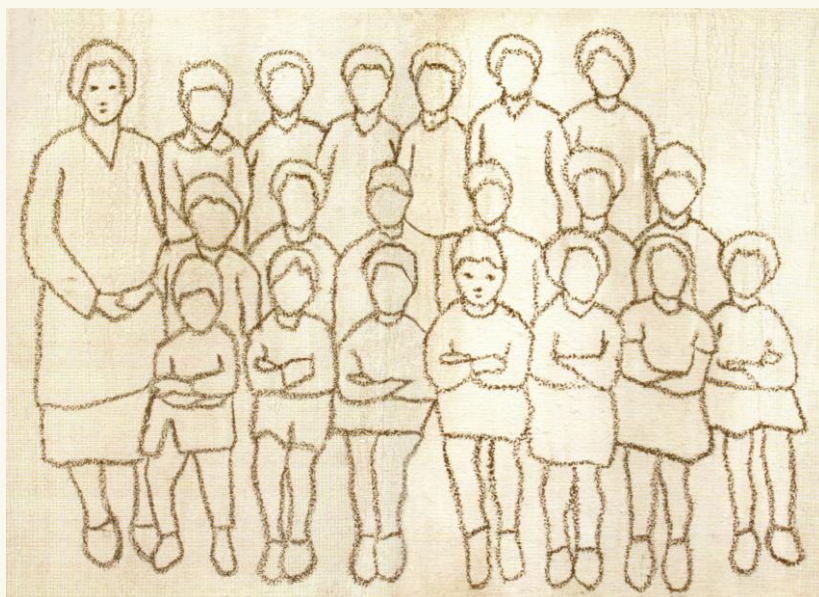


CATERINA MOSCA



**EDILIZIA SCOLASTICA:
L'EREDITÀ DEL PASSATO VERSO NUOVI SCENARI.**

INTERVENTI INTEGRATI E OTTIMIZZAZIONE MULTIDISCIPLINARE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Dottorato in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica
XXXVII Ciclo

Coordinatore del Dottorato: Prof. Carlo Cellamare
Curriculum: Ingegneria Edile-Architettura

Sapienza Università di Roma
Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA)

Tutti i diritti riservati

L'immagine di copertina è una riproduzione dell'opera *Primary*,
2005, affresco su iuta di Valerio Berruti, gentilmente concessa
dall'autore.

INDICE

ABSTRACT	10
1. INTRODUZIONE.....	13
1.1. Inquadramento.....	13
1.2. Le ragioni della ricerca.....	16
1.3. Obiettivi, metodo e strumenti.....	18
1.4. Domande aperte.....	23
1.5. Struttura dei contenuti.....	25
2. L'EVOLUZIONE STORICO-TIPOLOGICA DELL'EDILIZIA SCOLASTICA ITALIANA	29
2.1. Le architetture per la formazione in Italia: contesto storico e caratteri salienti	29
2.1.1. Dall'Unità d'Italia al 1900	29
2.1.2. Il ventennio 1900-1920	35
2.1.3. Dalla vigilia della seconda guerra mondiale al 1945	38
2.1.4. Il periodo post bellico: 1946-1960.....	42
2.1.5. Il boom economico: 1961-1974.....	47
2.1.6. Dal 1975 ad oggi	53
2.2. Le nuove tendenze	58
2.2.1. Gli indirizzi internazionali	61
2.2.2. Le proposte italiane	69
3. LA SITUAZIONE ATTUALE DELL'EDILIZIA SCOLASTICA IN ITALIA.....	85
3.1. Aspetti strutturali	95
3.2. Aspetti energetici	105
3.3. Aspetti funzionali.....	110
4. RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA SCOLASTICA.....	117
4.1. Modalità di intervento.....	118
4.2. Proposta di riqualificazione integrata in ambito sismico ed energetico	123
4.3. Esoscheletro	129
5. NUOVA PROPOSTA PER L'OTTIMIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI.....	139

5.1.	Multidisciplinary Design Optimization	139
5.2.	Applicazioni nella progettazione edilizia.....	148
5.3.	Tecniche di modellazione.....	159
5.3.1.	Modelli di ordine ridotto basati sulla fisica.....	161
5.3.2.	Modelli di ordine ridotto basati sui dati	171
6.	FORMALIZZAZIONE DELLA METODOLOGIA MDO IN AMBITO EDILIZIO...	183
6.1.	Ottimizzazione con modello di simulazione 3D	183
6.2.	Ottimizzazione con modelli di ordine ridotto	202
6.2.1.	ROM basato sulla fisica	203
6.2.2.	ROM basato sui dati mediante software commerciale	206
6.2.3.	ROM basato sui dati mediante un codice Python.....	219
6.3.	Risultati e discussioni	227
7.	CASO STUDIO: L'EDILIZIA SCOLASTICA A TERNI.....	233
7.1.	Evoluzione della città e dell'edilizia scolastica	234
7.1.1.	Il periodo preunitario	234
7.1.2.	Terni diventa una città industriale (1860-1920)	237
7.1.3.	Dall'età del fascismo alla fine del secondo conflitto mondiale (1921-1945).....	249
7.1.4.	Dal periodo postbellico alla metà degli anni Settanta	261
7.1.5.	Dal 1975 ad oggi.....	271
7.2.	Situazione attuale e caratterizzazione del campione di studio	274
8.	APPLICAZIONE DELL'ESOSCHELETRO ALL'EDIFICIO CASO DI STUDIO	281
8.1.	Edificio di riferimento	281
8.1.1.	Analisi funzionale	286
8.1.2.	Caratteristiche costruttive	289
8.1.3.	Analisi strutturale.....	290
8.1.4.	Analisi energetica	310
8.2.	Intervento integrato di riqualificazione	314
8.2.1.	Progetto strutturale	317
8.2.2.	Progetto funzionale.....	332

8.2.3. Progetto energetico.....	336
8.3. Applicazione della metodologia MDO.....	339
9. CONCLUSIONI	363
APPENDICI	371
Appendice A – Design of Experiment	371
Appendice B – Codice Matlab per applicazione MDO all’aula con modello 3D	379
Appendice C – Reti neurali	385
Appendice D - Schede.....	393
Appendice E – Analisi dei carichi	417
Appendice F – Calcolo delle azioni della neve e del vento.....	423
Appendice G – Combinazioni di carico	428
Appendice H – Codice Matlab per applicazione MDO al caso di studio	435
Appendice I – Rete neurale output binari	446
Appendice L – Rete neurale output scalari	451
Appendice M – Codice Python	453
Appendice N – Modello TwinActivate	456
BIBLIOGRAFIA	459
INDICE DELLE FIGURE	480
INDICE DELLE TABELLE.....	491
PUBBLICAZIONI E ATTIVITÀ SVOLTE DURANTE IL DOTTORATO	493
RINGRAZIAMENTI	497

ABSTRACT

La ricerca si concentra sulla riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente in Italia, motivata dalla centralità che la scuola ricopre nella società e dalla condizione critica in cui verte il patrimonio scolastico. Questo studio analizza l'evoluzione morfologico-costruttiva degli edifici per la formazione al fine di comprenderne lo stato attuale, approfondendo gli aspetti strutturali, energetici e funzionali e le recenti tendenze progettuali. Vengono inoltre esaminati programmi di finanziamento e interventi realizzati, evidenziando l'urgenza di un piano strategico organico e coordinato per affrontare le problematiche dell'edilizia scolastica. Particolare attenzione è dedicata all'integrazione tra adeguamento sismico ed efficientamento energetico come strumento per migliorare la qualità complessiva degli edifici. La ricerca esplora la fattibilità, i limiti e i vantaggi di un approccio integrato alla riqualificazione delle scuole esistenti, attraverso l'analisi e l'applicazione dell'esoscheletro e l'uso della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare (MDO).

Attraverso l'analisi di un caso di studio applicativo scelto tra le scuole primarie di Terni, vengono dimostrati i benefici di un approccio integrato basato sull'esoscheletro e il valore aggiuntivo derivante dall'applicazione della MDO nella fase iniziale della progettazione, che consente di ampliare lo spazio progettuale, generare numerose alternative e individuare compromessi tra obiettivi contrastanti di più discipline. Le simulazioni condotte, supportate da tecniche di intelligenza artificiale, hanno confermato l'efficacia dell'approccio proposto. Nonostante la sperimentazione sia stata sviluppata sull'esoscheletro, l'applicazione dell'MDO non è vincolata a questa soluzione costruttiva, ma può essere estesa ad altri interventi capaci di integrare obiettivi multidisciplinari nel settore edile. Sebbene questa metodologia abbia mostrato risultati promettenti, vengono suggeriti ulteriori sviluppi necessari per renderla operativa in modo efficace nel settore dell'edilizia scolastica.

Parole chiave: edifici scolastici, intervento integrato, esoscheletro, multidisciplinary design optimization, apprendimento automatico

ABSTRACT

The present research focuses on retrofit of the existing school buildings in Italy, motivated by the central role that schools play in society and the critical condition of the school infrastructure. The study analyzes the morphological and constructive evolution of educational buildings to understand their current state, exploring structural, energy, and functional aspects as well as recent design trends. It also examines funding programs and completed interventions, highlighting the urgency of a coordinated and strategic plan to address the issues facing school buildings. Special attention is given to the integration of seismic upgrading and energy efficiency as a mean to improve the overall quality of the buildings. The research investigates the feasibility, limitations, and benefits of an integrated approach to the rehabilitation of existing schools through the analysis and application of exoskeletons and the use of Multidisciplinary Optimization (MDO).

By analyzing a case study selected from the primary schools in Terni, the benefits of an integrated exoskeleton-based approach are demonstrated, as well as the added value derived from applying MDO in the early design phase. This allows for an expanded design space, the generation of multiple alternatives, and the identification of trade-offs between conflicting goals of different disciplines. Simulations, supported by artificial intelligence techniques, have confirmed the effectiveness of the proposed approach. While the case study focused on the use of an exoskeleton, the MDO framework is not inherently tied to this specific solution; rather, it can be extended to a variety of retrofit strategies that involve the coordinated integration of multidisciplinary objectives. Although this methodology has shown promising results, further developments are suggested to make it effectively operational within the field of school building retrofit.

Key Words: school buildings, integrated intervention, exoskeleton, multidisciplinary design optimization, machine learning

1. INTRODUZIONE

1.1. Inquadramento

La ricerca si colloca nell'ambito della riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente e, più nello specifico, nel campo delle strategie integrate per il recupero degli edifici dal punto di vista sismico, energetico e, quando possibile, funzionale.

Per edilizia scolastica si intende l'attività di progettazione e costruzione finalizzata alla realizzazione di edifici destinati esclusivamente a soddisfare le esigenze educative e formative, tenendo conto di criteri architettonici, normativi, igienici e pedagogici; essa si evolve in risposta ai cambiamenti sociali, tecnologici e culturali. Nel corso degli anni, dalla nascita dello Stato unitario all'epoca contemporanea, la progettazione degli edifici scolastici ha subito significativi cambiamenti riflettendo le trasformazioni degli scenari politici, i mutamenti ideologici e le evoluzioni pedagogiche. Ogni epoca ha influenzato l'organizzazione spaziale e funzionale degli edifici scolastici, traducendo le esigenze educative in soluzioni architettoniche, strutturali e costruttive specifiche. In particolare, si è assistito a un progressivo passaggio dalla centralità esclusiva dell'aula alla necessità di creare nuovi spazi dedicati alla collaborazione, alla socialità e alla sperimentazione didattica. Contestualmente, la scuola è passata da una concezione chiusa, spesso isolata dal contesto territoriale, a una visione più inclusiva e integrata, in cui questa diventa un centro aperto alla comunità. Queste trasformazioni sottolineano come l'edilizia scolastica rappresenti non solo una risposta alle necessità didattiche, ma anche un riflesso dei valori culturali e sociali di ogni periodo storico.

A partire dal 2009, con la riforma Gelmini, sono state introdotte novità rilevanti sul tema, infatti da essa in poi le strutture si differenziano per ordine e grado delle scuole che ospitano. Di conseguenza, l'edilizia scolastica si distingue per rispondere alle esigenze specifiche della scuola dell'infanzia, primaria, superiore di primo e di secondo grado, adattandosi alle istanze educative e formative di ciascuna fase del percorso scolastico.

Dai dati dell'Anagrafe dell'edilizia scolastica, che offre un quadro della situazione attuale, si evince l'obsolescenza e l'inadeguatezza strutturale ed energetica del patrimonio nazionale di edilizia scolastica e, in rapporto all'evoluzione del concetto di educazione, emergono i limiti che questo presenta nell'ospitare i modelli educativi innovativi, sempre più diffusi. Infatti, l'età media degli edifici sul territorio nazionale è di circa 52 anni e l'organizzazione degli spazi didattici spesso risponde non solo a orientamenti pedagogici risalenti all'epoca di costruzione, ma anche a standard ormai superati in termini di sicurezza strutturale e prestazioni energetiche [1].

In questo scenario, il patrimonio edilizio scolastico deve confrontarsi con le nuove esigenze e con le priorità stabilite dalle moderne politiche scolastiche a livello nazionale, europeo [2] ed internazionale, come l'obiettivo 4 dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite sullo Sviluppo Sostenibile, che stabiliscono la necessità di assicurare un'istruzione di qualità, permanente e inclusiva. La Commissione Nazionale Italiana per l'UNESCO ha condotto uno studio sull'impatto che una riforma del sistema educativo potrebbe avere nel favorire il rilancio sociale ed economico del paese [3]. Tra i venti principi indicati per ispirare le specifiche azioni e riforme, l'obiettivo 9 relativo all'edilizia scolastica si declina per realizzare una scuola accogliente, moderna, sicura e sostenibile dove sia bello ed entusiasmante vivere e operare.

I fattori che influenzano le politiche di evoluzione nell'ambito dell'edilizia scolastica sono molteplici e interconnessi. Tra questi, la contrazione demografica, come risulta dalle proiezioni statistiche che indicano una significativa riduzione della popolazione scolastica nei prossimi anni [4], i cambiamenti nelle modalità di insegnamento, che richiedono un'organizzazione degli spazi più flessibile e capace di adattarsi nel tempo alle nuove esigenze educative, la crisi energetica, che spinge a considerare anche le scuole come potenziali comunità energetiche sulle quali investire per ridurre i consumi, e la crescente attenzione al comfort interno, per garantire ambienti di apprendimento salubri e accoglienti. Infine, non può essere trascurata la messa in sicurezza strutturale, che rimane prioritaria per la tutela degli studenti e del personale scolastico. In sintesi si va affermando una visione ampia e condivisa dell'edilizia scolastica secondo la quale rinnovamento delle metodologie

didattiche, sostenibilità ambientale, benessere degli occupanti, inclusione e sicurezza sono considerati fattori interconnessi ed inscindibili di cui gli interventi di recupero non possono non tenere conto.

In considerazione dei molteplici fattori di cambiamento, gli interventi sul patrimonio scolastico esistente, al pari delle nuove realizzazioni, dovrebbero essere il frutto di un'idea condivisa di scuola del futuro da parte del mondo dell'architettura che, attraverso un pensiero multidisciplinare e collaborativo, sappia farsi interprete delle esigenze attuali e anticipare quelle future. Ogni riflessione sull'edilizia scolastica dovrà necessariamente prendere in considerazione gli spazi educativi attualmente esistenti, che spesso si rivelano inadeguati a rispondere alle sfide che il sistema scolastico italiano deve affrontare: questi edifici devono evolversi per supportare le nuove metodologie didattiche, garantire ambienti sicuri e salubri e rispondere alle crescenti esigenze di sostenibilità ambientale, diventando luoghi più inclusivi e funzionali per una didattica innovativa. Oltre alla progettazione di nuovi edifici scolastici, diventa quindi essenziale e ancora più sfidante recuperare, ripensare e reinventare tutti gli spazi delle scuole preesistenti. Gli edifici, le aule e gli ambienti laboratoriali delle scuole non sono solo i luoghi dell'accoglienza, dove trovano spazio le attività formative, ma svolgono essi stessi una funzione educativa fondamentale e contribuiscono a ricostruire una dimensione relazionale e cooperativa.

Come precedentemente accennato, un ingente numero di edifici scolastici ha caratteristiche costruttive e formali che non rispettano le norme di sicurezza strutturale o di sostenibilità ambientale né sono atti ad accogliere modalità di didattica innovativa. Per riqualificare questo patrimonio riuscendo a integrare le odierne necessità di sicurezza, sostenibilità e pedagogia, occorre conoscerlo e studiarlo. Questi edifici, infatti, vengono oggi investiti di nuovi significati e funzioni, diventando una categoria edilizia sempre più complessa nonostante in passato siano stati considerati esclusivamente come un mero contenitore di istruzione. L'obiettivo di utilizzare al meglio le risorse economiche disponibili per il recupero e la riqualificazione degli edifici esistenti pone la necessità di ripensare alle modalità progettuali, adottando soluzioni che soddisfino i nuovi requisiti. In questo contesto, gli interventi integrati, quando applicabili, si

rivelano fondamentali, poiché permettono di affrontare simultaneamente le diverse esigenze strutturali, ambientali e, quando possibile, pedagogiche, garantendo degli spazi sicuri, energeticamente efficienti e adatti ad ospitare le nuove necessità educative. L'approccio multidisciplinare consente di ottenere una visione complessiva dell'edificio scolastico, in cui la progettazione architettonica, strutturale ed energetica interagiscono in modo sinergico, in base ai loro obiettivi a volte contrastanti con lo scopo di giungere a soluzioni soddisfacenti e in grado di rispondere in maniera adeguata alle sfide contemporanee e future.

1.2. Le ragioni della ricerca

La città che funziona è quella in cui si dorme, si lavora, ci si diverte e soprattutto si va a scuola. Occuparsi di edifici scolastici è un rammendo che, ancora prima che edilizio, è sociale.

Ecco la scuola che farei.

Renzo Piano

Il complesso scenario di cambiamento del mondo della scuola e l'impatto di questo sul patrimonio edilizio scolastico è un tema particolarmente delicato e urgente da gestire con strategie innovative e multidisciplinari.

La ricerca si inserisce nel dibattito teorico disciplinare incentrato sulle questioni relative alla riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente che, in particolare, nasce da due esigenze: la prima è rappresentata dalla consapevolezza della situazione critica in cui verte il patrimonio scolastico, determinata da una grande diversità tra le prestazioni fornite dagli edifici in esame e i requisiti previsti dalle attuali normative nei campi strutturale, energetico e funzionale. La maggior parte degli edifici scolastici italiani è stata costruita prima dell'introduzione della normativa antisismica del 1974 (Legge 2 febbraio 1974, n. 64) e delle disposizioni sull'efficienza energetica del 1976 (Legge 30 marzo 1976, n. 373), con oltre il 40% situato in zone ad elevato rischio sismico. Questi edifici

presentano consumi energetici elevati e risultano inadeguati a soddisfare i requisiti di comfort e sostenibilità. Inoltre, le scuole costruite prima del 1975 hanno spesso spazi inadeguati ad accogliere i nuovi metodi didattici ed educativi.

La seconda esigenza è dettata dal delicato ruolo sociale che questa tipologia di edificio ricopre. Infatti, la scuola rappresenta un luogo pubblico imprescindibile per l'intera comunità e i suoi spazi contribuiscono alla crescita dei giovani; è quindi prioritario garantirne la sicurezza necessaria e il rispetto degli obiettivi di sostenibilità. La scuola è uno dei settori che prima di altri dovrebbe trasmettere sicurezza ed efficienza perché nei suoi spazi interni si configura la prima struttura relazionale di una società; gli edifici scolastici non sono solo gli spazi dove si studia, ma il luogo dove i giovani crescono e dove il cittadino si forma. "La scuola è il primo luogo dove si impara la democrazia e si diventa cittadini, dove si imparano il valore dell'uguaglianza e della differenza, dell'apprendimento e della conoscenza che ci accompagnerà per tutta la vita, il senso della scienza, le regole della nostra convivenza civile" [5].

Inoltre, è ormai evidente che nel momento in cui accade qualcosa di dirompente come un terremoto o una pandemia è proprio il sistema scolastico a diventare l'anello più debole di una comunità. Un esempio è il drammatico crollo della scuola elementare di San Giuliano, nel terremoto del Molise del 2002, dove sono morti 27 bambini e un insegnante. Ciò ha allertato il Paese sulla vulnerabilità delle strutture critiche portando all'introduzione di una nuova zonazione sismica e delle nuove norme sismiche nel 2003. Analogamente il recente fenomeno pandemico ha messo in evidenza le criticità del patrimonio scolastico in termini di spazi e sicurezza, esasperando l'inadeguatezza di moltissime strutture e accelerando le necessità di un intervento radicale.

La situazione post-pandemica ha attivato una nuova stagione di finanziamenti pubblici per l'edilizia scolastica, offrendo un'opportunità unica per affrontare le criticità di un patrimonio in sofferenza già prima del Covid-19. In particolare, il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), nell'ambito dei fondi Next Generation Europe, destina 30,09 miliardi di euro al settore "Istruzione e ricerca", di cui 3,9 miliardi sono riservati agli interventi sul patrimonio scolastico esistente (Missione 4-C1 - Investimento 3.3) volti alla manutenzione

straordinaria, alla riqualificazione energetica, funzionale e al miglioramento strutturale.

Il lavoro di ricerca nasce dall'intento di contribuire alla comprensione e alla rappresentazione dello stato attuale del patrimonio edilizio scolastico esistente, analizzandone gli aspetti strutturali, energetici e funzionali, e di esaminare in maniera critica le modalità con cui vengono progettati e realizzati gli interventi di recupero. Inoltre, un aspetto chiave della ricerca è lo studio di metodologie innovative per una progettazione multidisciplinare degli interventi che favoriscano una valutazione integrata dei diversi aspetti progettuali per garantire soluzioni complessive ottimali.

1.3. Obiettivi, metodo e strumenti

Dal momento che qualunque contributo innovativo non può prescindere da una conoscenza approfondita della situazione attuale, il lavoro di ricerca ha come primo obiettivo l'elaborazione di un quadro conoscitivo su come il patrimonio scolastico esistente sia evoluto dal punto di vista morfologico-costruttivo e sulle modalità di intervento attualmente adottate per la sua riqualificazione. Questa analisi è condotta in relazione alle normative vigenti, alle strategie educative attuali e alle nuove tendenze architettoniche nel contesto dell'edilizia scolastica. La ricerca si propone quindi, quale obiettivo principale, di studiare, sia dal punto di vista teorico che applicativo, la fattibilità e i possibili benefici di un approccio integrato alla riqualificazione degli edifici scolastici esistenti anche attraverso la valutazione della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare, già diffusa in altri settori per l'analisi di problematiche con analoghe complessità.

La ricerca si avvale di metodologie e strumenti che includono, da un lato, quelli propri dell'indagine storico-costruttiva e, dall'altro, quelli specifici per la modellazione e la simulazione numerica, integrando anche tecniche di intelligenza artificiale. La metodologia della ricerca prevede come prima fase la ricostruzione dell'evoluzione dell'edilizia scolastica in Italia, anche attraverso la contestualizzazione nelle vicende storiche. Gli strumenti utilizzati sono stati la ricerca bibliografica di testi e manuali, la ricerca documentale presso le biblioteche e la ricognizione in letteratura delle ricerche già sviluppate sul tema.

Questa indagine prevede anche lo studio delle scuole a livello morfo-tipologico e costruttivo e l'individuazione degli aspetti caratteristici a seconda delle varie epoche. Per la definizione della situazione attuale del patrimonio analizzato in relazione ai nuovi modelli spaziali legati all'apprendimento e alle prestazioni richieste dalle normative vigenti, ci si è avvalsi di report e dell'analisi del database digitale del MIUR. Lo studio propone anche un aggiornamento sintetico del quadro internazionale di ricerche che affinano le conoscenze sul tema degli interventi di miglioramento sismico e delle prestazioni energetiche attraverso l'uso di diversi metodi e strumenti. Un'attenzione particolare è rivolta a quelli che utilizzano un approccio integrato che permette di considerare contemporaneamente più aspetti e di organizzare i processi con la corretta sequenza, ottimizzando le risorse. Tra le diverse tipologie di interventi integrati, è stato scelto di approfondire lo studio dell'esoscheletro, una soluzione che consente di affrontare in modo sinergico gli aspetti strutturali, energetici e funzionali, rispondendo alle principali esigenze degli edifici scolastici esistenti. In parallelo alle tecniche tradizionali, la ricerca analizza la possibile applicazione della metodologia *Multidisciplinary Design Optimization* (MDO) che è utilizzata per la progettazione di sistemi e sottosistemi complessi, sfruttando in modo sistematico e coerente la sinergia di fenomeni che interagiscono tra loro. Il valore dell'MDO risiede nella capacità di individuare una soluzione ottimale complessiva, che è migliore rispetto a quella ottenuta attraverso l'ottimizzazione sequenzialmente di ciascun fenomeno isolato, sebbene l'analisi contemporanea di tutti i fenomeni comporti un significativo aumento della complessità del problema. Attualmente l'applicazione di questa metodologia si è sviluppata maggiormente nel settore aerospaziale, automobilistico e, in misura minore, nell'ambito edilizio, limitatamente alla progettazione di nuovi edifici o di specifiche componenti tecnologiche. Il vantaggio dell'ottimizzazione multidisciplinare, oltre a trovare un compromesso tra obiettivi contrastanti, è quello di ampliare lo spazio di progettazione ed estendere il numero di soluzioni esaminate rispetto alle tecniche tradizionali, infatti l'algoritmo di ottimizzazione è in grado di elaborare un numero di varianti considerevolmente superiore a quello che un essere umano potrebbe generare in un tempo adeguato,

consentendo così una valutazione più ampia e dettagliata delle possibili soluzioni progettuali.

Dunque, questa ricerca si propone di esplorare il potenziale utilizzo dell'ottimizzazione multidisciplinare anche per la progettazione di interventi di riqualificazione integrata. L'ambito di applicazione scelto è particolarmente sfidante e complesso anche a causa dei vincoli imposti dagli edifici esistenti, ma, in generale, offre un valido campo di applicazione per l'interazione tra discipline differenti quali, per esempio, gli aspetti strutturali, energetici e di comfort interno.

Nel dettaglio, si è inizialmente delineato il contesto teorico dell'MDO attraverso l'indagine bibliografica della letteratura di settore che ha permesso di valutare le basi teoriche della metodologia, comprendere lo stato dell'arte e le tendenze anche in altri settori e individuare casi applicativi nell'ambito edilizio. Dopo aver analizzato questi approcci, la ricerca si è focalizzata sulla formalizzazione della metodologia nell'ambito del settore edilizio e sull'approfondimento di un caso di studio applicativo per verificare i vantaggi e i limiti dell'uso della metodologia MDO per la progettazione degli interventi di recupero di edifici, in particolare quelli scolastici.

Dal momento che si propone l'utilizzo delle simulazioni di ottimizzazione a un nuovo ambito, si è ritenuto opportuno elaborare inizialmente dei modelli meno complessi al fine di poterne studiare più agevolmente l'applicabilità. In particolare è stata scelta un'aula scolastica come primo prototipo in modo tale da avere un modello semplice per comprendere meglio il processo di simulazione, i vantaggi e i limiti. L'uso del modello semplificato ha consentito di consolidare il processo di analisi, di valutare la disponibilità di software commerciali e la loro integrabilità con gli strumenti generalmente utilizzati per la progettazione di edifici. Inoltre è stato possibile evidenziare da subito il valore di questa metodologia, ma anche l'elevata necessità di risorse computazionali che ne renderebbero costosa e complicata l'applicazione a casi d'uso reali. Come ambito di approfondimento applicativo è stato scelto il Comune di Terni in funzione da una parte dell'ampio scenario di tipologie costruttive e dall'altra del campionario non troppo esteso di edifici scolastici che ha permesso di reperire e analizzare tutto il materiale degli stessi. Per il materiale planimetrico

e costruttivo ci si è avvalsi della ricerca presso archivi locali, enti e professionisti che hanno effettuato studi sui singoli edifici e rilievi diretti. Successivamente allo studio dell'evoluzione dell'edilizia scolastica a Terni e all'individuazione delle scuole attualmente operative, è stato scelto di restringere il campo di indagine agli istituti di formazione primaria per uno studio più approfondito. Il campione selezionato per rappresentatività e completezza delle informazioni, presupposto imprescindibile per le valutazioni successive, è composto da quindici edifici di istruzione primaria. Il quadro dei dati forniti dalla città di Terni permette di disporre di una casistica varia, ma non dispersiva, sotto gli aspetti tipologici e costruttivi. La pubblica amministrazione ha fornito rilievi, prove sui materiali e relazioni che sono stati esaminati e studiati in base agli obiettivi della ricerca. Tali informazioni sono state integrate e confrontate con i dati presenti sul portale dell'Anagrafe dell'edilizia scolastica e con quelli non pubblicati forniti dall'anagrafe regionale. Per garantire una raccolta e una catalogazione sistematica dei dati, è stato deciso di creare una scheda che, strutturata in modo generale, possa essere utilizzata anche in altre ricerche. Tale scheda è stata successivamente compilata in modo dettagliato per il campione di studio al fine di raccogliere le informazioni necessarie per l'analisi, ma anche di organizzare il materiale in modo chiaro e ordinato, facilitando l'accesso e la consultazione delle informazioni. Questo approccio ha consentito di avere una visione complessiva e facilmente gestibile dei dati raccolti, migliorando l'efficacia del processo di analisi e interpretazione. Sono stati poi analizzati gli aspetti rilevanti del campione di studio ai fini degli obiettivi della ricerca.

Successivamente, tra le possibili tecniche di progettazione degli interventi di tipo integrato, lo studio si è concentrato sull'esoscheletro in acciaio da applicare ad una scuola elementare in calcestruzzo armato del Comune di Terni realizzata a partire dall'anno 1966. Dopo un'analisi storico-costruttiva dell'edificio, condotta attraverso documenti d'archivio, relazioni tecniche e rilievi, è stato realizzato un modello strutturale per studiarne il comportamento tramite software di simulazione. Contestualmente, è stata effettuata un'analisi della distribuzione funzionale degli spazi, evidenziando le carenze rispetto alle attuali esigenze didattiche e sono state esaminate le prestazioni energetiche dell'edificio utilizzando un software specifico per valutare il suo rendimento. A

partire da questo, è stato sviluppato il progetto dell'esoscheletro dal punto di vista strutturale; successivamente, sfruttando gli spazi tra le campate, è stato elaborato un progetto per la ridistribuzione funzionale degli ambienti e un intervento per il miglioramento dell'efficienza energetica, con particolare attenzione all'implementazione di soluzioni passive, come le serre solari.

Infine, la parte di sperimentazione della ricerca consiste nel cercare di applicare la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare alla fase di progettazione degli interventi per la riqualificazione dell'edificio esistente. Le elaborazioni sono state eseguite tramite software di modellazione che basano le loro simulazioni sulla metodologia MDO.

Da qui l'analisi e la valutazione di soluzioni alternative di ordine ridotto (ROM) basati sulla fisica o su tecniche di intelligenza artificiale per ridurre i tempi di simulazione e le risorse hardware necessarie ad un livello adeguato, ma con un errore assolutamente accettabile. Gli strumenti software utilizzati sono sia di tipo commerciale che sviluppati *ad hoc*, come per esempio codici in Python per generare reti neurali o script per automatizzare il workflow di simulazione. L'applicazione è stata successivamente estesa al caso di studio relativo all'intervento dell'esoscheletro applicato all'intero edificio. Per completare le analisi si è ritenuto opportuno effettuare anche un confronto tra i dati provenienti dalle simulazioni sperimentali con i risultati ottenuti dalle analisi tradizionali. Alla fine del processo sono stati esaminati i risultati, evidenziando i vantaggi e i limiti emersi durante lo studio. Inoltre sono stati proposti possibili sviluppi e orientamenti per implementare ulteriormente l'applicazione della metodologia proposta, con l'obiettivo di orientare possibili ricerche future in questo ambito.

L'approccio integrato alla progettazione sviluppato in questo lavoro, basato sull'utilizzo della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare (MDO), non è legato in modo esclusivo alla soluzione tecnica dell'esoscheletro in acciaio. Quest'ultima rappresenta una delle possibili opzioni progettuali per rispondere in modo coordinato alle esigenze strutturali, energetiche e funzionali dell'edificio. L'obiettivo generale è quello di dimostrare la validità dell'approccio metodologico adottato, che risulta applicabile anche ad altre tipologie di

intervento, purché queste prevedano l'integrazione di più discipline con obiettivi contrastanti tra loro.

1.4. Domande aperte

Il punto di partenza di questa ricerca è rappresentato dal contributo di studi nazionali e internazionali, come quello della Commissione Nazionale Italiana per l'UNESCO, che sottolineano il ruolo fondamentale di una riforma del sistema educativo nel rilancio sociale ed economico nel nostro Paese; tra le raccomandazioni emerse, particolare rilievo assume quella relativa all'edilizia scolastica che ha l'obiettivo di realizzare scuole accoglienti, moderne, sicure e sostenibili, in cui sia stimolante vivere e lavorare. Questa visione ha fornito la cornice concettuale per approfondire le problematiche legate al patrimonio edilizio scolastico esistente e per valutare proposte innovative per mirate al miglioramento della scarsa qualità media di molte strutture scolastiche. Le domande di ricerca sono state quindi articolate in sei gruppi, che riflettono con una logica consequenziale la struttura complessiva della trattazione. Ciascun interrogativo guida l'indagine e trova spazio di approfondimento in specifici capitoli, delineando così il filo conduttore che struttura e collega le diverse sezioni del presente studio:

Domande aperte	Capitolo di riferimento
1. Qual è lo stato attuale del patrimonio edilizio scolastico in Italia? Quante scuole sono attualmente attive e quali sono le loro caratteristiche morfologiche e costruttive? In che stato di conservazione e di efficienza si trovano gli edifici scolastici italiani? Quali sono i principali ambiti di intervento necessari per il loro miglioramento?	2
2. Come si sono evolute nel tempo le caratteristiche costruttive, distributive e architettoniche degli edifici scolastici in Italia? In che modo tali trasformazioni riflettono le diverse missioni attribuite al sistema scolastico	3

e alla sua organizzazione nel corso dei decenni? Quali sono le attuali tendenze progettuali per rispondere alle sfide contemporanee?	
3. Come vengono gestiti gli interventi di recupero? Quali sono le principali sfide legate alla riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente? Quali approcci progettuali si dimostrano più efficaci in relazione alle sfide contemporanee di sostenibilità, sicurezza e innovazione didattica? In che misura gli interventi definiti integrati rispondono effettivamente ai criteri di interdisciplinarietà, coordinamento e sinergia tra i vari aspetti?	4
4. In che modo problematiche analoghe vengono affrontate in altri settori? Da un punto di vista teorico, la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare (MDO) è applicabile a questo settore? Quali benefici e limitazioni emergono? In quale fase del processo progettuale l'applicazione di tale metodologia potrebbe offrire i maggiori vantaggi?	5
5. La metodologia di ottimizzazione multidisciplinare è applicabile da un punto di vista pratico al settore dell'architettura, ingegneria e costruzioni?	6
6. Qual è lo stato attuale degli edifici scolastici nella città di Terni in termini di caratteristiche morfologiche, costruttive e di conservazione? Quali sono i principali vantaggi e limiti nella progettazione di un esoscheletro come intervento strutturale, energetico e funzionale su una scuola esistente?	7
7. Quali sono i principali vantaggi e limiti nella progettazione di un esoscheletro come intervento strutturale, energetico e funzionale su una scuola esistente? La metodologia MDO come può contribuire a migliorare l'efficacia degli interventi integrati?	8

Le prime quattro domande riguardano lo stato dell'arte dei temi studiati, la quinta la formalizzazione della metodologia MDO nel settore edilizio. Infine, le ultime due domande sono relative alla fase applicativa e progettuale della ricerca, che costituisce il momento conclusivo e cruciale rispetto a tutte le questioni precedentemente elaborate, cercando un elemento di sintesi del lavoro.

1.5. Struttura dei contenuti

Questo elaborato si compone di otto capitoli, che illustrano i contenuti e i risultati della ricerca, oltre alla presente introduzione nella quale si descrivono le motivazioni alla base dello studio, gli obiettivi perseguiti, il metodo adottato e gli strumenti utilizzati. La struttura del lavoro riflette lo sviluppo degli obiettivi di ricerca articolandosi in una prima fase dedicata allo studio e all'analisi dello stato dell'arte, seguita dalla definizione della metodologia di progettazione integrata degli interventi di riqualificazione proposta che verrà successivamente applicata a un caso di studio concreto, permettendo di valutarne opportunità e criticità.

Nel secondo capitolo si ripercorre l'evoluzione degli edifici scolastici italiani analizzando le modalità costruttive e le normative che si sono succedute dalla seconda metà dell'Ottocento ad oggi. Questo percorso storico permette di comprendere la situazione attuale del patrimonio scolastico e di individuare gli ambiti di intervento necessari per soddisfare le esigenze del secondo millennio. Successivamente vengono analizzate le condizioni dell'edilizia scolastica in Italia nel suo complesso e con particolare attenzione agli aspetti strutturali, energetici e funzionali, mettendo in evidenza le principali criticità e le priorità di intervento.

Il quarto capitolo approfondisce le modalità di intervento attuate per il recupero degli edifici scolastici esistenti mettendo in evidenza l'opportunità di sviluppare una proposta di riqualificazione integrata che affronti congiuntamente gli aspetti sismici ed energetici. In tale contesto, il campo di indagine viene ulteriormente ristretto attraverso un approfondimento sull'esoscheletro, esaminandone i possibili benefici per la sua applicazione nelle scuole.

Nel quinto capitolo viene descritta una proposta innovativa per la progettazione ottimizzata degli interventi. La metodologia *Multidisciplinary Design Optimization* viene studiata sia dal punto di vista teorico che in relazione alla sua applicabilità nel contesto della progettazione edilizia. Infine vengono approfondite le possibili tecniche di modellazione utilizzabili, inclusi i modelli di ordine ridotto basati sulla fisica e sui dati.

Nel sesto capitolo, la metodologia *Multidisciplinary Design Optimization* viene inizialmente applicata ad un modello semplificato al fine di comprendere meglio il funzionamento del processo, perfezionare il processo operativo e definire gli strumenti da utilizzare per la gestione delle simulazioni. Questo passaggio preliminare ha consentito di formalizzare l'impostazione metodologica all'interno del contesto AEC, definendone con maggiore precisione struttura e potenzialità applicative e rendendola applicabile a casi di studio più complessi, in linea con gli obiettivi definiti nel lavoro di ricerca.

La necessità di individuare uno specifico caso di studio cui applicare la metodologia proposta, diventa l'occasione, nel settimo capitolo, per approfondire la situazione dell'edilizia scolastica descritta nei capitoli precedenti, focalizzandosi su un contesto specifico. Viene infatti studiata nel dettaglio l'edilizia scolastica del Comune di Terni dove è stato selezionato l'edificio di riferimento su cui sviluppare la proposta di riqualificazione integrata. Nell'ottavo capitolo, dopo aver esaminato approfonditamente lo stato attuale sotto gli aspetti strutturale, energetico e funzionale, è stata elaborata una proposta di intervento tramite la progettazione di un esoscheletro che risponde in modo sinergico a tutte le esigenze di miglioramento. Successivamente viene applicata anche la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare, estendendo al caso studio generale dell'edificio di riferimento il workflow operativo formalizzato in precedenza. I risultati ottenuti tramite l'approccio MDO vengono confrontati con quelli derivanti dall'approccio tradizionale, mettendo in evidenza vantaggi e limiti della metodologia proposta.

Infine, nel nono capitolo vengono presentate le conclusioni dell'intero lavoro di ricerca, con una sintesi dei principali risultati ottenuti. Vengono inoltre individuati possibili temi di ricerca che potrebbero essere ulteriormente sviluppati in studi futuri.

Il documento si conclude con l'elenco dei riferimenti bibliografici e delle illustrazioni e da appendici che riportano dettagli tecnici tra cui le schede delle scuole, i modelli di simulazione, i dati utilizzati nelle analisi ed i codici sviluppati.

