



**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

# **IMPLEMENTAZIONE DI UN METODO MULTICRITERIO PER L'ANALISI DI SOSTENIBILITÀ**

DEFINIZIONE DI UN METODO DI ANALISI PER INTERVENTI EDILIZI E  
APPLICAZIONE A DUE CASI DI STUDIO, RELATIVAMENTE A UNA NUOVA  
COSTRUZIONE E A UNA RIQUALIFICAZIONE DELL'ESISTENTE

Relatore:  
Correlatori:

Prof. Dott. Bruno DANIOTTI  
Prof. Ing. Fulvio RE CECCONI  
Prof. Francesco PRIZZON (Politecnico di Torino)

Tesi di Laurea di:  
Sebastiano MALTESE Matr. 750366

Anno Accademico 2010-2011



## i. RINGRAZIAMENTI

Devo ammettere che mi trovo in difficoltà! Dopo tutte queste pagine scritte in questi mesi, mi rendo conto di aver quasi finito questo percorso e di avere tante di quelle persone da ringraziare che altre 400 pagine non basterebbero a contenerle tutte! Cominciamo con i ringraziamenti classici... e vediamo come viene!

Ringrazio innanzitutto i miei genitori, Annamaria e Marino, e i miei nonni, Rosanna e Renato, per avermi dato tutto il sostegno morale, economico e soprattutto pappatorio!

Ringrazio la mia fidanzata Thea, che mi ha confortato, fatto ridere e sognare in questi mesi, che sarebbero stati altrimenti più grigi senza i colori delle fisarmoniche e dei pifferi! Un ringraziamento particolare va anche al suo gatto che mi ha salutato tante sere su Skype!

Ringrazio il Prof. Bruno Daniotti e il Prof. Fulvio Re Cecconi, che in questi mesi ho stressato con i problemi più disparati, ma che hanno sempre e comunque acconsentito ad aiutarmi! Ovviamente ringrazio tutti quelli che mi hanno aiutato nell'ambito del Progetto Campus Sostenibile e gli Ing. F. Rigamonti ed E. Del Vesco, che mi hanno fornito tutto l'aiuto possibile riguardo all'edificio scelto come secondo caso di studio.

Ringrazio i miei compagni di questi cinque (quasi sei) anni, che mi hanno fatto divertire, aiutato nei momenti difficili, scopiazzato le relazioni e tanto altro ancora! In particolare ringrazio Michela, che in questi anni mi ha sempre aiutato e sopportato, dandomi buoni consigli e cucinando quando io non avevo voglia. Un ringraziamento è necessario alla "compagnia del DIS", composta principalmente da Emmanuele, Alessio, Giuliano, il Daniele, Francesco, Paolo e Alberto; senza di loro fare la tesi non sarebbe stata la stessa cosa (avrei fatto di più invece che stare alle macchinette a chiacchierare o a dare fastidio a Pisolo, che ovviamente ringrazio per avermi allietato le giornate col suo russare). Ringrazio Filippo (entrambi!!!), Nicolò, Marco, Maria, Gianluca e tutti i miei altri compagni di corso, che sarebbe troppo difficile riportare in una sola pagina (e anche troppo faticoso); vi voglio davvero bene!

Ringrazio tutti i miei compagni dell'ASP, e in particolare Elisa, Giovanni, Lorenzo, Francesco e Mattia, che sono stati costretti a sopportarmi per questi due anni di School e paper e che mi hanno aiutato, insegnato tante cose, ma soprattutto mi hanno fatto divertire un sacco!

Ringrazio i miei coinquilini, Francesco (vecchio e nuovo), Emanuele e Carlandrea, che in questi anni sono diventati una seconda famiglia, un po' più disordinata e casinara della prima, ma comunque una bella famiglia! In cui ovviamente va incluso anche Gruginò!

Ringrazio la Signora Anna, il Signor Lino e Matteo, che sono stati in cinque anni la mia fonte di cibo primaria, a suon di hamburger e salamelle! Seguono a ruota i buffet a sbafo del DIS...

Ringrazio il mio computer, che ha deciso di resistere fino all'ultimo, resistendo a una fusione e a file di grandezze improponibili! Bravo, ora puoi anche romperti!

Mi ringrazio, perché sono contento del mio lavoro e perché, nel caso nessuno mi ringraziasse, almeno un ringraziamento ce l'ho!

Ma ora basta! La Tesi è sulla Sostenibilità e quindi non posso usare più di un foglio per questi ringraziamenti, quindi spazio alla Tesi!

**GRAZIE A TUTTI!!!**



## ii. **ABSTRACT** (ENGLISH)

The main goal of the Thesis is to create a **Multi-Criteria Method [2-45]** able to collect all the existent instruments for the **Sustainability assessment [1-01]** of interventions from the Environmental, Economic and Social point of view, integrated with the internal space performance. The measure of the Sustainability of a project alternative means the evaluation, using the correct instruments, of some parameters, as instance: for the Economic Sustainability the whole life-cycle costs, for the Environmental one the embodied energy, the CO<sub>2</sub>, the energy demand, both thermal and electric, and for the Social Sustainability could be useful to analyze the thermal comfort, the air speed and air quality, the acoustic comfort and the illumination level. The number of parameters, thanks to the great flexibility of the method, should be established in connection with the interventions in analysis. The output of this choice method is a ranking of the most sustainable project alternatives, with the aim to help the designer in the selection of the most suitable alternative. The method, called **SMCAM (Sustainability Multi-Criteria Analysis Method)** is created in a way that allows to evaluate interventions of different categories, so an alternative does not exclude another one, and it is possible to evaluate the combination of more different alternatives to get the best solution in terms of Sustainability.

The path of the Thesis starts with a research on the state of the art of multi-criteria methods, **BIM (Building Information Modelling) [1-52]** and **Sustainability analysis**; also the actual legislation, mandatory and voluntary, has been considered by reviewing papers, works and international projects.

The next phase is the creation of the method itself, that allows the aggregation and the comparison of parameters with different order of magnitude and unit of measure thanks to a normalization system studied appositely. The method took inspiration to the existent comparison method **AHP (Analytical Hierarchy Process) [2-20]** and includes a **weighting system** able to weight all the components of the hierarchic scale made by interviewing a large panel of experts and professionals, by the creation of an **on-line survey**.

The last phase of the work is the application of the SMCAM method to two case studies appositely selected: an **existent university building of the Leonardo Campus**, inside the much bigger project **Campus Sostenibile [3-01]** and a **new construction building**, actually in the definitive design phase, designated to be an hospital and situated in Sospel, in the South of the France, near Menton.

These two cases have been selected to **validate the method** with the problems of an existent building and of a new one, with really less restriction in terms of alternatives. Various series of alternatives have been analyzed, regarding intervention both of construction and plants, to allow the evaluation of the criticality and potentiality of the method. A **BIM model**, fully interoperable, has been created for each case study to allow the energetic, environmental and comfort assessment and for the computation of materials and other quantities.



### iii. **ABSTRACT** (ITALIANO)

Lo scopo che si vuole raggiungere con questo lavoro di Tesi è quello di creare un **metodo multicriterio [2-45]** che raggruppi tutti gli strumenti esistenti per **valutare la Sostenibilità [1-01]** di un intervento dal punto di vista Ambientale, Economico e della Qualità Prestazione (comprensivo anche della Sostenibilità Sociale). Quantificare la Sostenibilità di un intervento significa stimare attraverso gli opportuni strumenti i parametri ad essi corrispondenti, come ad esempio: per la Sostenibilità Economica il costo globale, per quella Ambientale l'energia incorporata, la CO<sub>2</sub>, i kWh termici ed elettrici, sia per illuminazione che per utenze e infine per la Qualità Prestazionale e Sostenibilità Sociale si tratta di valutare la qualità ambientale interna, suddivisa in comfort termoigrometrico, qualità e velocità dell'aria, comfort acustico e livello di illuminazione. Il numero e la tipologia di parametri, grazie alla flessibilità del metodo, saranno comunque valutati in relazione agli interventi oggetto d'analisi. L'output di questo metodo di scelta sarà una classifica di interventi a sostegno delle scelte che un progettista deve eseguire. Il metodo, chiamato **SMCAM (Sustainability Multi-Criteria Analysis Method)** è stato creato in modo da permettere di valutare interventi appartenenti a categorie differenti, quindi un'alternativa non esclude necessariamente tutte le altre, ed è possibile anche valutare la combinazione di più alternative per raggiungere la migliore soluzione in termini di Sostenibilità.

Il percorso di Tesi prevede lo svolgimento di una ricerca sullo stato dell'arte riguardante i metodi multicriterio, il **BIM (Building Information Modelling) [1-52]** e le **analisi di Sostenibilità**; verranno prese in considerazione sia le normative vigenti sia gli ultimi sviluppi tramite la lettura di paper, relazioni e progetti internazionali.

La fase successiva è quella di creazione del metodo vero e proprio, che permette l'aggregazione e il confronto di parametri con differenti ordini di grandezza e unità di misura attraverso un sistema di normalizzazione studiato ad hoc. Il metodo si ispira all'esistente metodo di confronto **AHP (Analytical Hierarchy Process) [2-20]** e prevede la **pesatura delle varie componenti** attraverso la raccolta di pareri di esperti del settore e professionisti mediante un **questionario on-line** appositamente creato.

L'ultima fase prevede l'applicazione del metodo a due casi di studio appositamente selezionati: un **edificio universitario esistente del Campus Leonardo**, all'interno del ben più vasto progetto **Campus Sostenibile [3-01]** e un **edificio di nuova costruzione** con destinazione d'uso ospedaliera situato a Sospel in Francia vicino a Menton, attualmente in fase di progettazione definitiva.

Questo per **testare l'efficacia del metodo e validare il suo funzionamento** in rapporto all'esistente, molto più vincolato, e alla nuova costruzione. Vengono infine analizzati una serie di interventi, sia edilizi sia impiantistici, per permettere di stimare le potenzialità e le criticità del metodo. Per permettere le analisi energetiche, di comfort, ambientali e il computo dei materiali è stato creato un **modello BIM** per ogni caso di studio.





## iv. INDICE

i.	Ringraziamenti .....	i
ii.	Abstract (English) .....	iii
iii.	Abstract (Italiano) .....	v
v.	Introduzione.....	1
1.	La Sostenibilità in Edilizia .....	5
1.1.	Sostenibilità.....	6
1.1.1.	Sostenibilità Economica .....	12
1.1.2.	Sostenibilità Ambientale .....	17
1.1.3.	Valutazione della prestazione energetica .....	31
1.1.4.	Sostenibilità Sociale.....	36
1.2.	Qualità Prestazionale .....	38
1.2.1	Comfort termico.....	39
1.2.2	Qualità dell'aria .....	52
1.2.3	Illuminazione .....	53
1.2.4.	Acustica .....	54
1.3.	BIM: Building Information Modelling.....	57
1.4.	Prodotti da costruzione.....	64
1.5.	Riferimenti bibliografici.....	71
2.	Un Metodo multicriterio per la valutazione della Sostenibilità .....	75
2.1.	Ricerca e analisi dei requisiti.....	76
2.1.1.	Requisiti ambientali.....	78
2.1.2.	Requisiti economici .....	82
2.1.3.	Requisiti sociali e prestazionali .....	84
2.2.	Analisi dei metodi e degli strumenti di valutazione .....	88
2.2.1.	Parametri ambientali.....	88
2.2.2.	Parametri economici .....	92
2.2.3.	Parametri sociali e di qualità prestazionale .....	108
2.3.	Introduzione ai metodi multicriterio.....	114

2.3.1.	Esempi di metodi esistenti .....	116
2.3.2.	Analisi di metodi attualmente in uso .....	117
2.4.	Sviluppo del metodo .....	121
2.4.1.	Percorso concettuale .....	121
2.4.2.	Esempi di algoritmi di ottimizzazione .....	123
2.4.3.	Metodo AHP .....	125
2.5.	SMCAM (Sustainability Multi-Criteria Analysis Method) .....	134
2.5.1.	Identificazione delle alternative .....	134
2.5.2.	Identificazione dell'obiettivo .....	135
2.5.3.	Identificazione dei criteri .....	135
2.5.4.	Creazione di una gerarchia .....	135
2.5.5.	Creazione di una tabella di parametri .....	136
2.5.6.	Valutazione di parametri qualitativi .....	138
2.5.7.	Normalizzazione dei parametri .....	138
2.5.8.	Valutazione dell'importanza relativa (pesatura) .....	143
2.5.9.	Stesura delle classifiche delle alternative .....	148
2.5.10.	Analisi delle classifiche globali e parziali .....	150
2.5.11.	Scelta dell'alternativa migliore .....	150
2.5.12.	Raccolta dei feedback e implementazione del metodo .....	150
2.5.13.	Visualizzazione grafica dei risultati .....	150
2.6.	Organizzazione della struttura gerarchica .....	153
2.6.1.	Obiettivi .....	153
2.6.2.	Criteri .....	153
2.6.3.	Parametri .....	158
2.6.4.	Alternative .....	160
2.7.	Pesatura degli elementi .....	161
2.7.1.	Stesura dei questionari .....	161
2.7.2.	Raccolta e analisi dei risultati .....	163
2.8.	Riferimenti bibliografici .....	176
3.	Descrizione dei casi di studio .....	181
3.1.	Campus Sostenibile – Riqualificazione dell'esistente .....	182

3.1.1.	Tavoli tematici e sviluppo del progetto.....	183
3.1.2.	Edificio 14 - Nave.....	183
3.2.	Casa di riposo – Sospel (FR) – Nuova costruzione.....	224
3.2.1.	L’edificio .....	225
3.2.2.	Modello di analisi .....	228
3.3.	Riferimenti bibliografici.....	241
4.	Applicazione del metodo SMCAM .....	243
4.1.	Campus Sostenibile – Riqualificazione dell’esistente .....	244
4.1.1.	Stato di progetto .....	244
4.1.2.	Identificazione delle alternative.....	266
4.1.3.	Calcolo dei parametri .....	275
4.1.4.	Applicazione del metodo SMCAM.....	311
4.1.5.	Scelta dell’alternativa migliore.....	325
4.1.6.	Considerazioni sulle valutazioni .....	327
4.2.	Casa di riposo – Sospel (FR) – Nuova costruzione.....	331
4.2.1.	Ipotesi di soluzioni progettuali .....	331
4.2.2.	Identificazione delle alternative.....	342
4.2.3.	Calcolo dei parametri .....	344
4.2.4.	Applicazione del metodo SMCAM.....	359
4.2.5.	Scelta dell’alternativa migliore.....	367
4.2.6.	Considerazioni sulle valutazioni .....	369
4.3.	Riferimenti bibliografici.....	371
vi.	Conclusioni.....	373
vii.	Bibliografia.....	377
viii.	Allegati .....	385
ix.	Indice delle figure.....	387
x.	Indice delle formule .....	392
xi.	Indice delle tabelle .....	394



## v. INTRODUZIONE

Obiettivo di questo lavoro di Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi è quello di creare un metodo di scelta multicriterio che permetta ai progettisti di analizzare le alternative che si presentano durante la fase di progettazione con attenzione alla Sostenibilità.

L'intero progetto è stato ispirato ai **principi fondamentali della Sostenibilità** in edilizia, che sono brevemente:

- La comprensione piena dello stato di fatto prima di iniziare a valutare le alternative;
- Il continuo coinvolgimento delle principali parti interessate, compresi anche gli utenti;
- La promozione di collaborazioni interdisciplinari tra le varie parti coinvolte;
- L'utilizzo di analisi basate sul ciclo di vita, comprendenti ogni fase dalla progettazione alla dismissione;
- L'utilizzo di un approccio sistematico per la valutazione delle connessioni tra sfera economica, ambientale e sociale;
- Il rispetto delle normative vigenti;
- Il rispetto di linee guida e normative volontarie più innovative rispetto a quelle vigenti;
- La gestione di tutto il processo di definizione degli obiettivi, monitoraggio, valutazione e controllo in modo da creare un processo iterativo in continuo miglioramento;
- L'identificazione di connessioni tra il rispetto dell'ambiente e lo sviluppo.

Nel **Capitolo 1** si trova infatti lo **stato dell'arte dei metodi e degli strumenti** per effettuare **valutazioni di Sostenibilità in campo Ambientale, Economico, Sociale e della Qualità Prestazionale**. Sono state esaminate numerose norme attualmente vigenti, regolamenti e linee guida volontarie, progetti e ricerche, per fornire un'idea il più possibile chiara su questa tematica. Durante tutto il percorso della Tesi sono comunque stati revisionati metodi e strumenti innovativi a servizio delle analisi di Sostenibilità, dai software ai metodi e alle procedure di calcolo.

L'intero lavoro è iniziato con la partecipazione al progetto **Campus Sostenibile**, che ha fatto nascere l'idea di creare uno strumento utile alla gestione delle analisi, il cui numero elevato crea dei problemi di gestione e di confronto tra le alternative. Il metodo multicriterio che si andrà a creare nel **Capitolo 2** è quindi realizzato in modo da essere semplice, facilmente adattabile alle differenti situazioni e continuamente migliorabile attraverso l'analisi dei feedback. Per creare questo metodo ci si è ispirati a quelli esistenti, sia sotto forma di software sia di algoritmi matematici, per riuscire a costruire un sistema che si adattasse facilmente a tutte le possibili situazioni, gestendo numerosi parametri e fornendo un valido sostegno nella fase decisionale della progettazione. Il nome scelto per questo nuovo metodo è **Sustainability Multi-Criteria Analysis Method**, o in breve, **SMCAM**.

Un passo fondamentale è stato quello di coinvolgere direttamente studenti, professori, professionisti e esperti del settore nella fase di pesatura delle varie componenti, in modo da non inserire dei valori arbitrari ma nati dal pensiero comune. È stato quindi creato un

**questionario on-line** che ha permesso di comprendere le preferenze dei progettisti, attuali e futuri, in modo da valutare quali sono gli ambiti più o meno importanti e a quali di questi è giusto dare maggior peso. Questa fase di raccolta dei dati, contenuta alla fine del Capitolo 2, può essere continuata anche successivamente e implementata con nuovi dati e nuovi criteri a seconda della necessità.

Per permettere l'**applicazione** e la successiva **validazione del metodo SMCAM** sono stati selezionati appositamente due casi di studio nettamente differenti; Nel **Capitolo 3** infatti sono stati analizzati in dettaglio i due casi di studio scelti: l'**Edificio 14 del Campus Leonardo del Politecnico di Milano**, meglio conosciuto come Nave, e una **casa di riposo in fase di progettazione definitiva a Sospel**, in Francia vicino a Menton. Si è scelto di analizzare due casi di studio per poter valutare l'efficacia del metodo multicriterio sia in un **progetto di riqualificazione dell'esistente** sia in fase di progettazione di un **edificio di nuova costruzione**, molto meno vincolato dal punto di vista delle soluzioni di intervento. Per la Nave è stato definito con precisione lo stato di fatto, soprattutto per quanto riguarda le chiusure opache e vetrate, gli impianti, la geometria e le superfici, gli orari di utilizzo e gli affollamenti. Per quanto riguarda la casa di riposo sono state invece definite con precisione tutte le zone termiche, le aree, gli orari di funzionamento, le temperature interne, i ricambi d'aria e gli orari di funzionamento di progetto. In entrambi i casi si ha quindi una precisa conoscenza dello stato di fatto e di progetto, utile per la successiva fase di proposta e selezione delle alternative.

I casi di studio hanno fornito la possibilità di valutare le alternative più disparate, permettendo di analizzare in dettaglio tutte le criticità e le potenzialità del metodo.

Nell'ambito degli strumenti a servizio delle analisi di Sostenibilità, per entrambi i casi di studio è stato creato un **modello tridimensionale** basato su una **piattaforma BIM**. Questi modelli sono stati utilizzati per effettuare le analisi energetiche, di comfort, i computi metrici e per la gestione delle zone termiche. Si è deciso di sviluppare modelli di questo tipo in quanto la progettazione e la fase decisionale devono essere un processo sempre più integrato e **file interoperabili** di questo genere permettono di gestire al meglio entrambe le fasi. Il modello della Nave è stato inoltre inserito nel più grande modello dell'intero Campus Leonardo, attualmente in fase di sviluppo presso il Dipartimento di Architettura e Pianificazione DiAP. Entrambi i modelli permettono l'implementazione con nuovi dati e di essere modificati e adattati a seconda delle analisi che si ritiene necessario svolgere.

Nel **Capitolo 4** si procede con la **validazione del metodo multicriterio SMCAM** attraverso l'analisi di differenti soluzioni progettuali collegate ai due casi di studio. Le alternative sono sia edilizie sia impiantistiche e coprono tutti i componenti più importanti. Per ogni possibile soluzione sono stati calcolati tutti i parametri da inserire nel metodo e sono stati eseguiti tutti i passaggi precedentemente descritti in linea teorica nel Capitolo 2, che comprendono le fasi di normalizzazione, pesatura e aggregazione dei parametri. Durante la fase di applicazione del metodo sono proposte delle modifiche e dei miglioramenti alla procedura da eseguire, in modo da ottimizzare il funzionamento del metodo SMCAM.

In ultimo sono state stilate per entrambi i casi di studio le **classifiche delle possibili alternative in ordine di Sostenibilità**. L'applicazione pratica ha permesso di evidenziare le criticità e i punti forti del metodo, che saranno successivamente valutati nelle conclusioni.

Il proposito è inoltre di **ottimizzare il funzionamento del metodo** creato, non legandolo ai casi di studio ma creando un sistema flessibile e facilmente modificabile, anche durante le varie fasi in cui si divide un progetto.

Infine vengono riportate le **conclusioni e i possibili sviluppi futuri** di questo lavoro di Tesi.

Nota di consultazione: tutti i riferimenti bibliografici sono riportati alla fine di ognuno dei quattro Capitoli. La bibliografia completa è riportata invece alla fine della Tesi.