi dinamici – Criteri generali e procedimenti di validazione, 2008;
- [2-1]** XII DBMC, Durability of Building Materials and Components, Oporto - Portogallo, Aprile 2011;
- [2-2]** ROSSI B., MARIQUE A.-F., GLAUMANN M., REITER S., *Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool*, Building and Environment, 51, 2012, pp. 395-401;
- [2-3]** JAGGS M., PALMER J., *Energy performance indoor environmental quality retrofit – a European diagnosis and decision making method for building refurbishment*, Energy and Buildings, 31, 2000, pp. 97-101;
- [2-4]** Open House, *Benchmarking and mainstreaming building sustainability in the UE based on transparency and openness from model to implementation*, Seventh Framework Programme, 2011;
- [2-5]** [www.designadvisor.mit.edu/design/](http://www.designadvisor.mit.edu/design/), 18/10/11;
- [2-6]** [www.sb11.org/](http://www.sb11.org/), 20/01/12;
- [2-7]** Inventory of Carbon and Energy V2, University of Bath, UK, 2011;
- [2-8]** [www.lcacalculator.com/](http://www.lcacalculator.com/), 10/12/11;
- [2-9]** [www.athenasmi.org/](http://www.athenasmi.org/), 14/02/12;
- [2-10]** [www.buildcarbonneutral.org/](http://www.buildcarbonneutral.org/), 10/12/11;
- [2-11]** [www.greenfootstep.org/](http://www.greenfootstep.org/), 10/12/11;
- [2-12]** <http://www.greenspec.co.uk/>, 15/01/12;
- [2-13]** [www.musacchio.it/misura\\_della\\_sostenibilita.html](http://www.musacchio.it/misura_della_sostenibilita.html), 10/12/11;



- [2-14] [www.goo.gl/oeiYp](http://www.goo.gl/oeiYp), 10/12/11;
- [2-15] CHIARADIA M., LAMPERTI A., *Un nuovo metodo di analisi parametrica dei progetti residenziali per la stima del costo di costruzione*, Politecnico di Milano, 2010;
- [2-16] CARUSO DI SPACCAFORNO A., *Valutazione economica dei progetti nell'arte del costruire*, UTET, 1999;
- [2-17] RSmeans, *Means Construction Cost Data*, Kingston, MA, 2004;
- [2-18] CERA A. P., PREMOLI C., *Individuazione di un metodo di stima, in fase di progettazione preliminare, del costo di costruzione tramite l'uso delle regressioni lineari*, Politecnico di Milano;
- [2-19] RUSSO B., *Procedura informatica per la stima del valore di costo degli immobili*, Il sole 24 ore, Consulente immobiliare, 857, 2010;
- [2-20] Frame s.r.l., *Metodologia informatica per la stima del più probabile costo di costruzione e/o di ricostruzione a nuovo dei fabbricati*, 2011;
- [2-21] DI GIULIO R., CROCE S., *Manuale di manutenzione edilizia – valutazione del degrado e programmazione della manutenzione*, Maggioli, 2003;
- [2-22] MOLINARI C., *Procedimenti e metodi della manutenzione edilizia – vol.1 – la manutenzione come requisito*, Esselibri – Simone, 2002;
- [2-23] [www.goo.gl/Hm3yj](http://www.goo.gl/Hm3yj), 12/09/11;
- [2-24] [www.globalservice.org/](http://www.globalservice.org/), 12/09/11;
- [2-25] British Standard, BS EN 15459, Energy performance of buildings – Economic evaluation procedure for energy systems in buildings, 2007;
- [2-26] THOMPSON P. B., *Evaluating energy efficiency investments: accounting for risk in the discount process*, Energy policy, 25, 1997, pp. 989-996;
- [2-27] BRAGA D. K., AMORIM C. N. D., *Thermal comfort of residential building in Pilot Plan of Brasilia*, 22<sup>nd</sup> PLEA, 2005;
- [2-28] Ente Italiano di Unificazione, UNI/TR 11175, Acustica in edilizia – Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici – Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale, 2005;
- [2-29] ASHRAE standard 62-1989, Ventilation for acceptable Indoor Air Quality;
- [2-30] REINHART C. F., MARDALIJEVIC J., ROGERS Z., *Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design*, NRC Publications Archive, 3, 2006, pp. 1-25;
- [2-31] JOARDER A. R., AHMED Z. N., PRINCE A., MOURSHED M., *Daylight simulation for sustainable urban office building design in Dhaka, Bangladesh: decision-making for internal blind configuration*, Loughborough University, 2002;
- [2-32] SONMEZ R., ONTEPELI B., *Predesign cost estimation of urban railway projects with parametric modeling*, Journal of Civil Engineering and Management, 15, 2009, pp. 405-409;
- [2-33] AKADIRI O. P., *Development of a multi-criteria approach for the selection of sustainable materials for building projects*, 2011;
- [2-34] KAKLAUSKAS A., ZAVADSKAS E. K., RASLANAS S., *Multivariate design and multiple criteria analysis of building refurbishment*, Energy and Buildings, 37, 2005, pp. 361-372;

- [2-35] ZAVADSKAS E., RASLANAS S., KAKLAUSKAS A., *The selection of effective retrofit scenarios for panel houses in urban neighborhoods based on expected energy savings and increase in market value: the Vilnius case*, Energy and Buildings, 40, 2008, pp.573-587;
- [2-36] ZAVADSKAS E. K., ANTUNCHEVICIENE J., *Multiple criteria evaluation of rural building's regeneration alternatives*, Building and Environment, 42, 2007, pp. 436-451;
- [2-37] ZAVADSKAS E. K., PELDSCHUS F., *Multi-criteria optimization software LEVI 4.0 – a tool to support design and management in construction*, 25<sup>th</sup> ISARC, 2008;
- [2-38] TURSKIS Z., ZAVADSKAS E. K., PELDSCHUS F., *Multi-criteria optimization system for decision making in construction design and management*, Engineering Economics, 1, 2009, pp. 1392-2875;
- [2-39] BANAITIENE N., BANAITIS A., KAKLAUSKAS A., ZAVADSKAS E. K., *Evaluating the life cycle of a building – a multivariant and multiple criteria approach*, Omega, 36, 2008;
- [2-40] MUNDA G., *Social multi-criteria evaluation: methodological foundations and operational consequences*, European Journal of Operational Research, 158, 2004, pp. 662-667;
- [2-41] GINELLI E., *L'intervento sul costruito – Problemi e orientamenti*, FrancoAngeli Edizioni, 2002;
- [2-42] GORGOLEWSKI M., *Optimising renovation strategies for energy conservation in housing*, Building and Environment, 30, 1995, pp. 583-589;
- [2-43] ROSENFELD Y., SHOHET I. M., *Decision support model for semi-automated selection of renovation alternatives*, Automation in Construction, 8, 1999, pp. 503-510;
- [2-44] ROULET C.-A., FLORENTZOU F., LABBEN H. H., SANTAMOURIS M., KORONAKI I., DASCALAKI E., RICHALET V., *ORME - a multicriteria rating methodology for buildings*, Building and Environment, 37, 2002, pp. 579-586;
- [2-45] BARCUS A., MONTIBELLER G., *Supporting the allocation of software development work in distributed teams with multi-criteria decision analysis*, Omega, 36, 2008, pp. 464-475;
- [2-46] ROUSSAT N., DUJET C., MÉHU J., *Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis*, Waste Management, 29, 2009, pp. 12-20;
- [2-47] JEDRZEJUK H., MARKS W., *Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization example*, Building and Environment, 37, 2002, 1249-1253;
- [2-48] KANAGARAJ G., MAHALINGAM A., *Designing energy efficient commercial buildings – a systems framework*, Energy and Buildings, 43, 2011, pp. 2329-2343;
- [2-49] FLORENTZOU F., C.-A. ROULET, *Elaboration of retrofit scenarios*, Energy and Buildings, 34, 2002, pp. 185-192;
- [2-50] CACCAVELLI D., GUGERLI H., *TOBUS – a European diagnosis and decision-making tool for office building upgrading*, Energy and Buildings, 34, 2002, pp. 113-119;
- [2-51] [www.envest2.bre.co.uk](http://www.envest2.bre.co.uk), 21/09/11;
- [2-52] [www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm](http://www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm), 21/09/11;
- [2-53] [www.breeam.org/](http://www.breeam.org/), 21/09/11;
- [2-54] <http://goo.gl/izNZd>, 21/09/11;

- [2-55] <http://www.usgbc.org/DisplayPage.aspx?CategoryID=19>, 21/09/11;
- [2-56] [www.energysavvy.com/contractors/OR/hillsboro/enerrate/](http://www.energysavvy.com/contractors/OR/hillsboro/enerrate/), 21/09/11;
- [2-57] CATERINO N., *Analisi decisionale multicriteria per l'adeguamento sismico di edifici in c.a.*, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2006;
- [2-58] CATERINO N., *Comparative analysis of multi-criteria decision making methods for seismic structural retrofitting*, Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 24, 2009, PP. 432-445;
- [2-59] VASSILEV V., GENOVA K., VASSILEVA M., STAYCOV B., ANDONOV F., *A software system for multicriteria analysis and optimization*, Problems of Engineering and Cybernetics Robotics, 55, 2005;
- [2-60] DE LUCIA T., *Analisi decisionale multicriterio per interventi di trasformazione strutturale – adeguamento sismico e sopraelevazione*, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2008;
- [2-61] STELLA M., *Sviluppo e ottimizzazione del progetto di unità navali con tecniche multiattributo*, Università degli Studi di Napoli Federico II;
- [2-62] NORESE M. F., *Metodi e modelli per il supporto alle decisioni*, Politecnico di Torino, 2002;
- [2-63] CALDAS L., NORFORD L. K., *A design optimization based on a genetic algorithm*, Automation in Construction, 11, 2002, pp. 173-184;
- [2-64] WRIGHT J. A., LOOSEMORE H. A., FARMANI R., *Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm*, Energy and Building, 34, 2002, pp. 959-972;
- [2-65] JIANG H., EASTMAN J. R., *Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS*, International Journal of Geographic Information Science, 14, 2000, pp. 173-184;
- [2-66] BRENT A. C., ROGERS D. E. C., RAMABITSA-SIIMANE T. S. M., ROHWER M. B., *Application of the analytical hierarchy process to establish health care waste management systems that minimize infection risks in developing countries*, European Journal of Operational Research, 181, 2007, 403-424;
- [2-67] WONG J. K. W., LI H., *Application of the analytic hierarchy process (AHP) in multi-criteria analysis of the selection of intelligent building systems*, Building and Environment, 43, 2008, pp. 108-125;
- [2-68] BRYSON N., MOBOLURIN A., *An action learning evaluation procedure for multiple criteria decision making problems*, European Journal of Operational Research, 96, 1995, pp. 379-386;
- [2-69] ZAVADSKAS E. K., TURKSIS Z., *A new logarithmic normalization method in games theory*, Informatica, 19, 2008, pp. 303-314;
- [2-70] CHEN Y., KILGOUR D. M., HIPEL K. W., *A case-based distance method for screening in multiple-criteria decision aid*, Omega, 36, 2008, pp. 373-383;
- [2-71] [www.goo.gl/T2sma](http://www.goo.gl/T2sma), 20/02/12;
- [3-1] [www.campus-sostenibile.polimi.it/](http://www.campus-sostenibile.polimi.it/), 01/03/12;
- [3-2] [www.international-sustainable-campus-network.org/](http://www.international-sustainable-campus-network.org/), 01/03/12;

- [3-3] [www.goo.gl/miR8J](http://www.goo.gl/miR8J), 01/03/12;
- [3-4] [www.pizzarotti.it/](http://www.pizzarotti.it/), 01/03/12;
- [4-1] [www.gbxml.org/](http://www.gbxml.org/), 01/03/12;
- [4-2] [www.esweb.polimi.it/gui/index.jsp#](http://www.esweb.polimi.it/gui/index.jsp#), 01/03/12;
- [4-3] [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com), 20/02/12;
- [4-4] Schneider Electric, *Guida all'utilizzo della norma UNI EN 15232*, 2011;
- [4-5] [www.goo.gl/ZfkDK](http://www.goo.gl/ZfkDK), 01/03/12;
- [4-6] <http://xp20.ashrae.org/publicdatabase/maintenance.asp>, 03/02/12;
- [4-7] <http://www.autorita.energia.it/it/index.htm>, 03/02/12.

## **viii. ALLEGATI**

- Tesi in formato elettronico;
- Programma SMCAM.

### **EDIFICIO NAVE**

1. Modello BIM in Autodesk Revit Architecture;
2. Modello BIM in Autodesk Ecotect Analysis;
3. Consumi elettrici giornalieri;
4. Calcolo Energia incorporata;
5. Calcolo Costi Iniziali;
6. Calcolo Costi di Manutenzione;
7. Calcolo Costi di Dismissione.

### **EDIFICIO SOSPEL**

1. Modello BIM in Autodesk Revit Architecture;
2. Modello BIM in Autodesk Ecotect Analysis;
3. Calcolo Costi di Manutenzione.

Gli allegati sono tutti inseriti all'interno del CD contenuto nella Tesi. Si riportano solo i file sopracitati in quanto sono di dimensioni troppo grandi per essere inseriti all'interno della Tesi. Tutti gli altri fogli di calcolo utilizzati per calcolare i parametri sono invece stati inseriti all'interno della trattazione.



## ix. INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1 – Schematizzazione dei rami della Sostenibilità .....	6
Figura 1-2 – Suddivisione della Sostenibilità in tre ambiti .....	6
Figura 1-3 – Indicazione dell'ambito dei più importanti indicatori.....	8
Figura 1-4 – Elenco di indicatori suddivisi tra Edificio e Sito.....	9
Figura 1-5 – Schematizzazione delle fasi di un progetto in connessione con le analisi di Sostenibilità.....	10
Figura 1-6 – Schematizzazione del processo di valutazione di Sostenibilità.....	11
Figura 1-7 – Schematizzazione delle fasi di vita e delle informazioni a esse corrispondenti.....	12
Figura 1-8 – Divisione delle componenti del costo globale sul ciclo di vita .....	13
Figura 1-9 – Costi divisi per ambiti specifici .....	14
Figura 1-10 – Schematizzazione dei possibili livelli di analisi economica .....	15
Figura 1-11 – Grafico dell'andamento dell'efficacia dei cambiamenti nel progetto a seconda della fase .....	16
Figura 1-12 – Schematizzazione del processo di valutazione .....	18
Figura 1-13 – Esempificazione di un modello di analisi ambientale .....	19
Figura 1-14 – Schematizzazione del processo di valutazione ambientale .....	20
Figura 1-15 – Classificazione delle informazioni in base alle fasi di vita dell'edificio .....	22
Figura 1-16 – Passaggi fondamentali da seguire per una valutazione ambientale.....	23
Figura 1-17 – Tipologie di dati preferibili in relazione alla fase che si sta valutando .....	24
Figura 1-18 – Schematizzazione del metodo di calcolo degli indici prescelti .....	25
Figura 1-19 – Differenza dei metodi di valutazione a seconda della fase che si considera .....	26
Figura 1-20 – Indicazione delle fasi da considerare a seconda degli utenti coinvolti.....	27
Figura 1-21 – Metodi di valutazione dell'edificio a seconda delle macrofasi in cui ci si trova ...	28
Figura 1-22 – Indicazione degli aspetti fondamentali da prendere in considerazione .....	29
Figura 1-23 – Indicatori e loro importanza in relazione alle fasi del ciclo di vita .....	30
Figura 1-24 – Schematizzazione dei flussi energetici in un edificio .....	32
Figura 1-25 – Definizione dei flussi energetici .....	33
Figura 1-26 – Definizione dei flussi energetici impiantistici.....	33
Figura 1-27 – Collegamento tra fabbisogno energetico e emissione di CO <sub>2</sub> .....	34
Figura 1-28 – Impatti ambientali suddivisi per fasi del ciclo di vita .....	36
Figura 1-29 – Portate d'aria esterna e ventilazione a seconda della destinazione d'uso .....	39
Figura 1-30 - Portate d'aria esterna e ventilazione a seconda della destinazione d'uso.....	40
Figura 1-31 - Portate d'aria esterna e ventilazione a seconda della destinazione d'uso.....	41
Figura 1-32 – Velocità massima dell'aria a seconda della destinazione d'uso .....	42
Figura 1-33 – Attività metabolica e resistenza dell'abbigliamento.....	43
Figura 1-34 – Densità di persone a seconda della destinazione d'uso .....	43
Figura 1-35 – Densità di persone a seconda della destinazione d'uso .....	44
Figura 1-36 – Concentrazioni massime di particelle nell'aria .....	44
Figura 1-37 – PMV, Predicted Mean Vote.....	45

Figura 1-38 – Collegamento tra PMV e PPD.....	46
Figura 1-39 – Andamento della PPD in relazione al $\Delta T$ verticale .....	47
Figura 1-40 – Relazione tra PPD e pavimenti caldi/freddi .....	47
Figura 1-41 – Relazione tra PPD e asimmetria radiante .....	48
Figura 1-42 – Valori del MET a seconda dell'attività svolta .....	49
Figura 1-43 – Differenti strategie di valutazione del PMV .....	50
Figura 1-44 – Valutazione del PMV a seconda dell'ambito che si analizza.....	51
Figura 1-45 – Differenti metodi di calcolo dei parametri illuminotecnici.....	53
Figura 1-46 – Indicazione degli indici acustici .....	54
Figura 1-47 – Ulteriori indicatori di prestazione acustica .....	54
Figura 1-48 – Classe acustica globale .....	56
Figura 1-49 – Limiti acustici per locali accessori di uso comune.....	56
Figura 1-50 – Grafico tempo-sforzo nel processo edilizio.....	57
Figura 1-51 – Metodi e strumenti per gestione e progettazione.....	58
Figura 1-52 – Importanza delle componenti nel BIM .....	59
Figura 1-53 – Elenco delle applicazioni certificate IFC 2.X .....	61
Figura 1-54 – Ambiti in cui il BIM può essere utilizzato .....	61
Figura 1-55 – Unità di misura dei principali indicatori .....	65
Figura 1-56 – Unità di misura dei principali indicatori ambientali.....	66
Figura 1-57 – Andamento delle prestazioni di un componente .....	66
Figura 1-58 – Schematizzazione delle fasi di smaltimento dei rifiuti.....	67
Figura 1-59 – Schematizzazione delle fasi di valutazione di un prodotto.....	69
Figura 1-60 – Schematizzazione dei legami tra EPD e PCR .....	70
Figura 2-1 – Relazione tra impatti ambientali e fasi del ciclo di vita.....	76
Figura 2-2 – Schematizzazione degli input energetici a seconda della fase del ciclo di vita.....	77
Figura 2-3 – Esempio di costi medi per unità di misura .....	94
Figura 2-4 – Curva di correzione dei costi in relazione alla grandezza del progetto .....	95
Figura 2-5 – Schermata del software di stima parametrica dei costi di costruzione.....	102
Figura 2-6 – Schermata esempio del software di valutazione parametrica dei costi di manutenzione .....	104
Figura 2-7 – Correlazione tra PPD e ricambi d'aria .....	110
Figura 2-8 – Interazione tra gli ambiti della Sostenibilità e le scelte da effettuare .....	115
Figura 2-9 – Schematizzazione del percorso da seguire per lo sviluppo di un metodo.....	121
Figura 2-10 – Schematizzazione dei passaggi fondamentali del metodo AHP.....	126
Figura 2-11 – Schematizzazione di una struttura gerarchica .....	127
Figura 2-12 – Schematizzazione di una struttura gerarchica .....	136
Figura 2-13 – Esempio di normalizzazione dei parametri da minimizzare.....	141
Figura 2-14 – Esempio di normalizzazione dei parametri da massimizzare.....	142
Figura 2-15 – Esempio di normalizzazione a scala equidistribuita.....	143
Figura 2-16 – Esempio di grafico per la valutazione grafica dei parametri.....	151
Figura 2-17 – Esempio di grafico per la valutazione grafica dei subcriteri .....	151



Figura 2-18 – Esempio di grafico per la valutazione grafica dei criteri .....	151
Figura 2-19 – Esempio di grafico per la valutazione grafica degli obiettivi.....	152
Figura 2-20 – Esempio di grafico per la valutazione grafica degli obiettivi divisi in parametri. 152	
Figura 2-21 – Schematizzazione della struttura gerarchica del SMCAM a livello di obiettivi... 153	
Figura 2-22 – Schematizzazione della struttura gerarchica del SMCAM a livello di criteri.....	154
Figura 2-23 – Schematizzazione della struttura gerarchica del SMCAM a livello di requisiti secondari.....	157
Figura 2-24 – Schematizzazione della struttura gerarchica del SMCAM a livello di parametri 159	
Figura 2-25 – Schematizzazione della struttura gerarchica del SMCAM a livello delle alternative .....	160
Figura 2-26 – Legenda con i valori di importanza relativa .....	161
Figura 2-27 – Schermata iniziale del questionario .....	162
Figura 2-28 – Schermata esempio con domande a cui rispondere.....	162
Figura 2-29 – Frequenze delle risposte alle domande sulla Sostenibilità in generale .....	166
Figura 2-30 – Frequenze delle risposte alle domande sulla Sostenibilità Ambientale .....	166
Figura 2-31 – Frequenze delle risposte alle domande sulla Sostenibilità Economica .....	166
Figura 2-32 – Frequenze delle risposte alle domande sulla Sostenibilità Sociale e Qualità Prestazionale.....	167
Figura 2-33 – Ripartizione dei pesi nella Sostenibilità in generale.....	172
Figura 2-34 – Ripartizione dei pesi nella Sostenibilità Ambientale.....	172
Figura 2-35 – Ripartizione dei pesi nella Sostenibilità Economica .....	173
Figura 2-36 – Ripartizione dei pesi nella Sostenibilità Sociale e Qualità Prestazionale .....	173
Figura 2-37 – Pesi più importanti per ogni categoria.....	174
Figura 2-38 – Pesi più importanti in assoluto.....	174
Figura 2-39 – Diagrammi riassuntivi di tutti i pesi globali .....	175
Figura 3-1 – Logo dell’iniziativa Campus Sostenibile .....	182
Figura 3-2 – Logo delle quattro tematiche dell’iniziativa Campus Sostenibile .....	182
Figura 3-3 – Stratigrafia della CVO Sud .....	186
Figura 3-4 – Stratigrafia della CVO Nord .....	187
Figura 3-5 – Rilievo fotografico della CVO Nord .....	188
Figura 3-6 – Stratigrafia della CVO Est/Ovest.....	189
Figura 3-7 – Stratigrafia della CVO dei vani scala.....	190
Figura 3-8 – Rilievo fotografico della copertura.....	194
Figura 3-9 – Stratigrafia della copertura .....	195
Figura 3-10 – Stratigrafia del balcone .....	195
Figura 3-11 – Rilievo fotografico del balcone.....	196
Figura 3-12 – PMV stimato nell’aula B.4.1 .....	200
Figura 3-13 – PPD stimata nell’aula B.4.1 .....	201
Figura 3-14 – Ventilazione minima teorica per l’aula B.4.1 .....	202
Figura 3-15 – Andamento dei carichi nel tempo per l’aula B.4.1 in relazione alla temperatura .....	203

Figura 3-16 – Andamento dei carichi nel tempo.....	203
Figura 3-17 – Andamento delle dispersioni nel periodo estivo per l'aula B.4.1 .....	204
Figura 3-18 – Andamento dei gradi-ora, indice di discomfort per tutte le aule .....	204
Figura 3-19 – Andamento del discomfort per il solo periodo estivo .....	206
Figura 3-20 – Modello tridimensionale della Nave in Autodesk Revit Architecture.....	207
Figura 3-21 – Modello tridimensionale della Nave in Autodesk Revit Architecture.....	208
Figura 3-22 – Pianta piano primo della Nave in Autodesk Revit Architecture.....	208
Figura 3-23 – Modello della Nave e edifici limitrofi in Autodesk Ecotect Analysis .....	210
Figura 3-24 – Modello tridimensionale della Nave e edifici limitrofi.....	211
Figura 3-25 – Modello tridimensionale della Nave in Autodesk Ecotect Analysis .....	211
Figura 3-26 – Vista interna del modello della Nave, zona aule .....	212
Figura 3-27 – Vista interna del modello della Nave, zona uffici e dipartimenti.....	212
Figura 3-28 – Modello della Nave, divisione in zone termiche .....	213
Figura 3-29 – Andamento giornaliero degli affollamenti.....	213
Figura 3-30 – Andamento giornaliero dei ricambi d'aria naturali.....	214
Figura 3-31 – Andamento delle temperature misurate e simulate .....	217
Figura 3-32 – Andamento delle dispersioni durante tutto l'anno .....	218
Figura 3-33 – Andamento delle dispersioni e dei guadagni durante tutto l'anno .....	219
Figura 3-34 – Disperdimenti percentuali - stato di fatto.....	220
Figura 3-35 – Guadagni percentuali – stato di fatto .....	220
Figura 3-36 – Andamento del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento delle aule.	221
Figura 3-37 – Inquadramento geografico di Sospel (FR).....	224
Figura 3-38 – Inquadramento geografico della Casa di Riposo a Sospel (FR) .....	224
Figura 3-39 – Modello tridimensionale dell'edificio in Autodesk Revit Architecture .....	228
Figura 3-40 – Modello tridimensionale dell'edificio in Autodesk Revit Architecture .....	229
Figura 3-41 – Modello tridimensionale dell'edificio in Autodesk Revit Architecture .....	229
Figura 3-42 – Modello tridimensionale dell'edificio in Autodesk Revit Architecture .....	230
Figura 3-43 – Modello tridimensionale dell'edificio in Autodesk Ecotect Analysis .....	231
Figura 3-44 – Modello tridimensionale dell'edificio in Autodesk Ecotect Analysis .....	231
Figura 3-45 – Modello tridimensionale dell'edificio in Autodesk Ecotect Analysis .....	232
Figura 3-46 – Divisione in zone termiche dell'edificio .....	233
Figura 3-47 – Divisione in zone termiche dell'edificio .....	233
Figura 3-48 – Divisione in zone termiche dell'edificio .....	234
Figura 3-49 – Esempio di programmazione temporale dell'utilizzo delle varie zone termiche	237
Figura 4-1 – Stratigrafia della CVO Sud con controparete .....	246
Figura 4-2 – Stratigrafia della CVO Nord e controparete .....	247
Figura 4-3 – Stratigrafia della CVO Est/Ovest e controparete .....	248
Figura 4-4 – Stratigrafia della CVO VS e controparete .....	249
Figura 4-5 – Schematizzazione del sistema di insufflaggio dell'isolante granulare .....	251
Figura 4-6 – Stratigrafia della CVO Sud con insufflaggio.....	253
Figura 4-7 – Stratigrafia della CVO Nord con insufflaggio.....	254

Figura 4-8 – Stratigrafia della CVO Est/Ovest con insufflaggio .....	255
Figura 4-9 – Rilievo termografico facciata Sud – Edificio Nave .....	256
Figura 4-10 – Stratigrafia della copertura con rifacimento completo .....	261
Figura 4-11 – Stratigrafia del balcone con rifacimento completo .....	262
Figura 4-12 – Stratigrafia della copertura con isolamento interno.....	263
Figura 4-13 – Stratigrafia del balcone con isolamento interno.....	263
Figura 4-14 – Schematizzazione della prima alternativa di CVO.....	267
Figura 4-15 – Schematizzazione della seconda alternativa delle CVO .....	268
Figura 4-16 – Schematizzazione dei pannelli sostitutivi al fibrocemento .....	269
Figura 4-17 – Particolare del prospetto Est/Ovest (in rosso i pannelli da sostituire) .....	270
Figura 4-18 – Andamento della CO <sub>2</sub> da Ecotect .....	277
Figura 4-19 – Dati riassuntivi da LCAcalculator .....	277
Figura 4-20 – Dati specifici da LCAcalculator .....	278
Figura 4-21 – Andamento giornaliero dei consumi elettrici .....	285
Figura 4-22 – Andamento mensile dei consumi elettrici .....	285
Figura 4-23 – Andamento dei gradiora .....	304
Figura 4-24 – Sostenibilità Ambientale – Edificio Nave .....	321
Figura 4-25 – Sostenibilità Economica – Edificio Nave.....	322
Figura 4-26 – Sostenibilità Sociale e Qualità Prestazionale – Edificio Nave.....	322
Figura 4-27 – Classifica globale – Edificio Nave.....	324
Figura 4-28 – Classifica divisa per componenti edilizi – Edificio Nave .....	324
Figura 4-29 – Stratigrafia del solaio a terra dei box .....	331
Figura 4-30 – Stratigrafia del solaio a terra delle zone riscaldate.....	332
Figura 4-31 – Stratigrafia del solaio di interpiano.....	333
Figura 4-32 – Stratigrafia del solaio su spazio aperto .....	334
Figura 4-33 – Stratigrafia della copertura piana praticabile .....	335
Figura 4-34 – Stratigrafia delle partizioni interne verticali semplici .....	336
Figura 4-35 – Stratigrafia delle partizioni interne verticali tra alloggi .....	337
Figura 4-36 – Stratigrafia della chiusura verticale trasparente.....	338
Figura 4-37 – Stratigrafia della CVO con isolamento esterno .....	339
Figura 4-38 – Stratigrafia della CVO con isolamento interno.....	340
Figura 4-39 – Stratigrafia della CVO leggera .....	341
Figura 4-40 – Contributo di CO <sub>2</sub> dei materiali .....	344
Figura 4-41 – Andamento dei consumi medi mensili.....	349
Figura 4-42 – Sostenibilità Ambientale – Sospel.....	364
Figura 4-43 – Sostenibilità Economica – Sospel .....	365
Figura 4-44 – Sostenibilità Sociale e Qualità Prestazionale – Edificio Sospel .....	365
Figura 4-45 – Classifica globale – Edificio Sospel .....	366
Figura 4-46 – PMV del piano R+2 – 21 luglio ore 14 – Edificio Sospel .....	367
Figura 4-47 – PMV del piano R+2 – 21 luglio ore 14 – Edificio Sospel .....	368

## x. INDICE DELLE FORMULE

(Eq. 1-1) NPV - Net Present Value .....	16
(Eq. 1-2) Correnti d'aria.....	46
(Eq. 1-3) PPD - distribuzione verticale temperatura aria .....	47
(Eq. 1-4) PPD - pareti e soffitti.....	48
(Eq. 1-5) Acustica - requisito a) .....	55
(Eq. 1-6) Acustica - requisito b) .....	55
(Eq. 1-7) Acustica - requisito c) .....	55
(Eq. 1-8) Acustica - requisito d) e) .....	56
(Eq. 2-1) Costo di costruzione - stima parametrica.....	92
(Eq. 2-2) Costo di costruzione - stima parametrica - variazione percentuale.....	93
(Eq. 2-3) Costo di costruzione - stima parametrica - aggiornamento costo storico .....	93
(Eq. 2-4) Costo di costruzione - William Tenths Method .....	93
(Eq. 2-5) Costo di costruzione - System method.....	96
(Eq. 2-6) Costo di costruzione - stima informatica.....	100
(Eq. 2-7) UPV - Uniform Present Value .....	103
(Eq. 2-8) SPV - Single Present Value .....	106
(Eq. 2-9) Potere fonoisolante medio di facciata.....	109
(Eq. 2-10) Coefficiente di trasmissione acustica .....	110
(Eq. 2-11) PPD - ricambi d'aria .....	111
(Eq. 2-12) Differenza di pressione.....	111
(Eq. 2-13) Flusso d'aria - ventilazione naturale.....	111
(Eq. 2-14) AHP - matrice dei voti.....	128
(Eq. 2-15) AHP - matrice dei pesi.....	129
(Eq. 2-16) AHP - matrice dei pesi.....	129
(Eq. 2-17) AHP - reciprocità dei giudizi.....	130
(Eq. 2-18) AHP - passaggio intermedio.....	130
(Eq. 2-19) AHP - passaggio intermedio.....	130
(Eq. 2-20) AHP - passaggio intermedio.....	130
(Eq. 2-21) AHP - equazione risolvente.....	130
(Eq. 2-22) AHP - massimo autovalore .....	130
(Eq. 2-23) AHP - pesi.....	130
(Eq. 2-24) AHP - passaggio intermedio.....	131
(Eq. 2-25) AHP - passaggio intermedio.....	131
(Eq. 2-26) AHP - matrice di consistenza .....	131
(Eq. 2-27) AHP - indice di consistenza.....	131
(Eq. 2-28) AHP - rapporto di consistenza .....	131
(Eq. 2-29) Limiti di normalizzazione .....	138
(Eq. 2-30) Normalizzazione - benefici.....	139
(Eq. 2-31) Normalizzazione - costi.....	139

(Eq. 2-32) Normalizzazione - benefici - scala equidistribuita .....	139
(Eq. 2-33) Normalizzazione - costi - scala equidistribuita .....	139
(Eq. 2-34) Normalizzazione - benefici - vettoriale .....	139
(Eq. 2-35) Normalizzazione - costi - vettoriale .....	139
(Eq. 2-36) Normalizzazione - riferimento massimo.....	140
(Eq. 2-37) Normalizzazione - riferimento minimo.....	140
(Eq. 2-38) Normalizzazione - distanza dalla media .....	140
(Eq. 2-39) SMCAM - normalizzazione - benefici - scala equidistribuita .....	143
(Eq. 2-40) SMCAM - normalizzazione - costi - scala equidistribuita.....	143

## **xi. INDICE DELLE TABELLE**

Tabella 2-1 – Parametri Ambientali .....	91
Tabella 2-2 – Costi di manutenzione unitari medi per destinazione d’uso.....	105
Tabella 2-3 – Costi di manutenzione totali e unitari per la provincia di Genova .....	106
Tabella 2-4 – Parametri Economici .....	108
Tabella 2-5 – Parametri Sociali e di Qualità Prestazionale.....	113
Tabella 2-6 – Scala di importanza relativa tra gli elementi da confrontare .....	128
Tabella 2-7 – Random Index classificato in base al rango.....	131
Tabella 2-8 – Valori limite del Rapporto di Consistenza .....	132
Tabella 2-9 – Esempio di organizzazione dei valori dei parametri.....	137
Tabella 2-10 – Esempio di normalizzazione .....	141
Tabella 2-11 – Esempio di possibili alternative .....	145
Tabella 2-12 – Esempio di possibili alternative normalizzate .....	145
Tabella 2-13 – Esempio di calcolo dei pesi relativi.....	146
Tabella 2-14 – Esempio di pesi locali e globali .....	147
Tabella 2-15 – Esempio di pesi globali applicati alle alternative normalizzate.....	148
Tabella 2-16 – Esempio di classificazione delle alternative senza pesatura .....	148
Tabella 2-17 – Esempio di classificazione delle alternative pesate .....	149
Tabella 2-18 – Esempio di influenza percentuale dei pesi sul risultato .....	149
Tabella 2-19 – Pesi dei componenti in base al metodo di calcolo .....	164
Tabella 2-20 – Pesi da media troncata e da media delle matrici consistenti a confronto .....	165
Tabella 2-21 – Frequenze dei voti in tutte le domande .....	167
Tabella 2-22 – Analisi dei pesi derivanti dalla media troncata dei voti.....	168
Tabella 2-23 – Matrice di calcolo dei pesi della Sostenibilità in generale.....	169
Tabella 2-24 – Matrice di calcolo dei pesi della Sostenibilità Ambientale.....	169
Tabella 2-25 – Matrice di calcolo dei pesi della Sostenibilità Economica .....	169
Tabella 2-26 – Matrice di calcolo dei pesi della Sostenibilità Sociale e Qualità Prestazionale .	169
Tabella 2-27 – Calcolo dei pesi della Sostenibilità in generale.....	170
Tabella 2-28 – Calcolo dei pesi della Sostenibilità Ambientale .....	170
Tabella 2-29 – Calcolo dei pesi della Sostenibilità Economica .....	170
Tabella 2-30 – Calcolo dei pesi della Sostenibilità Sociale e Qualità Prestazionale .....	170
Tabella 2-31 – Pesi locali e globali di tutti i componenti del metodo SMCAM .....	171
Tabella 3-1 – Superfici involucro Edificio Nave .....	184
Tabella 3-2 – Superfici e volumi zone termiche Edificio Nave .....	185
Tabella 3-3 – Proprietà termiche della CVO Sud.....	186
Tabella 3-4 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Sud .....	186
Tabella 3-5 – Proprietà termiche della CVO Nord.....	187
Tabella 3-6 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Nord .....	187
Tabella 3-7 – Proprietà termiche della CVO Est/Ovest .....	189
Tabella 3-8 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Est/Ovest.....	189

Tabella 3-9 – Proprietà termiche della CVO del vano scala .....	190
Tabella 3-10 – Proprietà termiche riassuntive della CVO dei vani scala .....	190
Tabella 3-11 – Tipologie e superfici chiusure verticali trasparenti .....	192
Tabella 3-12 – Proprietà termiche delle chiusure verticali trasparenti .....	192
Tabella 3-13 – Proprietà termiche delle partizioni verticali in muratura.....	193
Tabella 3-14 – Proprietà termiche riassuntive delle partizioni verticali in muratura .....	193
Tabella 3-15 – Proprietà termiche delle partizioni verticali in pannelli .....	193
Tabella 3-16 – Proprietà termiche riassuntive delle partizioni verticali in pannelli.....	193
Tabella 3-17 – Proprietà termiche della chiusura orizzontale superiore .....	194
Tabella 3-18 – Proprietà termiche riassuntive della chiusura orizzontale superiore .....	195
Tabella 3-19 – Proprietà termiche della partizione interna orizzontale .....	196
Tabella 3-20 – Proprietà termiche riassuntive della partizione interna orizzontale.....	196
Tabella 3-21 – Proprietà termiche della chiusura orizzontale inferiore .....	197
Tabella 3-22 – Proprietà termiche riassuntive della chiusura orizzontale inferiore .....	197
Tabella 3-23 – Condizioni interne di calcolo del comfort .....	199
Tabella 3-24 – Valutazione del discomfort dei gradiora per tutte le aule .....	205
Tabella 3-25 – Numero di ore al giorno in cui viene superata la temperatura interna massima accettabile .....	206
Tabella 3-26 – Affollamento delle aule .....	209
Tabella 3-27 – Confronto tra temperature misurate e simulate .....	215
Tabella 3-28 – Confronto tra $\Delta T$ misurati e simulati .....	216
Tabella 3-29 – Andamento dei disperdimenti e dei guadagni per la zona delle aule.....	219
Tabella 3-30 – Disperdimenti totali – stato di fatto .....	220
Tabella 3-31 – Guadagni totali – stato di fatto .....	220
Tabella 3-32 – Fabbisogno termico totale e unitario per la zona delle aule.....	221
Tabella 3-33 – Fabbisogno mensile di energia termica per la zona delle aule e degli uffici .....	222
Tabella 3-34 – Superfici della casa di riposo di Sospel.....	226
Tabella 3-35 – Superfici dei principali componenti.....	226
Tabella 3-36 – Superfici delle zone termiche .....	227
Tabella 3-37 – Affollamento medio dei locali .....	238
Tabella 3-38 – Temperature di progetto.....	239
Tabella 3-39 – Ricambi d'aria estivi e invernali.....	239
Tabella 3-40 – Carichi interni di progetto .....	240
Tabella 4-1 – Tipologie di isolante per le CVO.....	245
Tabella 4-2 – Proprietà termiche della CVO Sud con controparete.....	246
Tabella 4-3 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Sud con controparete .....	246
Tabella 4-4 – Proprietà termiche della CVO Nord con controparete.....	247
Tabella 4-5 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Nord con controparete .....	247
Tabella 4-6 – Proprietà termiche della CVO Est/Ovest con controparete .....	248
Tabella 4-7 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Est/Ovest con controparete.....	248
Tabella 4-8 – Proprietà termiche della CVO Vano Scala con controparete .....	249

Tabella 4-9 – Proprietà termiche riassuntive della CVO vano Scala con controparete .....	249
Tabella 4-10 – Trasmittanza termica media dell'involucro con controparete.....	250
Tabella 4-11 – Tipologie di isolante termico per insufflaggio in intercapedine .....	252
Tabella 4-12 – Proprietà termiche della CVO Sud con insufflaggio .....	252
Tabella 4-13 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Sud con insufflaggio .....	253
Tabella 4-14 – Proprietà termiche della CVO Nord con insufflaggio .....	254
Tabella 4-15 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Nord con insufflaggio .....	254
Tabella 4-16 – Proprietà termiche della CVO Est/Ovest con insufflaggio .....	255
Tabella 4-17 – Proprietà termiche riassuntive della CVO Est/Ovest con insufflaggio .....	255
Tabella 4-18 – Trasmittanza termica media dell'involucro con insufflaggio .....	256
Tabella 4-19 – Proprietà termiche dei pannelli sostitutivi al fibrocemento .....	257
Tabella 4-20 – Proprietà termiche riassuntive dei pannelli sostitutivi al fibrocemento.....	258
Tabella 4-21 – Proprietà termiche delle tipologie di serramento e oscuramento.....	259
Tabella 4-22 – Proprietà termiche delle tipologie di vetrocemento.....	260
Tabella 4-23 – Proprietà termiche della copertura con rifacimento completo .....	262
Tabella 4-24 – Proprietà termiche riassuntive della copertura con rifacimento completo.....	262
Tabella 4-25 – Proprietà termiche della copertura con isolamento nel controsoffitto.....	263
Tabella 4-26 – Proprietà termiche riassuntive della copertura con isolamento nel controsoffitto .....	264
Tabella 4-27 – Trasmittanza termica media dell'involucro con controparete.....	267
Tabella 4-28 – Codifica delle alternative con controparete.....	268
Tabella 4-29 – Trasmittanza termica media dell'involucro con insufflaggio .....	269
Tabella 4-30 – Codifica delle alternative con insufflaggio .....	269
Tabella 4-31 – Proprietà termiche riassuntive dei pannelli sostitutivi al fibrocemento.....	270
Tabella 4-32 – Codifica delle alternative per la sostituzione dei pannelli in fibrocemento.....	271
Tabella 4-33 – Proprietà termiche delle tipologie di serramento e oscuramento.....	271
Tabella 4-34 – Codifica delle alternative relative ai serramenti .....	272
Tabella 4-35 – Proprietà termiche delle tipologie di vetrocemento.....	273
Tabella 4-36 – Codifica delle alternative relative al vetrocemento .....	273
Tabella 4-37 – Proprietà termiche riassuntive degli interventi sulla copertura .....	273
Tabella 4-38 – Codifica delle alternative relative agli interventi sulla copertura .....	274
Tabella 4-39 – Codifica delle alternative relative all'impianto di illuminazione .....	274
Tabella 4-40 – Codifica delle alternative relative all'impianto di riscaldamento.....	274
Tabella 4-41 – Codifica delle alternative relative all'impianto di trattamento aria.....	275
Tabella 4-42 – Fattore di conversione energia – CO <sub>2</sub> .....	278
Tabella 4-43 – Emissioni di CO <sub>2</sub> – Edificio Nave .....	279
Tabella 4-44 – Stralcio di computo delle quantità .....	280
Tabella 4-45 – Stralcio di calcolo della EE .....	281
Tabella 4-46 – Stralcio di calcolo della EE totale.....	281
Tabella 4-47 – Energia incorporata – Edificio nave.....	282
Tabella 4-48 – Fabbisogno energia primaria – Edificio Nave .....	284



Tabella 4-49 – Consumi elettrici medi mensili .....	286
Tabella 4-50 – Consumi elettrici medi diurni e notturni .....	286
Tabella 4-51 – Consumi elettrici medi lavorativi e festivi .....	287
Tabella 4-52 – Potenza dei corpi illuminanti .....	287
Tabella 4-53 – Consumo impianto di illuminazione .....	287
Tabella 4-54 – Consumi elettrici – Edificio Nave .....	288
Tabella 4-55 – Parametri Ambientali – Edificio Nave .....	289
Tabella 4-56 – Stralcio di calcolo dei costi iniziali .....	290
Tabella 4-57 – Costi iniziali – Edificio Nave .....	291
Tabella 4-58 – Stralcio dei calcoli dei costi di manutenzione - costi .....	293
Tabella 4-59 – Stralcio dei calcoli dei costi di manutenzione - frequenze .....	293
Tabella 4-60 – Costi di manutenzione – Edificio Nave .....	294
Tabella 4-61 – Dati per il calcolo dei costi $EP_H$ .....	295
Tabella 4-62 – Costi energetici – Edificio Nave .....	296
Tabella 4-63 – Dati per il calcolo dei costi $EP_C$ .....	297
Tabella 4-64 – Costi energia primaria – Edificio Nave .....	298
Tabella 4-65 – Dati per il calcolo dei costi elettricità .....	299
Tabella 4-66 – Costi elettricità – Edificio Nave .....	299
Tabella 4-67 – Stralcio di calcoli dei costi di dismissione .....	300
Tabella 4-68 – Costi di dismissione – Edificio Nave .....	301
Tabella 4-69 – Analisi di sensitività dei costi di dismissione .....	302
Tabella 4-70 – Risultati analisi di sensitività sui costi di dismissione .....	302
Tabella 4-71 – Parametri economici – Edificio Nave .....	303
Tabella 4-72 – Comfort termico .....	305
Tabella 4-73 – Comfort acustico .....	307
Tabella 4-74 – Dati utili per il calcolo della IAQ .....	308
Tabella 4-75 – Qualità dell'aria interna .....	308
Tabella 4-76 – Livello di illuminazione aula B.4.1 .....	309
Tabella 4-77 – Comfort visivo .....	309
Tabella 4-78 – Parametri Qualità Prestazionale – Edificio Nave .....	310
Tabella 4-79 – Parametri Ambientali normalizzati .....	312
Tabella 4-80 – Parametri Economici normalizzati .....	313
Tabella 4-81 – Parametri Qualità Prestazionale normalizzati .....	314
Tabella 4-82 – Matrice di calcolo dei pesi della Sostenibilità Ambientale – Edificio Nave .....	315
Tabella 4-83 – Matrice di calcolo dei pesi della Sostenibilità Economica – Edificio Nave .....	315
Tabella 4-84 – Calcolo dei pesi della Sostenibilità Ambientale – Edificio Nave .....	315
Tabella 4-85 – Calcolo dei pesi della Sostenibilità Economica – Edificio Nave .....	315
Tabella 4-86 – Pesi SMCAM Edificio Nave .....	316
Tabella 4-87 – Parametri Ambientali pesati e normalizzati – Edificio Nave .....	317
Tabella 4-88 – Parametri Economici normalizzati e pesati – Edificio Nave .....	318
Tabella 4-89 – Parametri Prestazionali normalizzati e pesati – Edificio Nave .....	319

Tabella 4-90 – Classifiche parziali – Edificio nave .....	321
Tabella 4-91 – Classifica globale – Edificio nave .....	323
Tabella 4-92 – Classifica delle migliori alternative – Edificio Nave .....	325
Tabella 4-93 – Alternative selezionate – Edificio Nave .....	326
Tabella 4-94 – Confronto SDF e alternative selezionate – p. Ambientali .....	326
Tabella 4-95 – Confronto SDF e alternative selezionate – p. Economici .....	327
Tabella 4-96 – Confronto SDF e alternative selezionate – p. Prestazionali .....	327
Tabella 4-97 – Differenze sui metodi di stima – CVO.....	328
Tabella 4-98 – Differenze sui metodi di stima – Fibrocemento .....	328
Tabella 4-99 – Differenze sui metodi di stima – CVT .....	329
Tabella 4-100 – Differenze sui metodi di stima – Vetrocemento .....	329
Tabella 4-101 – Differenze sui metodi di stima – COS .....	329
Tabella 4-102 – Differenze sui metodi di stima – Impianti .....	329
Tabella 4-103 – Proprietà termiche del solaio a terra delle zone riscaldate .....	332
Tabella 4-104 – Proprietà termiche riassuntive del solaio a terra delle zone riscaldate .....	332
Tabella 4-105 – Proprietà termiche del solaio di interpiano .....	333
Tabella 4-106 – Proprietà termiche riassuntive del solaio di interpiano .....	333
Tabella 4-107 – Proprietà termiche del solaio su spazio aperto.....	334
Tabella 4-108 – Proprietà termiche riassuntive del solaio su spazio aperto .....	334
Tabella 4-109 – Proprietà termiche della copertura piana praticabile .....	335
Tabella 4-110 – Proprietà termiche riassuntive della copertura piana praticabile .....	335
Tabella 4-111 – Proprietà termiche delle partizioni interne verticali semplici.....	336
Tabella 4-112 – Proprietà termiche riassuntive delle partizioni interne verticali semplici .....	336
Tabella 4-113 – Proprietà termiche delle partizioni interne verticali tra alloggi .....	337
Tabella 4-114 – Proprietà termiche riassuntive delle partizioni interne verticali tra alloggi....	337
Tabella 4-115 – Proprietà termiche della chiusura verticale opaca con isolamento esterno ..	339
Tabella 4-116 – Proprietà termiche riassuntive della chiusura verticale opaca con isolamento esterno .....	339
Tabella 4-117 – Proprietà termiche della chiusura verticale opaca con isolamento interno...	340
Tabella 4-118 – Proprietà termiche riassuntive della chiusura verticale opaca con isolamento interno.....	340
Tabella 4-119 – Proprietà termiche della chiusura verticale opaca leggera.....	341
Tabella 4-120 – Proprietà termiche riassuntive della chiusura verticale opaca leggera .....	341
Tabella 4-121 – Proprietà termiche riassuntive delle chiusure opache.....	343
Tabella 4-122 – Codifica delle alternative di impianto di trattamento aria.....	343
Tabella 4-123 – Emissioni di CO <sub>2</sub> - Edificio Sospel .....	345
Tabella 4-124 – Computo metrico delle quantità – Edificio Sospel .....	346
Tabella 4-125 – Calcolo dell'energia incorporata.....	347
Tabella 4-126 – Energia incorporata – Edificio Sospel .....	347
Tabella 4-127 – Consumo energia primaria per il riscaldamento .....	348
Tabella 4-128 – Consumo energia primaria per il raffrescamento .....	348

Tabella 4-129 – Consumo di energia primaria – Edificio Sospel .....	349
Tabella 4-130 – Dati impianto di ventilazione.....	349
Tabella 4-131 – Ricambi orari divisi per zone .....	350
Tabella 4-132 – Consumi elettrici ventilazione – Edificio Sospel .....	350
Tabella 4-133 – Parametri Ambientali – Edificio Sospel .....	350
Tabella 4-134 – Costo iniziale CVO01.....	351
Tabella 4-135 – Costo iniziale CVO02.....	352
Tabella 4-136 – Costo iniziale CVO03.....	353
Tabella 4-137 – Costo iniziale impianto di trattamento aria.....	354
Tabella 4-138 – Costi iniziali – Edificio Sospel.....	354
Tabella 4-139 – Dati utili per il calcolo dei costi di manutenzione .....	354
Tabella 4-140 – Costi di manutenzione – Edificio Sospel.....	355
Tabella 4-141 – Dati utili per il calcolo dei costi energetici.....	355
Tabella 4-142 – Costo energia per il riscaldamento – Edificio Sospel.....	355
Tabella 4-143 – Costo energia per il raffrescamento – Edificio Sospel .....	356
Tabella 4-144 – Dati utili per il calcolo dei costi elettrici .....	356
Tabella 4-145 – Costi elettrici – Edificio Sospel.....	356
Tabella 4-146 – Parametri Economici – Edificio Sospel .....	357
Tabella 4-147 – Comfort termico – Edificio Sospel .....	357
Tabella 4-148 – Comfort acustico – Edificio Sospel .....	358
Tabella 4-149 – Parametri Qualità Prestazionale – Edificio Sospel.....	358
Tabella 4-150 – Parametri Ambientali normalizzati.....	360
Tabella 4-151 – Parametri Economici normalizzati.....	360
Tabella 4-152 – Parametri Prestazionali normalizzati.....	360
Tabella 4-153 – Matrice di calcolo dei pesi della Sostenibilità Ambientale – Edificio Sospel...	361
Tabella 4-154 – Matrice di calcolo dei pesi della Sostenibilità Economica – Edificio Sospel....	361
Tabella 4-155 – Matrice di calcolo dei pesi della Qualità Prestazionale – Edificio Sospel .....	361
Tabella 4-156 – Calcolo dei pesi della Sostenibilità ambientale – Edificio Sospel .....	361
Tabella 4-157 – Calcolo dei pesi della Sostenibilità economica – Edificio Sospel.....	361
Tabella 4-158 – Parametri prestazionali normalizzati e pesati – Edificio Sospel .....	362
Tabella 4-159 – Parametri Ambientali pesati e normalizzati – Edificio Sospel .....	362
Tabella 4-160 – Parametri Economici normalizzati e pesati – Edificio Sospel .....	363
Tabella 4-161 – Parametri Prestazionali normalizzati e pesati – Edificio Sospel .....	363
Tabella 4-162 – Classifica parziale – Edificio Sospel.....	364
Tabella 4-163 – Classifica globale – Edificio Sospel.....	366
Tabella 4-164 – Classifica ordinata delle alternative – Edificio Sospel .....	367
Tabella 4-165 – Differenze dei metodi di stima – Edificio Sospel .....	369