

# Algoritmi Genetici per il Project Management e la progettazione esecutiva nelle costruzioni

RICERCA E  
SPERIMENTAZIONE/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION

Sara Tiene, Marco Alvisè Bragadin, Andrea Ballabeni,  
Dipartimento di Architettura, Università di Bologna, Italia

sara.tiene.92@gmail.com  
marcoalvisè.bragadin@unibo.it  
andrea.ballabeni@unibo.it

**Abstract.** Tempo, costo e qualità sono i tre principali KPIs che devono essere ottimizzati nel Project Management delle costruzioni. Mentre l'approccio di trade-off tra tempi e costi è ben noto, quello tempi-costi-qualità è in genere basato sull'esperienza del Project Manager. L'approccio presentato si basa sul caso di studio del progetto esecutivo dell'involucro di un nuovo edificio universitario in costruzione. Le prestazioni di tempo, costo e qualità dipendono dalle prestazioni di ciascuno dei componenti della parete. In base ad indagini di mercato è possibile individuare tre alternative di prodotti per ogni componente e specificare i KPIs. L'ottimizzazione di tempo, costo e qualità presentata utilizza gli Algoritmi Genetici per selezionare le soluzioni costruttive che ottimizzano la costruzione.

**Parole chiave:** Project Management; Costruzione; Qualità; Algoritmi genetici; Ottimizzazione tempi-costi-qualità.

## Introduzione

Il Project Manager non si limita ad attuare i diversi processi di gestione di un progetto, ma deve affrontare anche il compito ben più complesso della supervisione di tutti le fasi del processo edilizio garantendo la soddisfazione degli obiettivi di budget, di risorse e di limiti di tempo concordati con il committente. L'ostacolo principale per il raggiungimento di questi obiettivi sono le varianti di progetto e del suo ambiente realizzativo che richiedono una ottimizzazione continua delle prestazioni realizzabili e raggiungibili. Per questo, il Project Manager nella fase di costruzione deve potersi servire di tecniche efficaci per la pianificazione, la progettazione esecutiva e la gestione della costruzione con allo scopo di controllarne tempi, costi e qualità dalle fasi iniziali sino al completamento dell'opera. Tempi, costi e qualità sono i tre Key Performance Indicator (KPIs) che svolgono un ruolo fondamentale nel sistema di processi a base del Project Management: la pianificazione, la programmazione ed il controllo della costruzione. La letteratura esistente si concentra principalmente sull'analisi del

A Genetic Algorithm-based approach for Project Management and developed design of construction

**Abstract.** Construction Project Management processes aim at the optimization of three main KPIs: time, cost and quality. As the time / cost trade-off approach is well known, quality optimization is still pursued with a practical approach, often based upon Project Manager's experience. A case study of construction of a new university building is presented, focusing on external walls detailed design. Wall performances concerning time, costs and quality depend on the performances of each of the product layer that composes the wall. For each layer three commercial options has been considered. Therefore, a time - cost - quality trade-off procedure has been implemented using Genetic Algorithms, with the aim of finding a set of optimal solutions for the construction of the building envelope.

**Keywords:** Project management; Construction; Quality; Genetic algorithms; Time-cost-quality trade-off.

bilanciamento tra tempi e costi (*time-cost trade-off*), evidenziando limiti nella ricerca di modelli che ottimizzino congiuntamente tempo, costi e qualità. Solo recentemente i ricercatori e gli operatori del settore hanno compreso l'importanza di studiare metodi per il *trade-off* di questi tre indicatori, presentando ricerche mirate allo sviluppo di nuove soluzioni. Questo approccio ha anche portato all'identificazione di nuovi tipi di metodi di contrattazione in fase di gara progettati per raggiungere obiettivi multipli, tra cui la riduzione al minimo dei costi e dei tempi di costruzione, massimizzando la qualità, come nel caso di costruzioni di strade (Anderson e Russell, 2001; Minchin e Smith, 2001; El Rayes e Kandil, 2005; Kandil El Rayes, 2006). L'uso degli Algoritmi Genetici (GA) per ottimizzare il processo di valutazione di più soluzioni basate su funzioni obiettivo (Holland, 1975) è l'approccio di risoluzione scelto per questo problema di trade-off, ovvero di ottimizzazione. Lo scopo del presente lavoro di ricerca è quello di sviluppare un'analisi multi-obiettivo di prodotti e processi in grado di valutare gli indici di tempo, costo e qualità di alcune fasi della costruzione di un edificio per supportare le funzioni di Project Management. La procedura proposta è stata implementata con Algoritmi Genetici basati su un'applicazione software sviluppata con Matlab®. Per testare l'approccio sviluppato è stato studiato un caso studio reale di un progetto di costruzione di un edificio della nuova sede del campus universitario di Cesena, in Italia.

## Stato dell'arte

Il Construction Management (CM) è un servizio professionale che applica tecniche di gestione efficaci per la pianificazione, la

## Introduction

Project managers do not just manage different aspects of project processes, but they have to face a more complex task: overseeing all aspects of the project and ensuring that it meets the agreed goals, budget, resources and time constraints. The main barriers for their achievement are the changes in the project and in its environment necessitating cost, time, and quality trade-offs. Therefore, the Construction Manager needs to apply effective management techniques to the planning, design, and construction of a project from inception to completion with the purpose of controlling time, cost and quality. Time, cost and quality are the three Key Performance Indicators (KPIs) that play a significant role in the core processes of construction project management, the planning, scheduling and controlling of projects.

Existing literature is mainly focused on analyzing time-cost trade-off with little or no reported research focusing on models for optimizing time, cost, and quality jointly. In recent years, researchers and practitioners understood the importance of the trade-off between these three indicators, therefore leading to research work aiming at the development of new solutions. This approach lead to the identification of new types of contracting methods designed to achieve multiple objectives, including minimizing construction cost and time, while maximizing its quality (Anderson, Russell, 2001; Minchin, Smith, 2001; El Rayes, Kandil, 2005; Kandil El Rayes, 2006). The use of Genetic Algorithms (GA) to optimize the evaluation process of multiple solutions based on objective functions (Holland, 1975) is the chosen optimization approach for this trade-off problem.

progettazione e la costruzione di un'opera dalle fasi iniziali sino al suo completamento con lo scopo di controllare i KPIs di tempo, costo e qualità.

I Key Performance Indicators (KPIs) (Parmenter, 2007), sono gli indicatori di prestazione chiave che misurano gli aspetti delle prestazioni organizzative e tecnologiche più critici per il successo dell'organizzazione di progetto, nelle fasi correnti e future. Tradizionalmente la prestazione di un processo costruttivo viene misurata mediante tre indicatori di prestazione: costi, tempi e qualità.

Pochi ricercatori si sono interessati al problema della valutazione della qualità di un progetto o di un sistema tramite un indice di qualità complessivo ed allo sviluppo di una procedura di trade-off di costo-tempo-qualità. El Rayes e Kandil (2005, 2006), in recenti studi sulla costruzione di autostrade, hanno presentato un metodo per la stima prestazionale della qualità delle singole attività costruttive con l'obiettivo di facilitare la misurazione e la quantificazione della qualità complessiva della costruzione, attraverso la definizione di un Indicatore di Qualità. In questo studio venne anche proposto l'uso di una Quality Breakdown Structure (QBS) di progetto. L'approccio è basato sul "Quality-Based Performance Rating System" dell'American National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (Anderson e Russel 2001, Minchin e Smith 2001) per la qualifica degli appaltatori in fase di gara. Oltre alla valutazione di eventuali problemi organizzativi dei contraenti, l'approccio ha l'obiettivo principale di valutare la qualità finale dei prodotti del processo di costruzione con un metodo prestazionale. Vengono proposti e classificati una serie di indicatori di qualità che hanno l'obiettivo di valutare la qualità del prodotto finale con una QBS basata sulle

The aim of the research work behind this paper is to develop a multi-objective analysis of building products and processes that can evaluate inherent time, cost and quality indexes, and support Project and Production Managers functions. The procedure was implemented with Genetic Algorithms based on a software application developed with Matlab®. A case study of the building construction project of the new premises of the university campus of Cesena, Italy, was investigated to test the developed approach.

#### Previous work

Construction Management (CM) is a professional service that applies effective management techniques to the planning, design, and construction of a project from inception to completion for the purpose of controlling time, cost and quality KPIs.

The Key Performance Indicators (KPIs) (Parmenter, 2007), represent a set of measures focusing on those aspects of organizational and technical performance that are the most critical for the current and future success of the project organization. Traditionally the performance of construction projects is measured by means of three performance indicators: cost, time and quality.

Few researchers focused the problem of the evaluation of the global quality of a project or a system by means of a quality indicator, and the development of a time-cost-quality trade-off procedure. El Rayes and Kandil (2005, 2006) in recent studies for highway construction, presented a method aimed at facilitating the measurement and quantification of the global construction quality by estimating quality performances of each project activity thorough the defi-

single prestazioni delle attività e dei prodotti. Oltre a questo El Rayes e Kandil (2005, 2006) introducono un sistema automatizzato di ottimizzazione delle risorse del progetto di costruzione di tipo multi-obiettivo, denominato MACROS, basato su di un algoritmo di trade-off di tempo, costo e qualità sviluppato con Algoritmi Genetici (GA).

L'uso degli Algoritmi Genetici (GA) è stato introdotto da J. H. Holland (1975) come metodo di ricerca basato sulla meccanica della selezione naturale e della genetica naturale della teoria evolutiva di Darwin. Successivamente, Goldberg (1989) sviluppò ulteriormente l'approccio GAs nel campo dell'ingegneria dell'automazione.

Tornando al settore dell'Architettura, dell'Ingegneria e delle Costruzioni (AEC), Minchin, Hammons e Ahn (2008) hanno proseguito gli studi in campo autostradale, sviluppando un metodo completo per valutare il prodotto finale del costruttore in termini prestazionali. Anche San Cristobal (2009) propone un'applicazione GA per il problema del trade-off di costo-tempo-qualità nel caso di un progetto di costruzione di strade. L'obiettivo è di ridurre al minimo il tempo impiegato nella costruzione della strada pur soddisfacendo gli standard di qualità e i costi corrispondenti. In seguito Magalhaes-Mendes (2011) presenta un Algoritmo Genetico a due livelli per risolvere i problemi di programmazione dei lavori vincolati da scarse risorse di tipo "multi-mode". La funzione obiettivo in questo caso ricerca la minimizzazione del tempo di completamento della fase di costruzione.

L'uso dei GA per la ricerca di soluzioni ottimizzate per la programmazione dei lavori è frequente, soprattutto in ambiente multi-progetto. Dong *et alii* (2012) propongono un metodo basato sugli Algoritmi Genetici per la programmazione operativa

of a Quality Index. In addition, a Quality Breakdown Structure (QBS) of the project is proposed. The developed approach builds on the "Quality - Based Performance Rating System" of the American National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (Anderson and Russel 2001, Minchin and Smith 2001) for contractors' qualification. Beside the evaluation of potential organisational issues of the contractors, the approach has the main goal of evaluating the final quality of the products of the construction process, with a performance-based approach. With the aim of evaluating the final product quality, a set of quality indicators are proposed and classified with a performance - based Quality Breakdown Structure (QBS). In addition, El Rayes and Kandil (2005, 2006) developed a multi-objective automated construction resource optimisation

system termed MACROS, entailing a time, cost and quality trade-off algorithm. The method is developed with Genetic Algorithms.

The use of Genetic Algorithms (GAs) was introduced by J. H. Holland (1975) as a research method based on the mechanics of natural selection and natural genetic of Darwin's Evolutionary Theory. Later, Goldberg (1989) developed further the GAs approach in the field of automation engineering.

In the Architecture, Engineering and Construction (AEC) sector, Minchin, Hammons and Ahn (2008) developed a comprehensive method to evaluate the contractor's end product from a quality perspective in highway construction. San Cristobal (2009), proposed a GAs application to the time-cost-quality trade-off problem with the case-study of a road construction project. The objective was to minimize

dei lavori a breve termine di tipo “Look Ahead” nelle fasi finitura della costruzione. La procedura sviluppata ricerca la soluzione ottimale per generare il programma Look-Ahead, tenendo conto delle priorità tecniche, dei vincoli dovuti alle aree di lavoro e dei vincoli di blocco della produzione.

Sorrentino infine (2013) applica gli Algoritmi Genetici al problema dell'ottimizzazione tempo, costo e qualità per la programmazione dei lavori di costruzione di una strada, individuando dei set di valori a supporto delle decisioni del Project Manager. I precedenti approcci sono concentrati principalmente sulla fase di costruzione di progetti infrastrutturali. Di seguito viene presentato un approccio più orientato alla ottimizzazione della progettazione esecutiva e costruttiva per la realizzazione di un sistema edilizio.

#### **Ottimizzazione tempo, costo e qualità con gli algoritmi genetici**

Tempo, costi e qualità sono i tre fattori che giocano un ruolo significativo nella pianificazione e controllo dei progetti di costruzione. È facilmente dimostrabile come questi tre parametri siano interdipendenti l'uno con l'altro, e la modifica di uno di essi causi necessariamente un'alterazione in almeno un altro parametro. Le sfide del mercato e i nuovi strumenti contrattuali esercitano una crescente pressione sui decision maker per l'ottimizzazione di questi fattori ed il raggiungimento degli obiettivi di progetto. A causa della complessità delle relazioni fra i parametri, l'ottimizzazione tempo-costo-qualità può essere svolta con l'ausilio degli Algoritmi Genetici.

Gli Algoritmi Genetici sono un metodo di ricerca globale e stocastico definito “genetico” a causa della terminologia derivata della

Tempo, costi e qualità sono i tre fattori che giocano un ruolo significativo nella pianificazione e controllo dei progetti di costruzione.

the time spent in building the road meeting quality output standards and the corresponding costs. Magalhaes-Mendes (2011) instead, presented a two level Genetic Algorithm for the Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem, with an objective function that search for the minimization of the building construction project completion time.

Dong et al. (2012) developed a genetic algorithm-based method for look-ahead scheduling in the finishing phase of construction projects, as GA are widely used in finding solutions for resource constraints multi-project scheduling problems. The developed procedure search for the optimal solution to generate the Look-Ahead Schedule, taking into account the engineering priorities, the zone constraint and the blocking constraints.

Finally, Sorrentino (2013), applies GA

to a time-cost-quality optimization problem for the scheduling of a road construction project, detecting a set of values to support Project Manager's decisions. All the before mentioned approaches mostly focus the construction phase of infrastructure projects, therefore in the following a more design-oriented approach is developed for the job shop drawings optimization of building projects.

#### **Time, cost and quality trade-off and genetic algorithms:**

Time, cost and quality are the three factors that play a significant role in the planning and controlling of construction projects. It is easily demonstrable that these three parameters are interdependent with each other's, as the modification of one necessarily causes an alteration in at least one other parameter. Market performanc-

genetica, una branca della biologia. In parole semplici, gli algoritmi genetici sono procedure di ricerca probabilistiche progettate per lavorare su ampi spazi di variazione che coinvolgono stati che possono essere rappresentati da stringhe matematiche (Goldberg e Holland, 1988). Gli algoritmi genetici possono essere utilizzati con l'obiettivo di pianificare e controllare le attività di un progetto poiché sono strumenti di ricerca e ottimizzazione che aiutano i responsabili decisionali a identificare soluzioni ottimali o quasi ottimali per i problemi caratterizzati da vasti campi di variazione. Uno dei vantaggi fondamentali dei GA derivanti dai metodi tradizionali è che lavorano su di un ricco database di soluzioni simultaneamente (una popolazione di cromosomi), identificando contemporaneamente i vari picchi di funzione, quindi la probabilità di trovare un falso minimo o massimo è ridotta rispetto a metodi che elaborano direttamente le tutte le soluzioni, del tipo “brute-force”. La struttura di base di un algoritmo genetico implica un'operazione ciclica che simula il processo evolutivo di una popolazione. Ogni ciclo rappresenta una generazione e ogni nuova popolazione generata è formata da individui sempre migliori. Un Algoritmo Genetico inizia a generare in modo casuale una popolazione iniziale di possibili soluzioni, chiamate individui. Ogni individuo nella popolazione (o qualsiasi altra soluzione si desidera) è codificato sotto forma di una stringa, chiamata cromosoma. Il sistema di codifica più utilizzato è il sistema binario. Ogni membro della popolazione generata viene valutato calcolando il suo valore di fitness dato dalla funzione obiettivo (fitness) e una selezione accurata degli individui viene eseguita sulla base dei valori di fitness: gli individui più promettenti vengono selezionati come genitori, creando una sequenza di nuove popolazioni o generazioni.

es and new contract approaches put pressure on decision makers for the trade-off of these components and the achievement of the project objectives. Therefore, because of the complexity of dependencies between these three factors, time-cost-quality trade-off can be achieved by the use of GAs.

Genetic Algorithms (GAs) are a global and stochastic research method termed “genetic” because of the mutual terminology from genetics, a branch of biology. Simply stated, genetic algorithms are probabilistic search procedures designed to work on large spaces involving states that can be represented by mathematical strings (Goldberg & Holland, 1988). Genetic algorithms can be used with the aim of planning and controlling the activities of a project as they are search and optimization tools that assist decision makers in identifying optimal or near-

optimal solutions for problems with large search space.

One fundamental advantages of GAs from traditional methods is that they work from a rich database of solutions simultaneously (a population of chromosomes), climbing many peaks in parallel, thus the probability of finding a false peak is reduced over methods that go solution to solution, like the “brute-force” method. The basic structure of a genetic algorithm involves cyclic operation that simulates the evolutionary process of a population. Each loop represents one generation and each new population generated is formed by better and better individuals.

A typical genetic algorithm starts generating randomly an initial population of possible solutions, called individuals. Every individual in the population (or whatever solution is desired) is coded in the form of a string, called the

Dopo aver selezionato un numero  $n$  di individui, l'algoritmo genetico emula la riproduzione sessuale che avviene naturalmente in biologia e riunisce il materiale genetico dei genitori, dando vita a figli che sono la futura generazione di soluzioni. La ricombinazione viene effettuata da operatori genetici di Cross-Over (combinando opportunamente le caratteristiche di una coppia di genitori) e Mutazione (effettuando cambi casuali su un singolo genitore). La nuova generazione di soluzioni prende il posto della generazione precedente, da cui è nata per la ricombinazione. Il processo viene ripetuto un gran numero di volte fino a quando uno dei requisiti obiettivo è soddisfatto, ad esempio quando viene raggiunta un'approssimazione accettabile della soluzione al problema o è stato eseguito il numero massimo di iterazioni. Nella Fig. 1 un diagramma di flusso riepiloga i principi operativi delle GA.

Gli algoritmi genetici non garantiscono che venga trovata una soluzione ottimale, ma sviluppano un insieme di soluzioni migliori rispetto alle soluzioni originarie. Gli individui generati evolvono verso soluzioni nuove e migliori in ogni nuova generazione della popolazione a partire dallo stesso problema e dallo stesso insieme di possibili individui di partenza. Per questo motivo i GA vengono utilizzati nello studio dell'intelligenza artificiale.

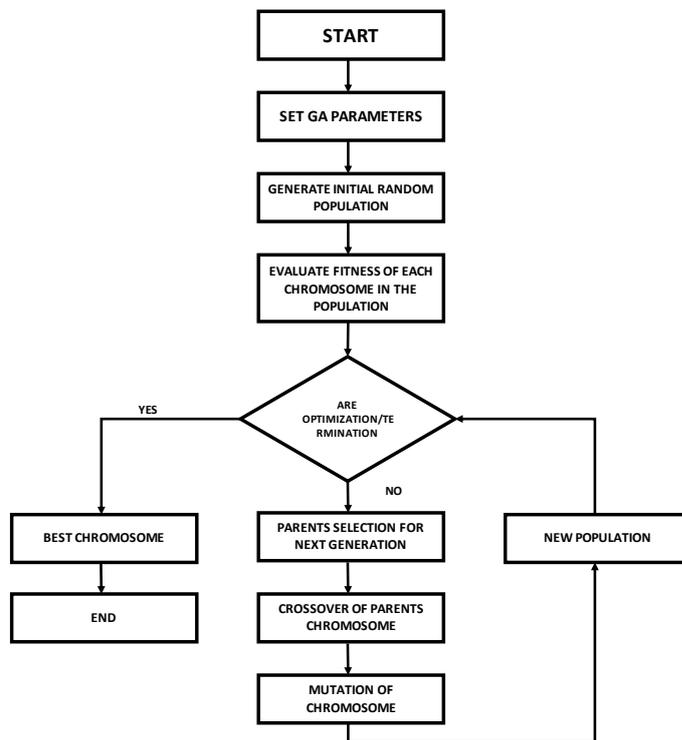
In molte situazioni ci sono più di un obiettivo rilevante da minimizzare (o massimizzare), in questo caso l'algoritmo genetico viene definito multi-obiettivo. Un GA multi-obiettivo persegue più obiettivi contemporaneamente, nel senso che un individuo è considerato più o meno adatto in relazione a più criteri. In questo caso il problema da affrontare non è semplicemente ridotto alla ricerca di un massimo locale (o globale) o minimo di una data funzione, ma all'analisi di più criteri contemporaneamente. In questo tipo di problemi i vari obiettivi sono spesso in conflitto,

Chromosome. The most used encoding system is the binary system. Each member of the current population is assessed by calculating its fitness value by the objective function (fitness), and an appropriate sorting of these individuals is determined on the basis of the fitness values: The most promising individuals are selected as parents, creating a sequence of new populations or generations.

After selecting an  $n$  number of individuals, the genetic algorithm emulates the sexual reproduction that occurs naturally in biology and re-combines the genetic material of the parents, giving birth to the children or to the future generation of solutions. The re-combination is carried out by genetic operators of Cross Over (by appropriately combining the characteristics of a couple of parents) and Mutation (by making random changes on a single

parent). The new generation of solutions takes the place of the previous generation, from which it was born for re-combination. The process is repeated a great number of times until one of the stop requirements is fulfilled, for example when an acceptable approximation of the solution to the problem is reached, or the maximum number of iterations has been performed. In Fig. 1 a flow chart summarizes the operating principles of GAs.

Genetic algorithms do not ensure that an optimal solution is found but contribute to a set of solutions superior to the source solutions. From the same problem and from the same set of possible starting individuals at each new population generation the individuals evolve towards different and better new solutions. Because of this the GAs are used in the study of artificial intelligence.



to, il che significa che una soluzione che minimizza o massimizza un obiettivo generalmente non minimizza o massimizza gli altri. In un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, è necessario trovare una soluzione ottimale allo stesso tempo per tutte le funzioni obiettivo che descrivono il problema.

### Caso di studio: KPIs nella progettazione esecutiva e costruzione dell'involucro di un edificio

Per l'applicazione della metodologia proposta si utilizza il caso studio della costruzione della nuova sede del Campus Universitario di Cesena dell'Università di Bologna, Italia. L'edificio ha 5 piani e un layout in pianta a forma di "U". L'edificio è costruito con una struttura portante tra-

to, il che significa che una soluzione che minimizza o massimizza un obiettivo generalmente non minimizza o massimizza gli altri. In un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, è necessario trovare una soluzione ottimale allo stesso tempo per tutte le funzioni obiettivo che descrivono il problema.

### Case study: KPIs for a building envelope developed design and construction

The proposed methodology is applied to the case study of the construction of the new premises of the University Campus of Cesena of the University of Bologna, is presented. The building has 5 floors and a "U" shape plan, and has a traditional reinforced concrete structure.

Five buildings, separated by structural seismic joints, compose the premises. The coordination system of the structural framework components is based upon a reference grid shown in Fig. 2. Two main types of external walls constitute the building envelope (Fig. 3):

- Wall E1: multi-layer load-bearing walls with reinforced concrete (RC) structure, with non-load-bearing components. It has a total thickness of about 68.5 cm.

- 03 | a) Sezione della parete E1;  
 b) Sezione della parete E2  
 a) Stratigraphy of the wall E1;  
 b) Stratigraphy of the wall E2

zionale in conglomerato cementizio armato e suddiviso in cinque fabbricati, separati da giunti sismici strutturali. Il sistema di coordinamento dei componenti del subsistema strutturale è attuato tramite una griglia modulare rappresentata in Fig. 2. Due tipi principali di pareti esterne costituiscono l'involucro dell'edificio (Fig. 3):

- Parete E1: parete multistrato portante con struttura in conglomerato cementizio armato e con componenti non portanti. Ha uno spessore totale di circa 68,5 cm.
- Parete E2: parete di involucro multistrato non portante, senza struttura in conglomerato cementizio armato. Ha uno spessore totale di circa 51,8 cm.

Lo scopo di questo studio è quello di analizzare le caratteristiche delle strutture delle pareti esterne multistrato in termini di costo di costruzione, tempo di posa e qualità prestazionale, e di proporre un metodo basato sui GA per trovare un insieme di soluzioni che permettano l'ottimizzazione simultanea di questi tre parametri tempo, costo e qualità. Ogni strato ha caratteristiche fisiche e tecnologiche diverse e può essere costruito con prodotti e componenti forniti da diversi produttori. Per ogni strato vengono considerate tre diverse alternative progettuali (Tab. 1):

- opzione 1: soluzione standard di mercato;
- opzione 2: soluzione innovativa, rappresentata da prodotti innovativi recentemente introdotti sul mercato;
- opzione 3: soluzione sostenibile, composta da prodotti di origine naturale o comunque ritenuti più sostenibili per l'ambiente.

I tre KPIs relativi a tempo, costo e qualità per ciascuna opzione di ogni strato sono stati calcolati per entrambe le pareti esterne E1 ed E2. Nell'analisi di questi tre indicatori lo strato di congl-

- Wall E2: multi-layer enclosure walls, without RC structure with non-load-bearing components. It has a total thickness of about 51.8 cm.

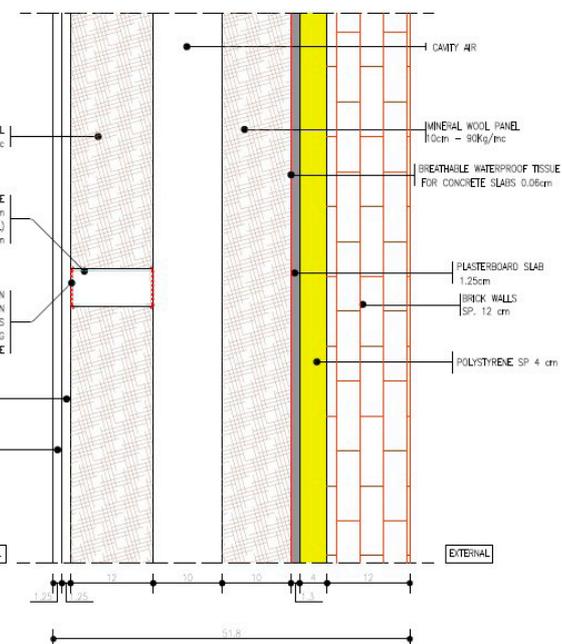
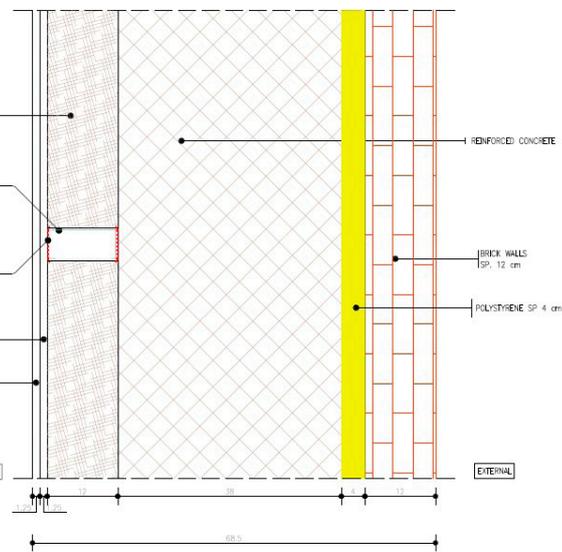
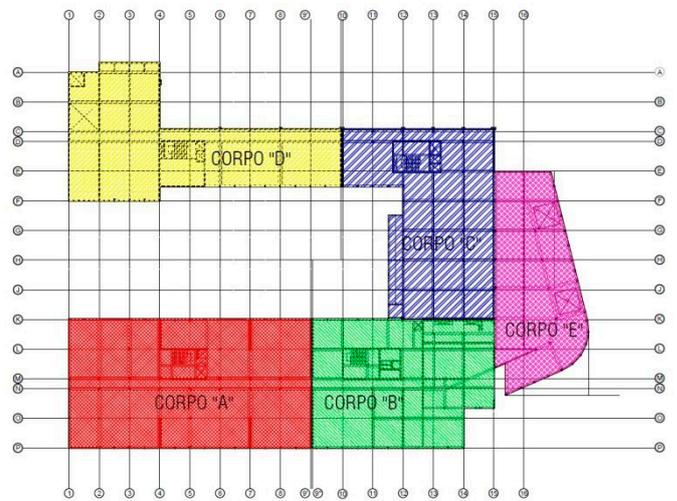
The aim of this study is to carry out an analysis of the external wall multiple layers structures concerning building costs, construction duration and performance-based product quality to find a set of solutions that lead simultaneously to the optimization of the three parameters time, cost and quality. Each layer has different physical and technological characteristics and can be built with products and components delivered by different producers. For each layer three different design alternatives are considered (Tab. 1):

- option 1: standard market solution;
- option 2: innovative solution, represented by innovative products recently introduced in the market;

- option 3: sustainable solution, composed of products of natural origin or in any case considered to be more sustainable for the environment.

The three KPIs concerning time, cost and quality for each option of each layer are calculated for both external walls E1 and E2. In the analysis of these three indicators the reinforced concrete layer (layer 4 of the masonry E1) and the air cavity (layer 4 of the masonry E2) have not been taken into account. The following analyses have been developed.

- Cost analysis: a price analysis of each work package is required, considering building products, labor and cost for rental of equipment.
- Time analysis: the time indicator is the work package duration needed to build/install the component for the whole wall surface. This indicator was computed using price analysis data.



Tab. 1 | Elenco delle tre alternative di prodotto per la parete E1 (sinistra) ed E2 (destra)  
List of the three options for each layer of Wall E1 (on the left) and Wall E2 (on the right)

Tab. 1 |

**Wall E1: design alternatives for components**

**A. FIBERGYPSUM SLAB:**

- Option 1: G S G\_Wallboard 13, Thickness 12,5 mm
- Option 2: G KV wall, Thickness 12,5 mm
- Option 3: P wall, Thickness 12,5 mm

**B. PLASTERBOARD SLAB:**

- Option 1: KA panel Outdoor, Thickness 12,5 mm
- Option 2: G S G D Gyp A1 13 Active Air panel, Thickness 12,5 mm
- Option 3: C isolanti naturali\_C N, Thickness 15 mm

**C. MINERAL WOOL PANEL mm120:**

- Option 1: RockwoolPanel F Energy plus 234, Thickness 30mm
- Option 2: Fiber glass K Insulation\_Panel TP 238, Thickness 30mm
- Option 3: T\_corkpan, Thickness 20mm

**REINFORCED CONCRETE**

**D. POLYSTYRENE**

- Option 1: LHD L EPS 100 TK8, Thickness 3 cm
- Option 2: K T K XT Muro panel Th 32, Thickness 3 cm
- Option 3: D\_FK Panel, Thickness 3 cm

**E. BRICK WALLS:**

- Option 1: F B M Brick handmade "P", size 5,5x12x25 cm
- Option 2: S. A. Brick standard fine white fine sand, size 5,5x12x25 cm
- Option 3: I B S.A.S.\_Thermo brick

**Wall E2: design alternatives for components**

**A. PLASTERBOARD SLAB:**

- Option 1: G S G D Gyp A1 13 Active Air panel, Thickness 12,5 mm
- Option 2: K K K panel (A), Thickness 12,5 mm
- Option 3: C isolanti naturali\_C ABE, Thickness 15 mm

**B. FIBERGYPSUM SLAB:**

- Option 1: G S G\_Wallboard 13, Thickness 12,5 mm
- Option 2: G KV wall, Thickness 12,5 mm
- Option 3: P wall, Thickness 12,5 mm

**C. MINERAL WOOL PANEL mm120:**

- Option 1: RockwoolPanel F Energy plus 234, Thickness 30mm
- Option 2: Fiber glass K Insulation\_Panel TP 238, Thickness 30mm
- Option 3: T\_corkpan, Thickness 20mm

**AIR CAVITY**

**D. MINERAL WOOL PANEL mm100:**

- Option 1: Rockwool\_Panel F Energy plus 234, Thickness 30mm
- Option 2: Fiber glass K Insulation\_Panel TP 238, Thickness 30mm
- Option 3: T\_corkpan, Thickness 20mm

**E. BREATHABLE WATERPROOF TISSUE FOR CONCRETE SLABS**

- Option 1: K USG S\_A panel T S Wrap
- Option 2: T\_D P T H Wrap
- Option 3: T\_D P T UV Facade

**F. PLASTERBOARD SLAB**

- Option 1: KA panel Outdoor, Thickness 12,5 mm
- Option 2: G S G D Gyp A1 13 Active Air panel, Thickness 12,5 mm
- Option 3: C isolanti naturali\_C N, Thickness 15 mm

**G. POLYSTYRENE**

- Option 1: LHD L EPS 100 TK8, Thickness 3 cm
- Option 2: K T K XT Muro panel Th 32, Thickness 3 cm
- Option 3: D\_FK Panel, Thickness 3 cm

**H. BRICK WALLS:**

- Option 1: F B M Brick handmade "P", size 5,5x12x25 cm
- Option 2: S. A. Brick standard fine white fine sand, size 5,5x12x25 cm
- Option 3: I B S.A.S.\_Thermo brick

– Quality analysis: quality is an intrinsic feature, a value characterized by a relative concept because it consists of an objective part but also of a subjective part. Therefore, it is much more difficult to quantify and measure the quality performance of a construction project than time and cost performances. Construction projects are complex projects, and each deliverable can have different components related to product and process quality. For this reason, performance requirements of each different material have been identified for each layer. For instance, wall components must have an adequate thermal and acoustic resistance, fire proofing performances etc. Based on these requirements, the quality items

selected for quality evaluation are the following: thermal conductivity ( $\lambda$ ), resistance to water vapor diffusion ( $\mu$ ) and fire resistance class. In the case of layer 6 of the masonry E1, Breathable Waterproof Tissue For Concrete Slabs, also the maximum operational temperature was selected. The system used is a scoring system (El-Rayes, Kandil, 2005), and the quality items are weighted with a score ( $B_{i,j}$ ), from 1 to 10, where a weight of 10 means the maximum estimated effect of the quality item on the overall quality of the layer and 1 means no effect on final quality. Therefore, it is possible to calculate the quality index weighted for each quality item ( $Q_{wi,j}$ ) through a multiplication between  $B_{i,j}$  and  $Q_{i,j}$ , where

$Q_{i,j}$  is the Quality Index related to the quality item.

$$Q_{wi,j} = B_{i,j} \times Q_{i,j}$$

The Quality Score of the layer ( $Q_i$ ), is estimated as the percentage of satisfaction of the requirements of the quality index with their weights, estimated as the sum of the actual quality index weighted with the following equation:

$$Q_i = \frac{\sum_j Q_{wi,j}}{\sum_j B_{i,j}} \times 100$$

This process was performed for each option (1, 2, 3) of each layer, both for

the masonry E1 and E2 masonry. In Tab. 2 a sample procedure of evaluation of the quality indicator can be found. After this stage, all the data required to perform the Time-Cost-Quality Trade-Off are ready to be processed. Two tables were created, one for Wall E1 and one for Wall E2, which collected the most significant and useful data for optimization process. Note that the comparison of the quality of different components needs a subjective evaluation of a relative quality weight ( $A_i$ ) that has been estimated by the Project Manager's or designer's experience. Anyway, the sum of the relative  $A_i$  weights must be 100%. In Tab. 3 and 4 the data of the quality, cost and time indicators for each component and design option of the two wall types are presented.

merato cementizio armato (strato 4 della muratura E1) e l'aria della cavità (strato 4 della muratura E2) non sono stati presi in considerazione. Le analisi sono state svolte come segue.

- Analisi dei costi: è stata necessaria un'analisi dei prezzi di ciascuna lavorazione, considerando i prodotti da costruzione, la manodopera e i costi per il noleggio di attrezzature.
- Analisi del tempo: l'indicatore tempo è la durata della lavorazione necessaria per costruire / installare il componente nell'intera superficie della parete. Questo indicatore è stato calcolato utilizzando i dati di analisi dei prezzi.
- Analisi della qualità: la qualità è una caratteristica intrinseca, un valore caratterizzato da un concetto relativo perché consiste in una parte oggettiva ma anche in una parte soggettiva.

Pertanto, è molto più difficile quantificare e misurare la qualità prestazionale complessiva di un sistema costruttivo rispetto alle prestazioni in termini di tempo e costi. I sistemi edilizi sono sistemi complessi e ogni *deliverable* può avere prestazioni differenti in relazione alla qualità di prodotto e di processo. Per questo motivo, i requisiti prestazionali di ciascun materiale o prodotto sono stati identificati per ogni strato. Ad esempio, i componenti di involucro devono avere un'adeguata resistenza termica e acustica, prestazioni antincendio ecc. Sulla base di questi requisiti, gli elementi di qualità selezionati per la valutazione della qualità sono i seguenti: conduttività termica ( $\lambda$ ), resistenza alla diffusione del vapore acqueo ( $\mu$ ) e classe di resistenza al fuoco. Nel caso dello strato 6 della muratura E1, barriera al vapore traspirante per lastre in calcestruzzo, è stata selezionata anche la temperatura operativa massima.

Il sistema utilizzato è un sistema a punteggio (El-Rayes, Kandil, 2005), e gli elementi qualitativi sono ponderati con un punteggio ( $B_i, j$ ), da 1 a 10, dove un peso di 10 significa l'effetto massi-

mo stimato dell'elemento di qualità (*Quality Item*) sulla qualità complessiva dello strato e 1 significa nessun effetto sulla qualità finale. Pertanto, è possibile calcolare l'indice di qualità ponderato per ciascun elemento di qualità ( $Q_{wi, j}$ ) attraverso una moltiplicazione tra  $B_i, j$  e  $Q_i, j$ , dove  $Q_i, j$  è l'indice di qualità relativo al quality item.

$$Q_{wi, j} = B_{i, j} \times Q_{i, j}$$

Il punteggio di qualità dello strato  $i$  (*Quality Score*,  $Q_i$ ) è stimato come la percentuale di soddisfazione dei requisiti di qualità data dalla somma degli indici di qualità ponderati ( $Q_{wi, j}$ , effettivo in opera) normalizzata con la seguente equazione:

$$Q_i = \frac{\sum_j^k Q_{wi, j}}{\sum_j B_{i, j}} \times 100$$

Questa procedura è stata eseguita per ogni opzione (1, 2, 3) di ciascuno strato di parete, sia per la muratura E1 che per la muratura E2. Nella Tab. 2 è rappresentato un estratto esemplificativo della procedura di valutazione dell'indicatore di qualità.

Dopo questa fase, tutti i dati necessari per eseguire il trade-off di costo-tempo-qualità sono pronti per essere elaborati. Sono state create due tabelle, una per la parete E1 e una per la parete E2, che raccolgono i dati più significativi e utili per il processo di ottimizzazione. Si noti come il confronto della qualità dei diversi componenti richieda una valutazione soggettiva del

The Tab. 3 and 4 point out that the three indicators concerning time, cost and quality are interdependent, following different dependency functions. In fact, for instance in the layer D of wall E2 the price of option 3 is almost twice the option 1, and in contrast the quality of option 1 is much higher than that of Option 3. The objective of the optimization process is to minimize costs but to maximize quality, keeping work packages durations as short as possible. Nevertheless, it can be noticed that the durations of the work packages are very similar because they are mostly prefabricated panels installations.

#### Multi-objective optimization for time-cost-quality trade-off of the case study

Matlab<sup>®</sup> was chosen as a computer software for the application of GAs optimization to the case study. Matlab<sup>®</sup> is an

high-level language software and interactive environment for numerical computing, data analysis and visualization and programming, created by MathWorks<sup>®</sup>. This software allows analyzing data, developing genetic algorithms, and creating templates and applications.

The fitness function is a function that can evaluate how much a solution is suitable for solving the given problem. As the application is a Multi-Objective GAs, two functions must be optimized simultaneously:

- 1) minimize:  
 $C = \sum_{i=1}^n C(i) + C_i - k(T_t - T_a)$
- 2) Maximize:  
 $Q = \sum_{i=1}^n A_i \times Q_i$

Where: C = total cost; C(i) direct costs of the item; C<sub>i</sub> daily overhead costs

C<sub>i</sub> = C<sub>d</sub> x 0.15; T<sub>t</sub> maximum allowed project duration; T<sub>a</sub> duration of the selected option; k = k<sub>i</sub> = incentive factor when (T<sub>t</sub> - T<sub>a</sub>) > 0 and k = k<sub>p</sub> = penalty factor when (T<sub>t</sub> - T<sub>a</sub>) < 0; Q total quality of the masonry; A<sub>i</sub> relative weight of the component; Q<sub>i</sub> quality indicator of the component.

A 3D chart of the solutions found (each test is represented by a different color) is represented in terms of time, cost and quality in the charts of Fig. 4 and 5. The solutions belonging to the same set of options are equipotential to the given problem.

In particular, a limited set of solutions are found. These solutions can be easily achieved fixing one or two specific variables.

From the results obtained and from the shown charts, it can be seen how multi-objective techniques provide a set of optimal solutions among which

the planner can choose the one indicated as most convenient. Some examples taken from the case of masonry E2 can indicate the use of the found results.

Let's suppose the Project Manager imposes the time limit, for example that the time is less than 1.4 x 10<sup>4</sup> hours. A plan in the T-C-Q chart is generated on this value and the possible solutions will be all those behind this plan (Fig. 6).

Let's also suppose the Project Manager imposes more than one limit, for example that the quality is over 62%, but also that the cost is less than 1.5 x 10<sup>6</sup>€. It is possible to plot the two threshold limit plans in the graph T-C-Q. The optimum solutions will therefore be those above the quality plan but before the cost plan (Fig. 7).

Tab. 2 | Esempio di calcolo dell'indicatore di qualità (Qi %): alternativa 1 dello strato A (Fibergypsum slab) parete E1  
 Example of calculation of the Quality score of a layer (Qi %): option 1 of layer A (Fibergypsum slab) for Wall E1

Tab. 2 |

**1.01\_ FIBERGYPSUM SLAB - OPTION 1**

$\lambda$ [W/mk]	Qi,j	Qi,j %	Qi,j
0,21	$(1-\lambda)*100$	79	0,79

$\mu$	Qi,j	Qi,j %	Qi,j
4	$(\mu*100)/70$	5,714	0,057

Fire resistance Class	Qi,j %	Qi,j
A2-S1,d0	93,00	0,93

j	Quality Item (j)	Weight of Item (Bi,j)	Quality index (Qi,j %)	Quality index weighted (Qwi,j)	Quality index weighted (Qi %)
B1.1	Thermal conductivity ( $\lambda$ )	8	79	6,32	
B1.2	Resistance factor to water vapor diffusion ( $\mu$ )	6	5,714	0,343	
B1.3	Fire Resistance Class	9	93,00	8,37	
<b>TOTAL</b>		<b>23</b>		<b>15,033</b>	<b>65,36</b>

loro peso relativo (Ai) in termini qualitativi, stimata in base alle esperienze del Project Manager o progettista. Ad ogni modo, la somma dei pesi Ai relativi deve essere al 100%. Nelle Tab. 3 e 4 vengono presentati i dati degli indicatori di qualità, costo e tempo per ciascun componente ed alternativa costruttiva dei due tipi di parete.

Le Tab. 3 e 4 sottolineano che i tre indicatori relativi a tempo, costi e qualità sono interdipendenti secondo funzioni di proporzionalità specifiche. Infatti, a titolo esemplificativo si può notare che nello strato D della parete E2 il prezzo dell'opzione 3 è quasi il doppio dell'opzione 1, e al contrario la qualità dell'opzione 1 è molto più alta di quella dell'opzione 3. L'obiettivo del processo di ottimizzazione è di ridurre al minimo i costi ma anche di massimizzare la qualità, pur mantenendo le durate delle lavorazioni il più breve possibile. Tuttavia, si può notare che le durate dei

pacchetti di lavoro sono molto simili perché si tratta per lo più di installazioni di pannelli prefabbricati.

**Ottimizzazione multi-obiettivo tempo – costo – qualità del caso di studio**

Matlab® è stato scelto come software per l'applicazione dell'ottimizzazione GA al caso di studio. Matlab® è un linguaggio software di alto livello e un ambiente interattivo per il calcolo numerico, l'analisi dei dati, la visualizzazione e la programmazione creato da MathWorks®. Questo software consente di analizzare i dati, sviluppare algoritmi genetici e creare modelli e applicazioni. La funzione fitness è la funzione che valuta quanto una soluzione è adatta per risolvere il problema dato. Poiché l'applicazione è un GA multi-obiettivo, è necessario ottimizzare due funzioni contemporaneamente:

**Discussion of the results and conclusions**

Found results by GAs seem promising and important. However, even if shown results appear to be robust and substantial, considering the relatively limited number of test permutations to be computed for the time-cost-quality fitness function (6561 permutations for 8 activities and 3 options) an alternative approach could be feasible.

In this particular case, the GAs approach has been compared to a "brute-force" one, meaning with brute-force a method with which all design options permutations are evaluated computing their times, costs and quality indexes with the fitness function previously described. The brute-force appears to be highly effective in this context, since it leads to similar results in a few tenths of seconds. On the other hand, as the number of possible options and

variables increases, the GAs approach become a more effective solution even from a computational point of view. In the case study results were consistent and coherent between the two considered approaches.

Moreover, the effectiveness of the fitness function should also be considered. In particular, results were distributed unevenly, showing a gap around a specific range of values, due to the need of having a time limit in the fitness function. Finally, a strong correlation between quality and direct costs emerged from the analysis of the results (Fig. 8) in spite of the aforementioned exceptions. Therefore, a dimensional reduction of the fitness function could be applied, i.e. simplifying the fitness function using only costs or quality indexes vs. time. Actually, this is a common approach used by Project Managers who generally simplify the

time-costs-quality trade-off in a time-costs only approach. This correlation confirms the reliability of the found results.

GAs can aid Project and Construction Managers to implement the selection of the developed design alternatives with the evaluation and trade-off of three KPIs concerning time, cost and quality.

A case study of the optimization of the selection of the different components of two types of external walls (E1 and E2) was used to test the proposed procedure. For each wall type, three different implementation options based on the choice of products have been evaluated: standard market products, innovative products and sustainable products. As the first type of wall (E1) is composed by five layers, the possible solution are 243, while the wall E2 consisting of eight layers, provides

6561 possible solutions. The proposed approach for the simultaneous optimization of time, cost and quality KPIs is based on genetic algorithms (GAs) implemented with Matlab® (MATrix LABoratory). In the multi-objective optimization, few different solution optimizing one or more than one project indicators are found, thus allowing Project and Construction Managers to select the more suitable set of products for the wall components.

Tab. 3 | KPIs per la parete E1  
Wall E1 - quality indicators

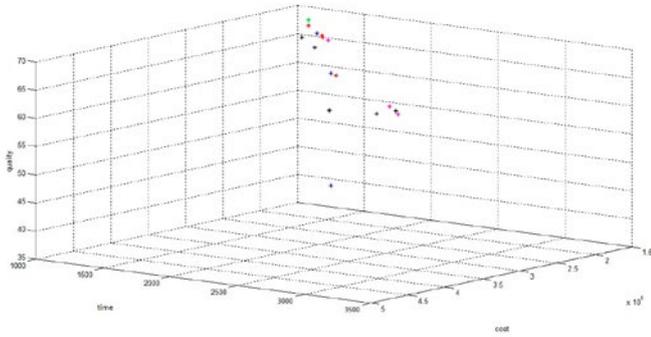
Tab. 3 |

LAYER	OPTIONS	PRICE [€]	DIRECT COST [€]	INDIRECT COST [€]	TIME [h]	Ai	Qi [%]
A. Fibergypsum slab	1	13214,57	10437,68	1565,65	286,28	25%	65,36
	2	23463,30	18545,06	2781,76	286,28		68,57
	3	24081,66	19037,45	2855,62	286,28		40,77
B. Plasterboard slab	1	41098,00	32481,05	4872,16	286,28	10%	86,34
	2	26978,79	21327,67	3199,15	286,28		68,94
	3	18310,31	14470,07	2170,51	286,28		62,56
C. Mineral wool panel	1	53682,76	30488,32	4573,25	160,32	20%	73,10
	2	40193,36	19827,35	2974,10	160,32		39,67
	3	104800,47	82838,17	12425,73	45,80		47,14
D. Polystyrene	1	95215,90	75268,08	11290,21	372,16	20%	58,46
	2	73206,88	57862,41	8679,36	372,16		62,29
	3	98926,05	78199,56	11729,93	372,16		34,84
E. Brick walls	1	458364,34	362345,90	54351,88	3922,00	25%	62,63
	2	95116,39	75192,62	11278,89	235,32		64,19
	3	424031,14	335205,65	50280,85	2353,20		63,73

Tab. 4 | KPIs per la parete E2  
Wall E2 - quality indicators

Tab. 4 |

LAYER	OPTIONS	PRICE [€]	DIRECT COST [€]	INDIRECT COST [€]	TIME [h]	Ai	Qi [%]
A. Plasterboard slab	1	61182,00	48352,95	7252,94	887,21	20%	65,76
	2	144260,35	114006,49	17100,97	887,21		66,11
	3	146318,67	115670,89	17350,63	887,21		62,21
B. Fibergypsum slab	1	40953,61	32347,68	4852,15	887,21	5%	65,36
	2	72715,73	57473,46	8621,02	887,21		68,57
	3	74632,11	58999,47	8849,92	887,21		40,77
C. Mineral wool panel	1	166369,62	94487,16	14173,07	496,84	10%	73,10
	2	124564,28	61447,45	9217,12	496,84		39,67
	3	324789,84	256725,92	38508,89	141,95		47,14
D. Mineral wool panel	1	154658,45	94487,16	14173,07	496,84	10%	73,10
	2	112853,11	61447,45	9217,12	496,84		39,67
	3	324789,84	256725,92	38508,89	141,95		47,14
E. Breathable water-proof tissue for concrete slabs	1	17140,90	13557,81	2033,67	53,23	15%	66,28
	2	18063,60	14313,18	2146,98	212,93		62,65
	3	40527,75	32028,99	4804,35	212,93		60,76
F. Plasterboard slab	1	127367,87	100662,85	15099,43	887,21	5%	86,34
	2	83610,67	66097,15	9914,57	887,21		68,94
	3	56745,95	44844,56	6726,68	887,21		62,56
G. Polystyrene	1	295086,05	233265,25	34989,79	1153,37	15%	58,46
	2	226877,34	179322,89	26898,43	1153,37		62,29
	3	306584,29	242350,28	36352,54	1153,37		34,84
H. Brick walls	1	1074417,47	849347,83	127402,17	9193,27	20%	62,63
	2	1579422,18	1248556,39	187283,46	9193,27		60,55
	3	993939,58	785730,40	117859,56	5515,96		63,73



04 | Grafico tempo-costo-qualità parete E1: le soluzioni dello stesso gruppo di opzioni sono equipotenziali

*Time-Cost-Quality Chart for wall E1: Solutions belonging to the same set of options are equipotential to the given problem*

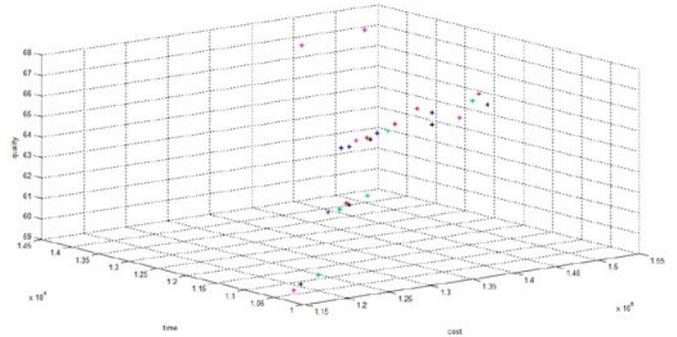
1) Minimizzare:  $C = \sum_{i=1}^n C(i) + C_i - k(T_t - T_a)$

2) Massimizzare:  $Q = \sum_{i=1}^n A_i \times Q_i$

Dove: C = costo totale; C (i) costi diretti del componente; Ci costi indiretti Ci = Cd x 0,15; Tt massima durata del progetto consentita; Ta durata dell'opzione selezionata; k = ki = fattore di incentivazione quando (Tt - Ta) > 0 e k = kp = fattore di penalità quando (Tt - Ta) < 0; Q qualità totale della parete; Ai peso relativo del componente; Qi indicatore qualità del componente.

Un grafico 3D delle soluzioni trovate (ogni test è rappresentato da un colore diverso) è rappresentato in termini di tempo, costo e qualità nei grafici in Fig. 4 e 5. Le soluzioni appartenenti allo stesso insieme di opzioni sono equipotenziali al problema dato. In particolare, vengono trovati degli insiemi limitati di soluzioni. Queste soluzioni possono essere facilmente ottenute fissando una o due variabili specifiche.

Dai risultati ottenuti e dai grafici presentati, si può vedere come le tecniche multi-obiettivo forniscano un insieme di soluzioni ottimali tra cui il progettista può scegliere quello ritenuto più conveniente. Alcuni esempi dal caso della parete E2 possono



05 | Grafico tempo-costo-qualità parete E2: le soluzioni dello stesso gruppo di opzioni sono equipotenziali

*Time-Cost-Quality Chart for wall E2: Solutions belonging to the same set of options are equipotential to the given problem*

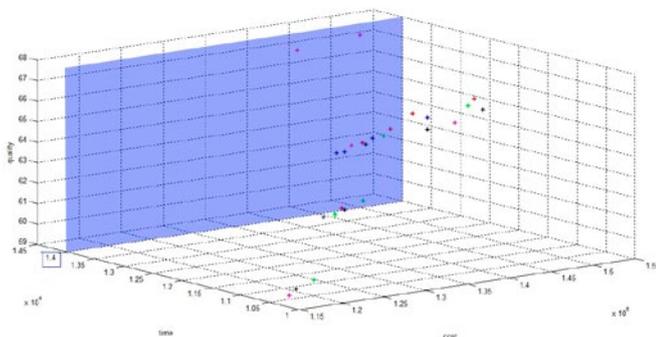
no suggerire come usare i risultati trovati. Supponiamo che il Project Manager imponga un limite di tempo, ad esempio che il tempo sia inferiore a  $1,4 \times 10^4$  ore. Un piano nel grafico T-C-Q viene generato su questo valore e le possibili soluzioni saranno tutte quelle dietro questo piano (Fig. 6).

Oppure si supponga che il Project Manager imponga più di un limite, ad esempio che la qualità sia superiore al 62%, ma anche che il costo sia inferiore a  $1,5 \times 10^6$  €. È possibile tracciare i due piani limite di soglia nel grafico T-C-Q. Le soluzioni ottimali saranno quindi quelle sopra il piano di qualità ma prima del piano dei costi (Fig. 7).

**Discussione dei risultati e conclusioni**

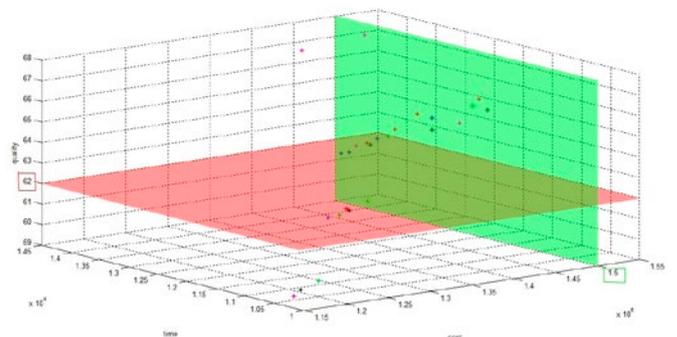
I risultati trovati con i GA sembrano incoraggianti e significativi. Tuttavia, anche se i risultati

mostrati sembrano essere robusti e sostanziali, considerando il numero relativamente limitato di permutazioni da calcolare nel test della funzione fitness tempo-costo-qualità (6561 permutazioni per 8 attività e 3 opzioni) sembra essere percorribile anche un approccio alternativo. In questo caso specifico, è stato confrontato l'approccio GA con l'approccio "brute force", inteso



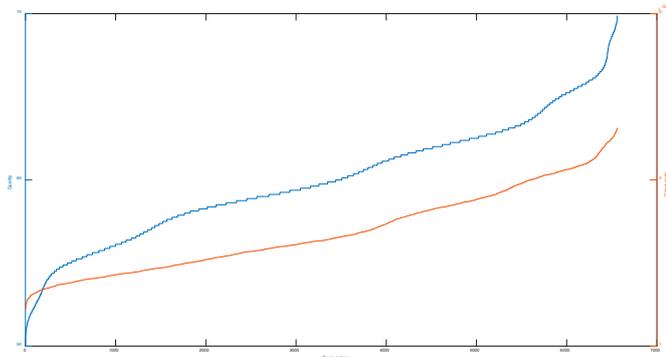
06 | Grafico tempo-costo-qualità dove tutte le alternative selezionate hanno una durata inferiore a  $1,4 \times 10^4$  ore

*Time-cost-quality Chart where are selected options having time less than  $1.4 \times 10^4$  hours*



07 | Grafico tempo-costo-qualità dove sono selezionate le alternative che hanno una qualità superiore al 62% ma costo inferiore a  $1,5 \times 10^6$  €; Le soluzioni ottimali sono quelle sopra il piano della qualità soglia (rosso) ma prima del piano dei costi soglia (verde)

*Time-cost-quality Chart where are selected options having quality higher than 62% but also cost less than  $1.5 \times 10^6$  €; The optimum solutions will therefore be those above the quality threshold plan (red) but before the cost threshold plan (green)*



come un metodo in cui tutte le permutazioni delle alternative progettuali vengono valutate calcolando tempi, costi e qualità con la funzione di fitness precedentemente descritta. L'approccio "brute force" sembra essere molto efficace in questo contesto, dal momento che porta a risultati simili a quelli del GA in pochi decimi di secondo. D'altra parte, con l'aumentare del numero di possibili opzioni e variabili, l'approccio GA ritorna la soluzione più efficace anche dal punto di vista computazionale. Nel caso di studio presentato i risultati sono stati consistenti e coerenti nei due approcci considerati.

Oltre a questo, è necessario valutare anche l'efficacia della funzione fitness. In particolare, l'insieme dei risultati è distribuito in modo non uniforme, mostrando un gap attorno a un intervallo specifico di valori causato dalla necessità di avere un limite di tempo nella funzione fitness. Infine, nonostante le eccezioni precedentemente evidenziate, emerge una forte correlazione tra qualità e costi diretti dall'analisi dei risultati. Questo può consentire una riduzione dimensionale della funzione di fitness, cioè la semplificazione della funzione utilizzando solo i costi o gli indici di qualità rispetto al tempo. In realtà, questo è proprio l'approccio pratico usato in genere dai Project Managers che semplificano l'ottimizzazione tempo-costi-qualità con il solo bilanciamento tempo-costi. Questa correlazione conferma comunque la plausibilità dei risultati trovati.

Gli Algoritmi Genetici possono aiutare i Project e Construction Managers a realizzare la selezione di alternative progettuali a livello di progettazione esecutiva o costruttiva valutando il trade-off di tre KPI relativi a tempo, costi e qualità.

La procedura proposta è stata analizzata tramite il caso di studio dell'ottimizzazione della selezione dei diversi materiali componenti la stratigrafia di due tipi di pareti esterne (E1 ed E2). Per ogni tipo di parete sono disponibili tre diverse opzioni di realizzazione basate sulla scelta dei prodotti da costruzione per la realizzazione della soluzione tecnica: prodotti standard di mercato, prodotti innovativi e prodotti sostenibili. Poiché il primo tipo di parete (E1) è composto da cinque strati, le soluzioni possibili sono 243, mentre per la parete E2, composta da otto strati, ci sono 6561 possibili soluzioni. L'approccio proposto per l'ottimizzazione simultanea dei KPI relativi a tempi, costi e qualità si basa su algoritmi genetici (GA) implementati con Matlab® (MATrix LABoratory). Nell'ottimizzazione multi-obiettivo, si trovano poche soluzioni diverse che ottimizzano uno o più indicatori di progetto, consentendo quindi Project e Construction Managers di selezionare il set di prodotti ritenuto più adatto per i componenti della parete.

## REFERENCES

- Anderson, S.D. and Russel J.S. (2001), "Guidelines for Warranty, Multi-Parameter and Best Value Contracting", *Transportation Research Board*, USA.
- Bragadin, M. and Kahkonen, K. (2013), "Quality Evaluation of Construction Activities for Project Control", *Journal of Frontiers in Construction Engineering*, Vol. 2, Issue 1, pp. 17-24.
- Dong, N., Dongdong, G., Fischer, M. and Haddad, Z. (2012), "A genetic algorithm-based method for look-ahead scheduling in the finishing phase of construction projects", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 26, pp. 737-748.
- El-Rayes, K. and Kandil, A. (2005), "Time-Cost-Quality Trade-Off Analysis for Highway Construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 131 (4), pp. 477-486.
- Goldberg, D.E., Holland, J.H. (1988), *Genetic Algorithm and Machine Learning*. *Machine Learning 3*, Kluwer Academic publishers, Alphen aan den Rijn, NL.
- Holland, J.H. (1975), *Adaption in natural and artificial systems*, The MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Kandil, A. and El-Rayes, K. (2006), "Macros: Multiobjective Automated Construction Resource Optimization System", *Journal of Management in Engineering*, ASCE Vol. 22, No.3.
- Madeddu, D. (2011), *Architetture genetiche-Gli algoritmi genetici come strumento di ottimizzazione in architettura*.
- Magalhães-Mendes, J. (2011), "A Two-level Genetic Algorithm for the Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem", *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 5, Issue 3, pp. 271-278.
- Minchin, R.E., Hammons, M.I. and Junyong, A. (2008), "A Construction Quality Index for Highway Construction", *Construction Management and Economics*, Vol. 26, pp. 1313-1324.
- Minchin, R.E. and Smith, G.R. (2001), *Quality-Based Performance Rating of Contractors for Prequalification and Bidding Purposes*, National Cooperative Highway Research Program NCHRP, USA.
- Parmenter, D. (2007), *Key Performance Indicators-Developing Implementing and Using Winning KPIs*, John Wiley & Sons, Inc.
- San Cristóbal, J.R. (2009), "Time, Cost, and Quality in a Road Building Project", *Journal of Construction Engineering and Management*, pp. 1271-1274.
- Sorrentino, M. (2013), "Genetic Algorithms for Construction Time-Cost-Quality Trade-Off: A Road Project Case Study", *Ricerche e progetti per il territorio, la città e l'architettura*, *Construction Management*, pp. 163-176.