



POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

a.a. 2020/2021

Tesi di Laurea Magistrale

IL COMPUTATIONAL DESIGN PER LA PROGETTAZIONE
STRUTTURALE INTEGRATA

Sistemi di supporto decisionale in ambiente BIM per il dimensionamento
di strutture a telaio in calcestruzzo armato

Relatore
Prof. OSELLO Anna

Correlatori
Prof. BOCCONCINO Maurizio Marco
Prof. TONDOLO Francesco

Candidato
BUCCIARELLI Alessio Luigi
S266270

Sommario

Indice delle figure	4
Indice delle tabelle	7
Abstract	8
1. Introduzione	10
1.1. La curva del BIM	13
1.2. Il BIM per la progettazione	15
1.3. Il BIM nel mondo strutturale	17
1.4. La strategia di modellazione e worksharing	19
1.5. Interazione tra modello architettonico e strutturale	25
1.6. Il LOD e le sue implicazioni al caso studio	27
1.7. Il Computational Design e la programmazione visuale	30
1.8. Definizione degli obiettivi.....	32
2. La modellazione analitica e l'analisi strutturale	33
2.1. Generazione del modello analitico	33
2.1.1. I vincoli interni	35
2.1.2. I vincoli esterni	38
2.1.3. Strumenti di revisione del modello analitico	44
2.2. Analisi e applicazione dei carichi	45
2.2.1. Il peso proprio strutturale	45
2.2.2. Il peso proprio non strutturale	49
2.2.3. I carichi variabili	51
2.3. Processo standard e integrato per l'analisi strutturale.....	56
3. Revit e Robot Structural Analysis	57
3.1. Migrazione dei dati verso Robot.....	58
3.1.1. Definizione del carico da vento	62
3.1.2. Definizione dell'azione sismica	63
3.1.3. Definizione dell'analisi statica equivalente in Robot.....	65
3.2. Esecuzione analisi e controllo dei risultati.....	68
3.3. Visualizzazione e management dei risultati in ambiente Revit.....	69
3.3.1. Importazione e gestione dei risultati attraverso Dynamo	71
4. Ottimizzazione strutturale	73
4.1. Criteri generali di ottimizzazione strutturale	74
4.2. Dimensionamento degli elementi trave	76

4.2.1.	Campi di rottura e definizione delle equazioni alla traslazione e rotazione	76
4.2.2.	Gestione del calcolo mediante Visual Programming.....	84
4.3.	Dimensionamento elementi pilastro	87
4.4.	Importazione dei risultati del dimensionamento strutturale in Revit ...	89
5.	Casi studio	93
5.1.	Caso studio 1: Edificio commerciale	93
5.1.1.	Analisi dei carichi	95
5.1.2.	Dimensionamento degli elementi strutturali	101
5.2.	Caso studio 2: Edificio residenziale.....	103
5.2.1.	Analisi dei carichi e delle sollecitazioni	104
5.2.2.	Dimensionamento degli elementi strutturali	105
5.3.	Caso studio 3: Edificio scolastico.....	107
5.3.1.	Analisi dei carichi e delle sollecitazioni	108
5.3.2.	Dimensionamento degli elementi strutturali	109
6.	Validazione del processo mediante verifica strutturale	111
6.1.	Caso studio 1: Edificio commerciale	111
6.1.1.	Progetto della travata.....	111
6.1.2.	Progetto della pilastrata	116
6.2.	Caso studio 2: Edificio residenziale.....	120
6.2.1.	Progetto della travata.....	120
6.2.2.	Progetto della pilastrata	124
6.3.	Caso studio 3: Edificio scolastico.....	130
6.3.1.	Progetto della travata.....	130
6.3.2.	Progetto della pilastrata	134
7.	Conclusioni	137
8.	Bibliografia	140
9.	Sitografia	142
	Ringraziamenti.....	143

Indice delle figure

Figura 1 – Attori del processo progettuale.....	11
Figura 2 - Il modello come database	12
Figura 3 Condivisione di informazioni mediante ifc	13
Figura 4 - Curva di Mc Leamy	14
Figura 5 Il modello BIM come database	16
Figura 6 Dal modello digitale al modello analitico.....	18
Figura 7 Condivisione delle informazioni non strutturata.....	19
Figura 8 Condivisione delle informazioni strutturata.....	20
Figura 9 Schematizzazione della condivisione del lavoro mediante link	22
Figura 10 Schematizzazione della condivisione del lavoro mediante workset .	23
Figura 11 Modelli locali e modello centrale	24
Figura 12 Creazione di foro pavimento vincolato a pilastro.....	25
Figura 13 Scale di classificazione del LOD in diversi paesi.....	27
Figura 14 Descrizione dei LOD secondo la normativa italiana	28
Figura 15 Schema tipo di un algoritmo computazionale.....	31
Figura 16 Corretta modellazione di un giunto trave-trave.....	33
Figura 17 Modello analitico di un nodo trave-pilastro	35
Figura 18 Modello analitico standard di un nodo trave disallineata-pilastro	35
Figura 19 Modello analitico corretto di un nodo trave disallineata-pilastro	36
Figura 20 Settaggio dei parametri di rilascio di un nodo analitico.....	37
Figura 21 Momento massimo per trave appoggiata e incastrata.....	38
Figura 22 Struttura in c.a. di esempio.....	39
Figura 23 Strutture in c.a. valutate separatamente.....	40
Figura 24 Rappresentazione grafica delle principali tipologie di vincolo.....	41
Figura 25 Parametri di una famiglia vincoli esterni	41
Figura 26 Vincolo esterno definito da utente	42
Figura 27 Vincolo incastro per muro e pilastro strutturale	43
Figura 28 Strumenti di revisione del modello analitico	44
Figura 29 Parametri fisici del materiale	46
Figura 30 Parametro forma sezione degli elementi strutturali	47
Figura 31 Parametri di forma sezione per generico profilato a I.....	48
Figura 32 Stratigrafia di un solaio in Revit.....	49
Figura 33 Modello digitale e analitico di un solaio laterocementizio	50
Figura 34 Solaio laterocementizio	50
Figura 35 Impostazione delle condizioni di carico su Revit	51
Figura 36 Generazione delle combinazioni di carico	52
Figura 37 Tipi di carico inseribili su Revit	53
Figura 38 Carichi lineari su travi	54
Figura 39 Parametri di un'istanza carico lineare.....	55
Figura 40 Plug-in di Robot per l'analisi strutturale	57
Figura 41 Interfaccia di collegamento con Robot Structural Analysis.....	58
Figura 42 Modalità di migrazione dei dati tra Revit e Robot	58
Figura 43 Opzioni aggiuntive di migrazione dei contenuti	59
Figura 44 Modello strutturale in Revit e analitico in Robot	60
Figura 45 Visualizzazione casi di carico.....	61
Figura 46 Valori di riferimento per il calcolo della velocità di base di riferimento del vento.....	62
Figura 47 Rappresentazione grafica del carico da vento	63

Figura 48 Prospetto 3.2 dell'Eurocodice 8 per la definizione di T_c	64
Figura 49 Definizione dell'azione sismica in Robot	65
Figura 50 Parametri dell'azione sismica per la definizione delle forze statiche equivalenti	66
Figura 51 Definizione dei piani per la valutazione automatica dell'azione sismica	67
Figura 52 Combinazione sismica	67
Figura 53 Combinazione dei carichi di esempio	68
Figura 54 Diagramma di momento generato dal peso proprio strutturale	69
Figura 55 Interfaccia per la reimportazione dei dati in Revit.....	69
Figura 56 Del diagramma di momento a SLU per l'intera struttura.....	70
Figura 57 Workflow per l'esportazione delle sollecitazioni da Robot a Revit....	71
Figura 58 Caratteristiche della sollecitazione per una trave	72
Figura 59 Predimensionamento di pilastri in calcestruzzo armato secondo le norme ACI	74
Figura 60 Predimensionamento di travi in calcestruzzo armato secondo le norme ACI	74
Figura 61 Processo progettuale standard e integrato.....	75
Figura 62 Legge costitutiva per l'acciaio.....	76
Figura 63 Legge costitutiva per il calcestruzzo ordinario	77
Figura 64 Campo di rottura 1.....	77
Figura 65 Campo di rottura 2.....	78
Figura 66 Campo di rottura 3.....	78
Figura 67 Campo di rottura 4.....	79
Figura 68 Campo di rottura 5.....	79
Figura 69 Comportamento della sezione soggetta a flessione	80
Figura 70 Approssimazione della componente di resistenza a compressione .	81
Figura 71 Approssimazione del braccio della componente di resistenza a compressione	81
Figura 72 Costanti gestibili mediante script Dynamo.....	84
Figura 73 Calcolo della base dell'elemento trave	85
Figura 74 Calcolo dell'armatura teorica per ogni elemento trave	86
Figura 75 Script Determinazione del diametro di armatura ottimale	86
Figura 76 Costanti gestibili mediante script Dynamo.....	87
Figura 77 Dimensionamento della sezione del pilastro	88
Figura 78 Script Dynamo per determinare il diametro di armatura ottimale	88
Figura 79 Generazione nuovi tipi e assegnazione alle istanze.....	90
Figura 80 Visualizzazione dei parametri di progetto in Revit.....	90
Figura 81 Compilazione del parametro relativo all'indice di sfruttamento.....	91
Figura 82 Filtri di visualizzazione dello sfruttamento degli elementi	92
Figura 83 Schema a colori per la valutazione dello sfruttamento della struttura	92
Figura 84 Planimetria di progetto del complesso dei Docks Dora	93
Figura 85 Sezione tipo del complesso.....	94
Figura 86 Analisi dei carichi del pacchetto solaio	95
Figura 87 Analisi dei carichi della muratura perimetrale non portante	96
Figura 88 Zone di carico della neve	97
Figura 89 Valori del coefficiente di forma	97
Figura 90 Valori di C_E per diverse classi di esposizione	97
Figura 91 Piano di campagna sul modello strutturale.....	98

Figura 92 Valori dei parametri $V_{b,0}$, a_0 , k_s	99
Figura 93 Rappresentazione in schema colore dell'azione del vento	99
Figura 94 Valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso delle costruzioni	100
Figura 95 Mappa colore dello sfruttamento degli elementi strutturali	102
Figura 96 Vista in pianta del piano tipo	103
Figura 97 Rappresentazione in schema colore dell'azione del vento	104
Figura 98 Mappa colore dello sfruttamento degli elementi strutturali	106
Figura 99 Render dell'edificio scolastico	107
Figura 100 Maglia strutturale dell'edificio scolastico.....	107
Figura 101 rappresentazione in schema colore dell'azione del vento	108
Figura 102 Mappa colore dello sfruttamento degli elementi strutturali	110
Figura 103 Inquadramento travata oggetto di verifica	111
Figura 104 Travata oggetto di verifica	112
Figura 105 Trava post ottimizzazione strutturale.....	112
Figura 106 Inviluppo dei diagrammi di momento e momento resistente	113
Figura 107 Diagrammi di taglio per le combinazioni considerate	114
Figura 108 Distinta ferri travata edificio commerciale.....	115
Figura 109 Pilastrata oggetto della verifica strutturale.....	116
Figura 110 Distinta dei ferri della pilastrata	116
Figura 111 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 1	117
Figura 112 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 2	118
Figura 113 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 3	118
Figura 114 Inquadramento travata oggetto di verifica	120
Figura 115 Travata oggetto di verifica	121
Figura 116 Inviluppo dei diagrammi di momento e momento resistente	121
Figura 117 Diagrammi di taglio per le combinazioni considerate	122
Figura 118 Distinta ferri travata edificio residenziale	123
Figura 119 Pilastrata oggetto della verifica strutturale.....	124
Figura 120 Distinta dei ferri della pilastrata	124
Figura 121 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 1	125
Figura 122 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 2	125
Figura 123 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 3	126
Figura 124 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 4	126
Figura 125 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 5	127
Figura 126 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 6	127
Figura 127 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 7	128
Figura 128 Inquadramento travata oggetto di verifica	130
Figura 129 Trave post ottimizzazione strutturale.....	131
Figura 130 Inviluppo dei diagrammi di momento e momento resistente	131
Figura 131 Diagramma di taglio per le combinazioni considerate	132
Figura 132 Distinta ferri travata edificio scolastico	133
Figura 133 Pilastro oggetto della verifica strutturale.....	134
Figura 134 Distinta dei ferri della pilastrata	134
Figura 135 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 1	135
Figura 136 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 2	135
Figura 137 Volumetrie pre e post processo, caso residenziale	138
Figura 138 Volumetrie pre e post processo, caso commerciale	139
Figura 139 Volumetrie pre e post processo, caso scolastico	139

Indice delle tabelle

Tabella 1 Armatura longitudinale teorica e reale nella travata.....	112
Tabella 2 Sollecitazione di taglio agente sulla pilastrata ai diversi livelli.....	119
Tabella 3 Armatura longitudinale teorica e reale nella travata.....	121
Tabella 4 Percentuali di armatura nei pilastri ai vari livelli	128
Tabella 5 Sollecitazione di taglio agente sulla pilastrata ai diversi livelli.....	129
Tabella 6 Azioni resistenti di taglio e passi delle staffe.....	129
Tabella 7 Armatura longitudinale teorica e reale nella travata.....	131
Tabella 8 Percentuali di armatura nei pilastri ai vari livelli	135
Tabella 9 Sollecitazione di taglio agente sulla pilastrata ai diversi livelli.....	136

Abstract

Versione Italiana

Le potenzialità e i vantaggi offerti dalla metodologia BIM sono ad oggi una realtà consolidata e sicuramente ancora in forte espansione. Tant'è che, come previsto dal Decreto BIM (D.M. 560/2017) in attuazione dal 01 gennaio 2021, l'utilizzo di metodologie BIM per appalti per Opere Pubbliche di valore superiore a 15 milioni di euro è divenuto obbligatorio.

Da gennaio 2025 tutte le Opere Pubbliche dovranno essere appaltate seguendo modalità progettuale in BIM.

Anche per questo motivo, quotidianamente nascono nuove idee e nuovi input, dettati dalle immense possibilità esplorabili, nella gestione e nel miglioramento del processo progettuale, visto in un'ottica integrata proprio come suggerito dal BIM.

Delle varie discipline che concorrono all'iter di progettazione, l'ambito strutturale è quello nel quale l'applicazione del BIM ha sicuramente maggiore margine di crescita, per via delle difficoltà che sorgono nell'adattare il processo di progettazione strutturale canonico alle modalità progettuali integrate introdotte con il BIM. In questo senso, nuove frontiere esplorabili sono certamente quelle del computational design e della programmazione visuale, le quali offrono possibilità smisurate, accelerando notevolmente i processi di interscambio e gestione di informazioni tra diversi software.

Nel presente elaborato di tesi verrà dapprima descritto l'iter mediante il quale eseguire la modellazione strutturale, il calcolo strutturale e l'importazione dei risultati all'interno dell'ambiente Revit, in modo che i risultati siano facilmente condivisibili e interrogabili da tutti gli attori del processo di progettazione.

In seconda istanza sarà descritto un processo di ottimizzazione strutturale, strutturato grazie al computational design direttamente all'interno dell'ambiente Revit.

L'intero iter procedurale sarà applicato a tre diversi casi studio, al fine di verificare la sua effettiva applicabilità.

English version

Potentiality and advantages offered by the BIM methodology are today a consolidated fact and certainly still in expansion.

In fact, as required by the BIM Decree (Ministerial Decree 560/2017) in place from 1st January 2021, the use of BIM methodologies is mandatory for tenders for Public Works worth more than 15 million euros.

From January 2025 all Public Works will have to be contracted using BIM methodology.

Also for this reason, new ideas and new input will be born every day, because of the great possibilities that can be explored, in the management and improvement of the design process, seen from an integrated perspective just as suggested by BIM.

Of the various disciplines that contribute to the design process, the structural area is the one in which the application of BIM certainly has greater growth possibilities, due to the difficulties that arise in adapting the canonical structural design process to the integrated design methods introduced with BIM.

In this sense, new frontiers that can be explored are certainly about computational design and visual programming, which offer immeasurable possibilities, accelerating the exchange and management of information between different software.

This thesis will first describe the correct process to perform the structural modeling, structural calculation and importation of results into the Revit environment, so that the results are easily shared and interrogated by all the players in the design process.

Secondly, will be described a structural optimization process, structured thanks to computational design directly inside the Revit environment.

The entire procedural process will be applied to three different study cases, in order to verify its validity.

1. Introduzione

Quella del BIM è una realtà molto spesso dibattuta ma oggigiorno ampiamente accettata all'interno del mondo delle costruzioni e della progettazione in genere. Le sue potenzialità, oggi ben note e quasi unanimemente riconosciute, hanno tardato ad essere accettate ed il motivo è molto semplice: il corretto utilizzo e le vere potenzialità del metodo BIM nascono da un uso consapevole dello strumento.

La riprova del fatto che il BIM è ad oggi una realtà affermata è giunta a inizio 2021 con l'entrata in vigore del decreto BIM (D.M. 560/2017), che ha reso obbligatoria la progettazione mediante sistemi informatici BIM per le opere pubbliche di importo superiore ai 15 milioni di euro.

Tra soli quattro anni, per poter prendere parte ad appalti di progettazione in ambito pubblico, l'adozione del BIM sarà obbligatoria per ogni importo.

Il termine BIM ha innumerevoli accezioni, ma in linea generale il modo migliore e più generale per definirlo è come "metodo di lavoro e condivisione".

Il fulcro del metodo è rappresentato dalla "I" all'interno dell'acronimo BIM, *l'informazione*.

Tutti gli attori del processo progettuale lavorano all'unisono condividendo le informazioni di loro pertinenza e richiedendo quelle necessarie per l'espletamento dei loro compiti. In generale, qualunque progetto non nasce da una riproduzione seriale e acritica di un prototipo, ma è il frutto di contributi e decisioni di innumerevoli soggetti, delle quali è fondamentale tenere traccia al fine di conseguire il risultato finale nella maniera più efficace ed efficiente, arrivando quindi al risultato migliore possibile, nel minor tempo possibile, impiegando la minor quantità possibile di risorse.



Figura 1 – Attori del processo progettuale

FONTE: <https://www.google.com/search?q=attori+del+processo+bim>

Gli aspetti della metodologia BIM che consentono la generazione di un workflow efficace sono innumerevoli, e sono sia di carattere progettuale che di carattere informatico.

La condivisione delle informazioni dipende sostanzialmente da due macrofattori vitali: l'ambiente di condivisione delle informazioni e il formato di condivisione delle stesse.

L'ambiente di condivisione delle informazioni è il "modello BIM". L'accezione del modello è spesso limitata ad una rappresentazione tridimensionale del progetto in corso d'opera, dal quale è possibile estrarre agevolmente elaborati grafici di varia natura, mentre la corretta connotazione che dovrebbe avere il modello è quella di database.

Se tutte le informazioni inerenti a un progetto, si trovano all'interno di un unico contenitore, e sono organizzate ed elencate tramite un "browser di progetto" correttamente implementato, esse saranno più accessibili e il compito progettuale degli attori coinvolti sarà notevolmente agevolato.

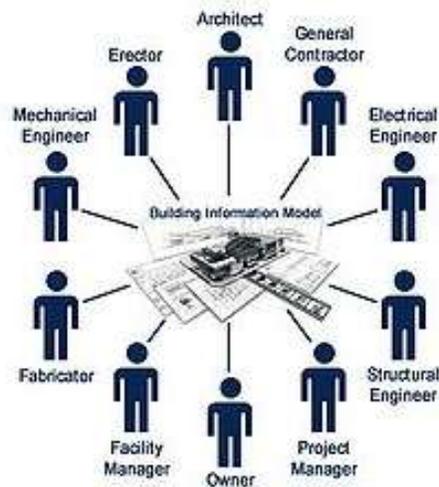


Figura 2 - Il modello come database

FONTE: http://apppm.man.dtu.dk/index.php/BIM-based_information_flow_during_construction_phase

In generale, è poi importante che tutti gli attori coinvolti parlino la “stessa lingua”; la standardizzazione e l’omogeneità di formato delle informazioni contenute all’interno del modello giocano un ruolo chiave nell’espletamento dei compiti di ognuno.

Standardizzare e codificare le informazioni che ogni attore condivide all’interno del database è un processo obbligatorio al fine di ottimizzare i risultati ed il tempo di raggiungimento degli stessi.

In questo senso, allo stato attuale del processo di integrazione tra le varie figure professionali coinvolte, e quindi tra i vari software che essi utilizzano, la condivisione di informazioni ha raggiunto certamente un risultato non ottimale ma soddisfacente. I professionisti dei vari settori sono in grado di condividere il proprio apporto al progetto inserendo i proprio risultati direttamente all’interno del modello, e rendendo quindi tutti gli altri professionisti coinvolti partecipi dei risultati ottenuti.

La condivisione dei risultati può avvenire principalmente in due modi distinti; il primo è l’integrazione diretta, spesso possibile tra software della stessa software house, per i quali l’importazione dei dati sul modello condiviso è rapida e semplice, e non necessita di passaggi intermedi.

Il secondo, da adottare quando il primo non è possibile, è il passaggio di informazione mediante il formato universale del mondo BIM, l’*Industry Foundation Classes*.



Figura 3 Condivisione di informazioni mediante ifc

FONTE: <http://www.progettazionecasa.com/bim-perche-si-parla-rivoluzione/>

1.1. La curva del BIM

Quanto descritto sommariamente finora, rappresenta la base per la costruzione di un flusso di lavoro consapevole e atto al conseguimento del miglior risultato possibile.

Tutte le operazioni basilari fino a qui presentate, come la condivisione dei dati, la standardizzazione dei formati di condivisione e importazione, la cooperazione tra professionisti, sono aspetti del BIM che richiedono un notevole sforzo di implementazione e spiccate conoscenze dei protocolli standard da applicare per poter essere effettuate nel modo corretto.

Si è brevemente parlato di come il BIM sia ora uno strumento consolidato, ma non di come inizialmente, essendo una novità, abbia incontrato l'opposizione di una grossa fetta di professionisti del mondo delle costruzioni.

Il motivo è proprio questo: il metodo correttamente applicato richiede conoscenza, formazione e soprattutto un grosso investimento iniziale in termini di tempo e risorse economiche.

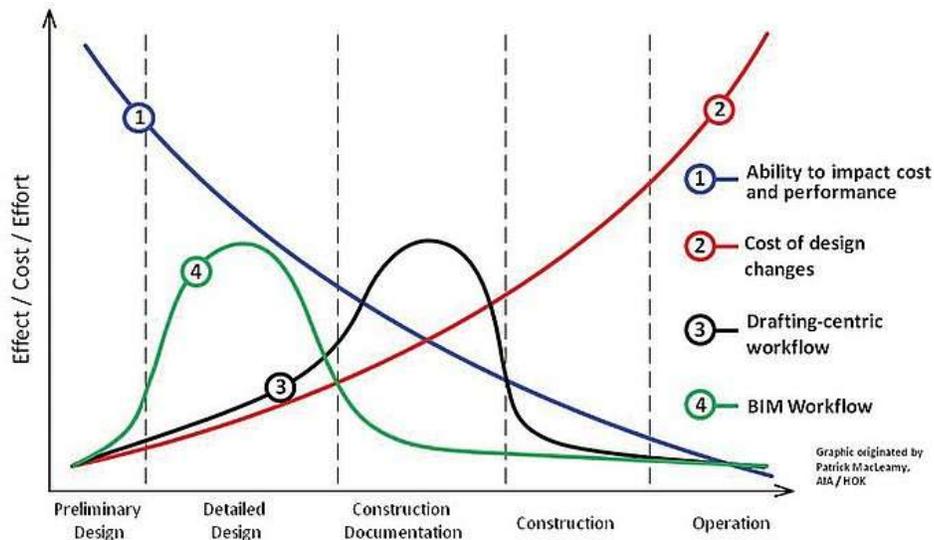


Figura 4 - Curva di Mc Leamy

FONTE: <https://marziafolino.wordpress.com/2017/11/17/il-bim-ovunque-dallarchitetto-al-cantiere/>

La figura 4 rappresenta la curva di Mc Leamy, nella quale viene sinteticamente descritta la capacità di gestione del processo progettuale con metodologia BIM e con un metodo di lavoro basato sul disegno 2D.

Il fondamentale significato di questo grafico è rappresentato dalla curva 4, in verde, nella quale si vede come lo sforzo progettuale maggiore sia nella fase iniziale, quando il processo decisionale e progettuale è maggiormente controllabile.

Questo sforzo iniziale è rappresentato non tanto da una grande mole di lavoro di progettazione vera e propria, ma bensì dallo sforzo necessario per la creazione di un protocollo di gestione della progettazione, che se correttamente implementato, consente il raggiungimento del risultato finale con un minor sforzo produttivo nelle fasi successive, quando le varianti progettuali ed economiche sono meno gestibili.

Più in generale è possibile fornire un'accezione ulteriore a questo diagramma, che si ricollega al sopracitato concetto secondo il quale l'adozione del BIM ha incontrato ostacoli in passato.

Per un qualunque studio, il passaggio dai metodi tradizionali di progettazione CAD alla metodologia BIM ha certamente significato un notevole sforzo economico e temporale, e questo ha inizialmente scoraggiato molti professionisti a intraprendere questa strada.

Chi ha riconosciuto immediatamente le ampie potenzialità del metodo e ha investito fin da subito tempo e risorse, oggi che il BIM è una realtà affermata, ha accumulato un vantaggio nei confronti della concorrenza, mentre chi ha deciso di adeguarsi ai tempi in ritardo, o perché ha ravvisato in ritardo le potenzialità del metodo, o perché seppur restio semplicemente è stato costretto dagli aggiornamenti della normativa, ora si trova nella situazione di dover cercare di colmare un gap nei confronti dei competitor di settore. Questo comporta una non attenta analisi e costruzione dei processi di gestione sui quali fondare l'attività di progettazione, e porta ad un uso sbagliato del metodo BIM, che usato scorrettamente comporta ritardi, difficoltà di esecuzione e soprattutto sfiducia nei confronti di un metodo che ha già da tempo dimostrato tutte le sue potenzialità.

1.2. Il BIM per la progettazione

La logica alla base della progettazione BIM è come detto legata alla trasversalità dell'approccio progettuale in tutte le discipline coinvolte.

Revit, uno degli innumerevoli software per la modellazione digitale parametrica, contiene nativamente una lunga serie di tools atti alla progettazione e modellazione architettonica, strutturale e impiantistica, ma, ciò nonostante, è necessario appoggiarsi a software esterni per effettuare verifiche e calcoli, ad esempio, di tipo energetico o strutturale.

Questo processo di passaggio di informazioni tra software è uno degli altri aspetti alla base del metodo BIM, dato che, quando efficacemente implementato, consente la trasposizione automatica delle informazioni da Revit al software di calcolo o simulazione e viceversa.

Il modello Revit diviene un database informativo contenente tutte le informazioni derivanti dagli studi dei professionisti coinvolti.

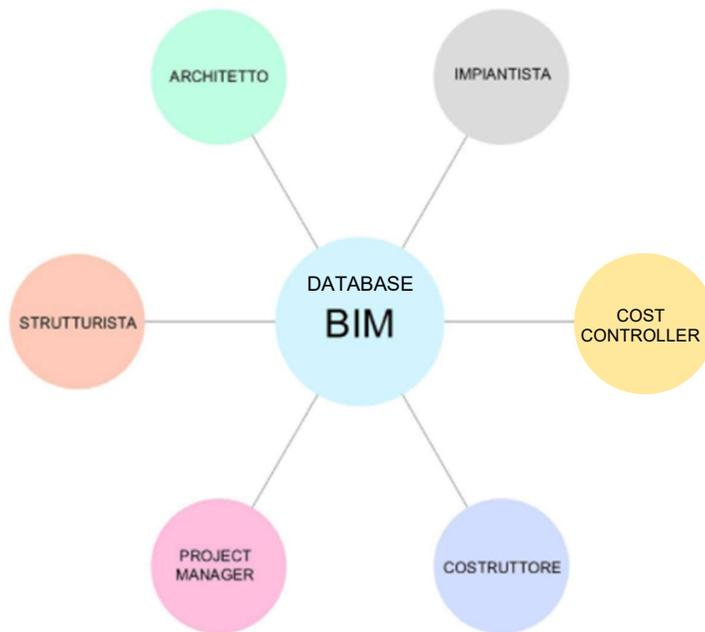


Figura 5 Il modello BIM come database

FONTE: <https://www.studioapi.it/building-information-modeling-un-nuovo-traquardo-per-studio-api/>

La possibilità e la necessità di trasferire le informazioni derivanti dallo studio di ogni disciplina coinvolta, si traducono da una parte nell’adozione di un “linguaggio” comune e quindi nella standardizzazione dei dati in ingresso e in uscita, e dall’altra in un uso accurato e consapevole del metodo.

Interfacciarsi direttamente con le altre discipline coinvolte significa necessariamente saper attuare i processi di condivisione delle informazioni in maniera corretta, diversamente si incorre in problematiche che dilatano i tempi anziché agevolare e snellire il processo progettuale.

Nel presente elaborato di tesi viene presentato un flusso di lavoro con l’intento di massimizzare lo scambio automatico di informazioni tra il comparto strutturale e quello architettonico, andando a effettuare un predimensionamento degli elementi strutturali in maniera integrata rispetto ai pacchetti architettonici, e sensibile alle eventuali variazioni progettuali del comparto architettonico stesso. Le operazioni di predimensionamento non verranno effettuate solamente sulla base delle esigenze della progettazione architettonica, ma saranno il frutto di considerazioni di natura economica ed anche di ergotecnica edile.

Fin dalle primissime fasi progettuali verranno già presi in conto aspetti, seppur solo ipotizzati, di natura realizzativa dell'opera stessa, in modo da anticipare i tempi ed ottenere un prodotto finito il più possibile gestibile e soprattutto facilmente riadattabile a varianti di progetto, come suggerito dal metodo BIM stesso.

1.3. Il BIM nel mondo strutturale

Delle varie discipline per le quali il BIM gioca un ruolo fondamentale in termini di interoperabilità e condivisione delle informazioni, il mondo strutturale è certamente quello nel quale vi sono enormi possibilità ma anche molte criticità da gestire nel modo corretto.

In generale, la modellazione strutturale proposta dai software di modellazione digitale come Revit, fornisce certamente un apporto dal punto di vista dei modelli di calcolo strutturali, ma non è certo equiparabile in termini di necessità ai modelli redatti mediante software agli elementi finiti.

Questa dicotomia tra il modello digitale strutturale creato per esempio in Revit e il modello analitico generabile da un software di calcolo strutturale comporta delle criticità sia in termini di condivisione delle informazioni, sia in termini di corretta interpretazione e utilizzo delle informazioni stesse, che è necessario risolvere al fine di portare a compimento nel modo più semplice e veloce possibile, il processo progettuale.

In questo senso sono stati implementati diversi software altamente interoperabili con i software di modellazione digitale, in grado di tradurre efficacemente un modello digitale in modello analitico e valutare le sollecitazioni che insistono sullo stesso in funzione dei parametri geometrici e materici.

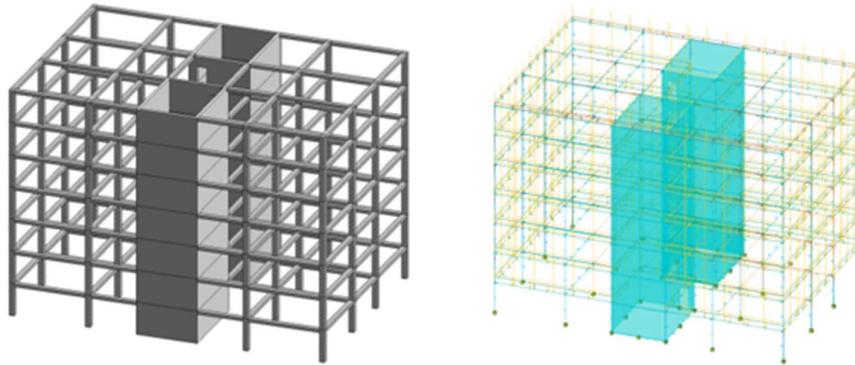


Figura 6 Dal modello digitale al modello analitico

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Da questo punto di vista, un'altra delle criticità consiste nel fatto che l'automazione dei processi progettuali sta via via sostituendo l'analisi critica del progetto da parte del progettista, anche in virtù del fatto che sicuramente deputare il calcolo strutturale al software comporta vantaggi in termini temporali e quindi anche di natura economica.

Ma questa progettazione acritica comporta spesso un output che non è frutto di considerazioni che guardano alla progettazione nel suo complesso, ma semplicemente una risposta dettata da un algoritmo in funzione dei soli parametri che l'algoritmo stesso è in grado di gestire.

Per il calcolo strutturale vengono prese in considerazione le sollecitazioni agenti, i materiali utilizzati, le norme di riferimento per l'esecuzione del calcolo, ma non altri aspetti come, ad esempio, le interferenze che l'output potrebbe provocare con le altre discipline, o considerazioni di natura economica e realizzativa dell'opera progettata.

Nel flusso di lavoro di seguito presentato, l'intento è proprio quello di generare il processo di analisi e dimensionamento degli elementi, valutando aspetti interdisciplinari e non solamente legati al mondo del calcolo strutturale, al fine di ottenere un output funzionale non solo in termini di verifica degli elementi, ma anche di adeguatezza e coerenza con le altre discipline coinvolte.

1.4. La strategia di modellazione e worksharing

Uno dei principali aspetti da valutare per approcciare al meglio l'iter di progettazione e modellazione è quello di definire il metodo di condivisione del lavoro e quindi delle informazioni.

Ad oggi esistono ancora molte realtà nelle quali la condivisione del lavoro e di informazioni avviene per scambio di files in formati eterogenei mediante mail o simili, dei quali però non è possibile tenere traccia in merito all'autore, alla data di sottomissione o alle molteplici revisioni che il file subisce.

In questo modo è facile generare errori o incomprensioni che ritardano il processo progettuale o fanno proseguire una parte di esso nella direzione sbagliata.

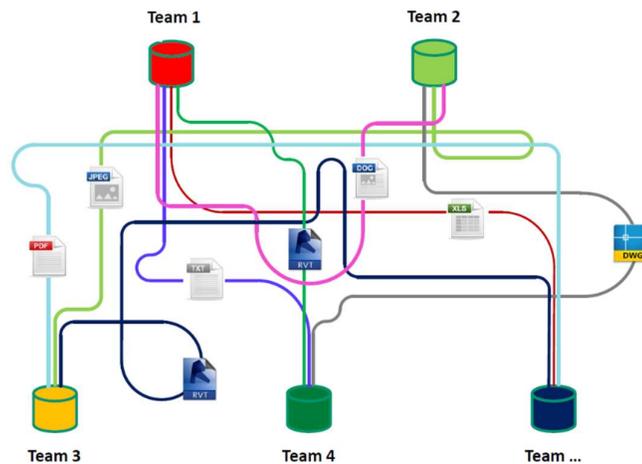


Figura 7 Condivisione delle informazioni non strutturata

FONTE: Slides del corso di BIM&InfraBIM for built heritage

Alla base del metodo BIM vi è anche la strutturazione della condivisione dei files. Ogni elemento utile a una parte o a tutto il team di progettazione deve essere inserito su di una piattaforma raggiungibile da ognuno dei progettisti.

Tale piattaforma sarà pertanto un database molto complesso e gremito di informazioni, e pertanto sarà necessario strutturare anche una codifica e delle regole per la condivisione delle informazioni sulla suddetta piattaforma.

In questo modo la condivisione di informazioni sarà strutturata e più agevole per tutto il team, e diminuirà i tempi di ricerca delle informazioni, favorendo invece il processo progettuale.

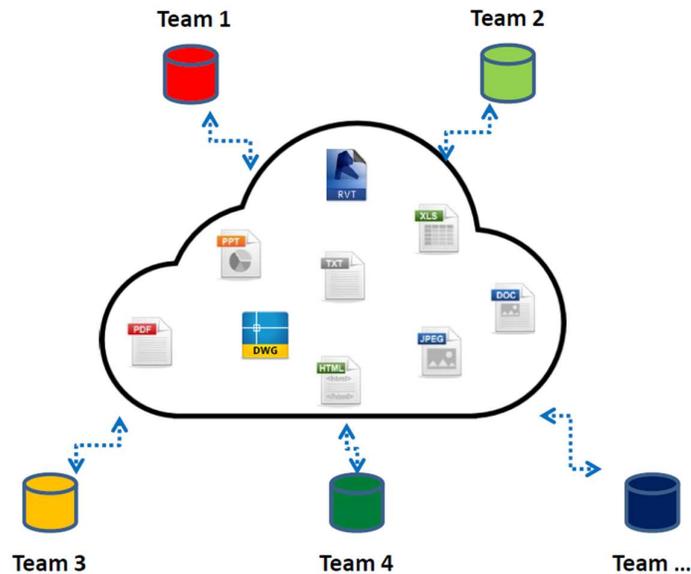


Figura 8 Condivisione delle informazioni strutturata

FONTE: Slides del corso di BIM&InfraBIM for built heritage

La standardizzazione dei files e la loro condivisione oculata è certamente un passaggio chiave che ha apportato il metodo BIM nel mondo della progettazione. Ciò nonostante, la vera rivoluzione non è tanto il metodo di condivisione delle informazioni ma il luogo dove esse vengono conservate.

Ad oggi è divenuto comune l'utilizzo di server o di spazi di archiviazione in cloud che consentano un rapido accesso a tutte le figure coinvolte, sia per consultare le informazioni che per effettuare operazioni di verifica e validazione.

Ma la vera rivoluzione che amplierebbe notevolmente le potenzialità del metodo sarebbe quella di riuscire a conservare tutte le informazioni inerenti ad un progetto all'interno del modello tridimensionale parametrico.

Come già accennato nel capitolo introduttivo, l'aspetto fondamentale del metodo BIM consiste nell'informazione e nello stoccaggio della stessa.

La facilità di accesso all'informazione desiderata condiziona favorevolmente il processo progettuale, e di conseguenza la soluzione migliore possibile è quella di rendere l'informazione il più comprensibile e facile da raggiungere possibile.

Il miglior modo per ottenere questo fondamentale risultato è quello di inserire l'informazione direttamente all'interno del modello.

Da questo punto di vista Revit offre innumerevoli possibilità e strategie di azione per associare tutte le informazioni necessarie ad un determinato elemento.

Ogni elemento generato in Revit è corredato da una serie di parametri di default che l'utente può gestire e combinare a suo piacimento per i propri scopi progettuali. In aggiunta è ovviamente possibile creare nuovi parametri di qualunque tipologia e unità di misura, o ancora associare indirizzi URL che rimandano a schede tecniche o altra documentazione rilevante.

In generale, è facile comprendere quanto siano ampie e per certi versi ancora inesplorate le potenzialità legate tanto al metodo quanto al software per la gestione della progettazione.

La condivisione dei parametri tramite il modello può essere espletata solo se viene coordinata correttamente la condivisione del modello stesso con le altre discipline.

Rendere il modello di una disciplina accessibile alle altre comporta differenti implicazioni in funzione delle quali va scelta la strategia ottimale.

In primo luogo, dalla redazione di un modello derivano considerazioni legate alla proprietà del lavoro svolto ed è pertanto necessario che sia ben chiarificato chi è l'autore di un determinato elemento. D'altro canto, è altresì importante definire le responsabilità di ogni attore, ed anche per questo motivo la creazione o la modifica di un determinato elemento deve essere univocamente imputabile al professionista che se ne è fatto carico.

Esistono principalmente due diverse metodologie di condivisione del lavoro, le quali poi possono essere riadattate o utilizzate congiuntamente a seconda delle esigenze del team di progettazione.

Il primo metodo è quello dei link, per mezzo dei quali, il modello di ognuna delle discipline può essere collegato e sovrapposto ai modelli delle altre discipline mediante un sistema di coordinate interne al software univoco e condiviso.

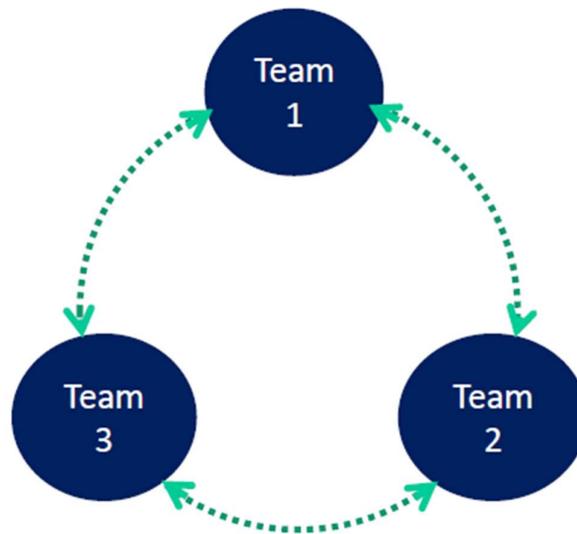


Figura 9 Schematizzazione della condivisione del lavoro mediante link

FONTE: Slides del corso di BIM&InfraBIM for built heritage

Tale sistema di riferimento può coincidere col sistema di riferimento reale del sito sul quale sorgerà o già è presente l'opera, oppure può essere un sistema di riferimento fittizio di comodo.

I modelli linkati delle altre discipline serviranno a ogni attore per visualizzare in tempo reale le decisioni progettuali delle altre discipline, e in funzione di esse adattare le proprie decisioni realizzative o segnalare incongruenze, delle quali il team potrà discutere coralmmente al fine di raggiungere la soluzione migliore.

Ogni volta che il modello di una disciplina subirà degli aggiornamenti, tutte le altre discipline saranno in grado di vederli aggiornando il link di tale modello.

I modelli linkati sono esplorabili, interrogabili ma non modificabili. In questo modo la proprietà e la responsabilità della modellazione della singola disciplina è imputabile unicamente ai progettisti della disciplina stessa.

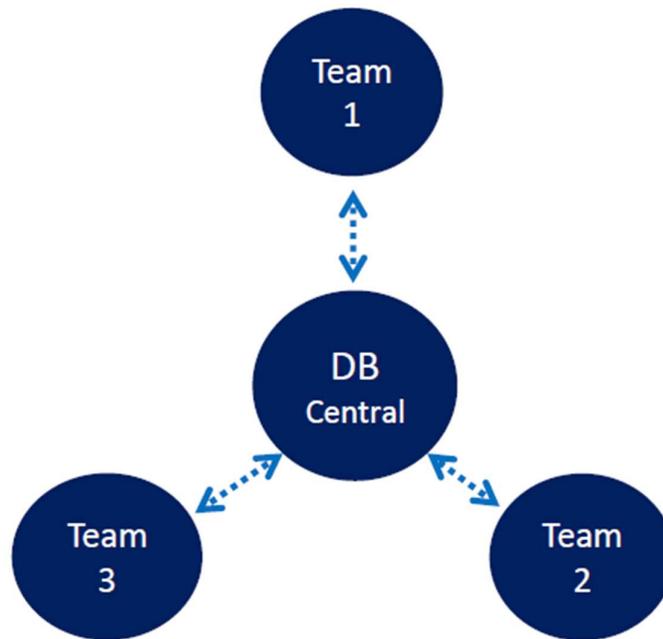


Figura 10 Schematizzazione della condivisione del lavoro mediante workset

FONTE: Slides del corso di BIM&InfraBIM for built heritage

Il secondo metodo è quello dei workset. È un metodo leggermente più complesso di quello dei link ed è nativo all'interno di Revit. Per lavorare con i workset ogni componente del gruppo di lavoro ha a disposizione una copia del modello "centrale", detto modello "locale". Sul modello locale è possibile modificare gli elementi del modello locale e poi aggiornare tali modifiche sui medesimi elementi presenti nel modello centrale. I workset sono sostanzialmente una raccolta di elementi in un progetto condiviso. Chi modifica o sostituisce elementi presenti all'interno di un workset ne diviene provvisoriamente proprietario, e sarà l'unico attore in grado di modificare gli elementi all'interno di quel workset. Una volta terminate le modifiche dovrà rilasciare la proprietà del workset, in modo che anche gli altri attori del processo di modellazione possano lavorare ad elementi contenuti in quel workset.

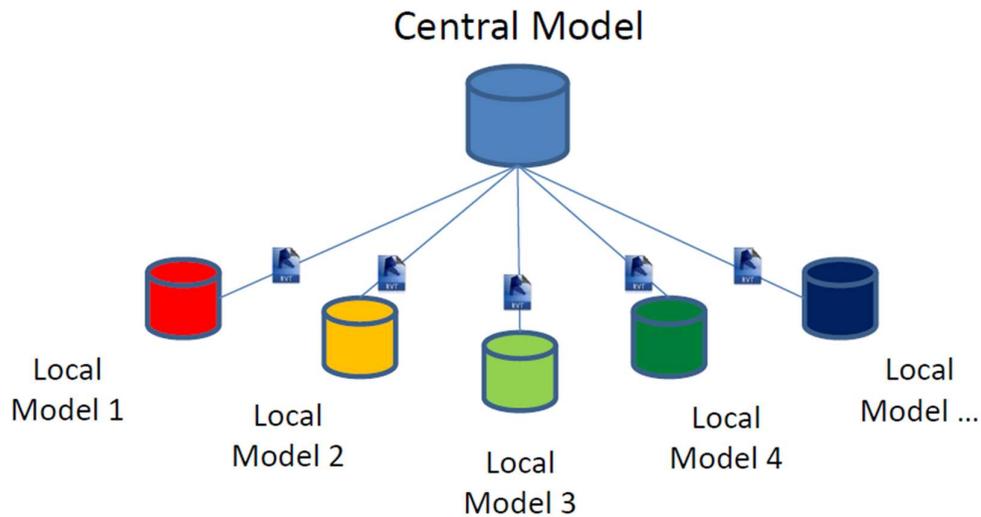


Figura 11 Modelli locali e modello centrale

FONTE: Slides del corso di BIM&InfraBIM for built heritage

In linea di principio l'utilizzo dei workset è consigliabile quando due o più professionisti lavorano sullo stesso modello, ad esempio il modello di disciplina. Per quanto concerne invece le interazioni tra i modelli delle diverse discipline, è consigliabile ricorrere al metodo dei link, perché in questo modo il modello di disciplina non sarà modificabile ma solo visualizzabile dalle altre discipline, e non verranno a crearsi interferenze di utilizzo degli elementi tra più discipline.

Il metodo di worksharing ideale infatti è un sistema definito ibrido che sfrutta quindi i vantaggi della semplicità del metodo dei link per le interazioni fra discipline, e la maggiore accuratezza del metodo dei workset per ogni singolo modello di disciplina.

Così facendo tramite i link ogni disciplina è in grado di valutare puntualmente interferenze e variazioni progettuali in funzione di tutte le altre discipline coinvolte. Allo stesso modo, sempre mediante i link, è possibile redigere un modello di coordinamento, allo scopo di effettuare analisi globali di interferenza tra le discipline con cadenza periodica.

La definizione del metodo di worksharing, del metodo di visualizzazione e interfaccia con le altre discipline, nonché gli aspetti legati alla cadenza con la quale vengono effettuate revisioni e analisi di coordinamento, sono tutti elementi che derivano dalla sopracitata standardizzazione del processo BIM. Tantopiù il processo è lineare, semplice e soprattutto condiviso e maggiori sono i risultati in termini di rapidità e correttezza del lavoro svolto.

1.5. Interazione tra modello architettonico e strutturale

Nel presente capitolo verrà descritto come è possibile operare per integrare il più possibile il modello strutturale con quello architettonico e viceversa, andando a definire all'interno dell'ambiente di modellazione dei vincoli tra le componenti architettoniche e quelle strutturali, in modo da rendere il modello architettonico suscettibile delle modifiche apportate al modello strutturale.

Il modello architettonico viene redatto con il modello strutturale già collegato a fare da guida per la modellazione.

Sul modello architettonico viene modellata solo la componente architettonica del pacchetto del solaio di interpiano, la quale, se correttamente modellata deve interrompersi, ad esempio, in presenza di un pilastro.

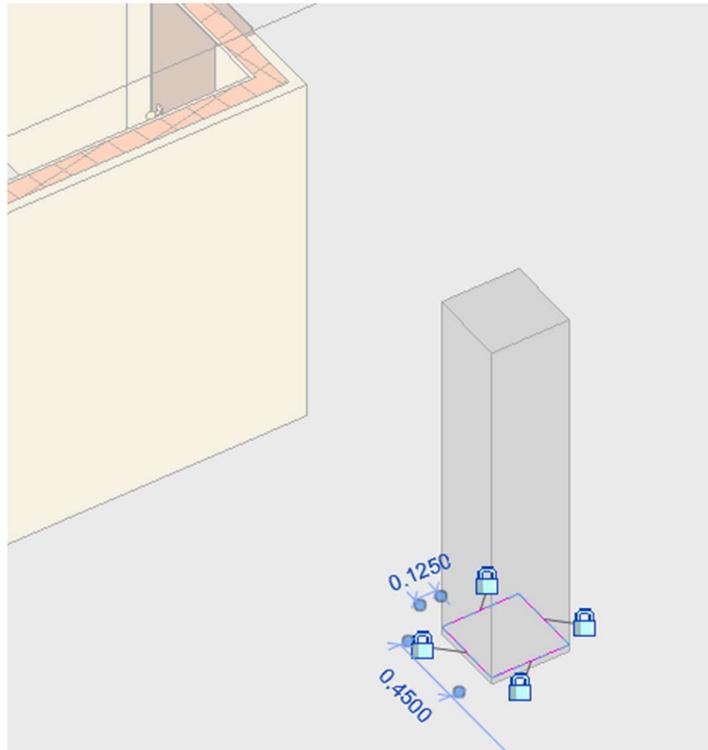


Figura 12 Creazione di foro pavimento vincolato a pilastro

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Questo processo è ottenibile vincolando il profilo di estrusione del pavimento agli elementi pilastro presenti sul modello linkato.

Con questo semplice accorgimento i pavimenti del modello architettonico sono suscettibili di modifiche di sezioni che potrebbero avvenire nei pilastri.

Questo passaggio viene effettuato nelle primissime fasi della modellazione architettonica e il suo scopo incarna perfettamente quanto descritto nella sopracitata curva di Mc Leamy in quanto, i passaggi qui descritti sono effettivamente dispendiosi in termini di tempo di modellazione ma sono necessari al fine di gestire al meglio aspetti di varia natura nelle fasi successive della modellazione e progettazione.

Il fatto che il modello architettonico si adatti automaticamente a quello strutturale non è cosa da poco. Le eventuali modifiche sul modello strutturale, come ad esempio la variazione della sezione del pilastro in figura 11, non comporteranno altro lavoro per chi si occupa della modellazione architettonica, perché sarà il software ad aggiornare il modello architettonico automaticamente.

Quindi un dispendio iniziale in termini di tempo comporta un grande vantaggio, dato che non è possibile sapere a priori quante volte verrà modificato il modello strutturale durante la progettazione.

Questo processo non si riflette unicamente sui tempi di correzione del modello, ma anche sulla possibilità di computare e gestire i costi di realizzazione dell'opera.

Le quantità presenti negli abachi sono molto precise se la modellazione degli elementi è precisa come qui descritto. In aggiunta, il fatto che le quantità presenti negli abachi ovviamente si aggiornino di conseguenza agli aggiornamenti del modello architettonico, consente una computazione dei materiali, e quindi dei costi, più efficace e precisa.

1.6. Il LOD e le sue implicazioni al caso studio

L'acronimo LOD sta per "Level Of Development" o, in italiano, "Livello di sviluppo".

In estrema sintesi il LOD può essere visto come una scala che misura il livello di definizione, in termini sia di accuratezza nella modellazione, sia di precisione e quantità di informazioni contenute, per un determinato oggetto.

Il LOD è un aspetto fondamentale relativamente alla metodologia BIM, perché ad esso sono associate innumerevoli considerazioni preliminari legate alla strategia di modellazione di un progetto.

Definire il LOD richiesto per un determinato progetto significa intrinsecamente definire gli obiettivi progettuali e di sviluppo, sin dalle fasi preliminari.

Il livello di sviluppo è valutato in funzione del livello di dettaglio, il quale descrive sinteticamente ma esaustivamente un singolo oggetto in funzione della fase progettuale o manutentiva nella quale ci si trova.

Il livello di dettaglio è valutato in funzione di scale normate, leggermente diverse di paese in paese, ma comunque molto simili tra loro.

LoD USA	LoD UK	LoD Ita
LOD 100 - Concept	LOD 1 - Preparation and Brief	LOD A - oggetto SIMBOLICO
LOD 200 - Design Development	LOD 2 - Concept	LOD B - oggetto GENERICO
LOD 300 - Documentation	LOD 3 - Developed Design	LOD C - oggetto DEFINITO
LOD 350 - Construction	LOD 4 - Technical Design	LOD D - oggetto DETTAGLIATO
LOD 400 - Construction	LOD 5 - Construction	LOD E - oggetto SPECIFICO
LOD 400 - Construction	LOD 6 - Handover	LOD F - oggetto ESEGUITO
LOD 500 - Facilities	LOD 7 - Mantainance	LOD G - oggetto AGGIORNATO

Figura 13 Scale di classificazione del LOD in diversi paesi

FONTE: <https://4mgroup.it/blog/i-lod-del-bim-spiegati-bene>

In generale, è possibile definire il LOD come somma di due componenti dette LOG e LOI.

Il primo identifica il livello di dettaglio di un elemento dal punto di vista grafico, mentre il secondo dal punto di vista della quantità e qualità delle informazioni contenute in un determinato oggetto modellato.

L'unione di LOG e LOI permette di definire un determinato livello di dettaglio per un singolo elemento. Il livello di dettaglio in generale raggiunto per tutti gli elementi di una data disciplina all'interno del modello concorre a determinare il livello di sviluppo raggiunto per tale disciplina progettuale.

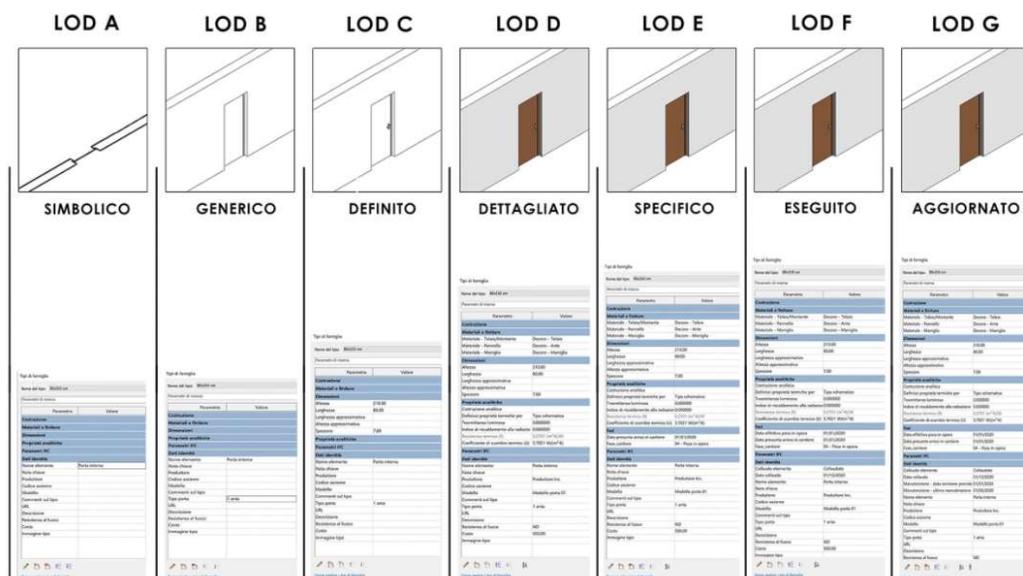


Figura 14 Descrizione dei LOD secondo la normativa italiana

FONTE: <https://4mgroupp.it/blog/i-lod-del-bim-spiegati-bene>

Nell'immagine soprastante è sinteticamente riportato un esempio interpretativo dei diversi LOD raggiungibili per un singolo elemento, in questo caso una porta.

Generalmente, il livello di sviluppo necessario per una data disciplina all'interno di una commessa di progettazione viene sancito all'interno del capitolato informativo e del BEP (BIM execution plan) dal BIM manager, e accettato o revisionato dalla stazione appaltante.

La definizione in fase preliminare del LOD, come detto, inciderà pertanto fondamentalmente sull'iter progettuale e di modellazione.

In generale, il LOI viene sviluppato maggiormente durante le fasi iniziali della progettazione, associando parametri testuali o numerici agli oggetti modellati in maniera ancora preliminare, al fine di generare un flusso informativo condiviso sulla base del quale effettuare le successive scelte progettuali.

Il LOG invece, viene generalmente sviluppato a livelli maggiori quando le scelte progettuali relative ad un determinato elemento sono state validate. Il motivo è che la modellazione ad un alto livello di dettaglio grafico è molto onerosa ed è pertanto da effettuarsi quando si è sicuri della scelta presa, al fine di non sprecare risorse su di un elemento che potrebbe poi essere modificato.

In generale poi, non ha senso approfondire la modellazione, e quindi il LOG di un elemento, mentre il resto del progetto rimane ad un livello inferiore, perché il successivo riadeguamento al livello di dettaglio richiesto per il resto del progetto, potrebbe facilmente provocare interferenze spaziali e quindi la modifica dell'elemento precedentemente modellato.

Relativamente all'iter progettuale presentato nel presente elaborato di tesi, ipotizzando di trovarsi in una fase progettuale embrionale e dovendo effettuare il predimensionamento del comparto strutturale, si è scelto di arricchire quanto più possibile il modello di informazioni e sviluppare quindi il LOI degli elementi strutturali, mantenendo il LOG al livello richiesto in fase preliminare, e cioè la corretta definizione spaziale e volumetrica degli elementi, così che le altre discipline siano in grado di adeguarsi e utilizzare come guida il modello strutturale redatto.

Di recente al concetto di LOD è stato affiancato il concetto di LOIN. Se il LOD definisce in maniera globale la qualità e la precisione raggiunte allo stato dell'arte del modello, il LOIN definisce invece il livello di dettaglio necessario.

I LOIN sono definiti all'interno della UNI EN ISO 19650 e definiscono il quadro esigenziale in termini di livello di dettaglio per un dato appalto.

Pertanto, se prima il LOD era sostanzialmente una scala mediante la quale valutare il livello di dettaglio raggiunto e quello prospettato a termine del progetto, il LOIN nasce con un approccio ben diverso: il livello di dettaglio è richiesto per ogni specifica categoria dal committente.

Il risvolto pratico legato a questo cambiamento sta nel fatto che la strategia di modellazione è nettamente vincolata al livello di dettaglio richiesto, e quindi necessariamente molto più settorializzata.

1.7. Il Computational Design e la programmazione visuale

La programmazione visuale è uno strumento oggi giorno integrato all'interno dei software di modellazione digitale BIM, mediante la quale è possibile generare algoritmi volti all'automazione e all'espletamento di operazioni ricorsive e dispendiose in termini temporali.

“In estrema sintesi, si può dire che questa particolare disciplina fonde il tradizionale approccio creativo e funzionale del design con un approccio matematico fondato su algoritmi utilizzati dalla computazione per tradurre il primo in termini di calcolo.

Compito della computazione, in particolare, è tradurre la complessità in informazioni elementari e dati, che vengono utilizzati da specifici algoritmi per offrire soluzioni al tema progettuale di partenza.”

Cit. "BIM e Computational Design: progettazione tramite algoritmi"

FONTE: <https://www.01building.it/bim/bim-computational-design-progettazione-algoritmi/>

Invece di utilizzare passivamente gli strumenti di calcolo e modellazione offerti dai più comuni software, il computational design offre la possibilità di appoggiarsi alla potenza di calcolo del computer per espletare algoritmi che sono totalmente ideati dal progettista, al fine di espletare un particolare processo che egli ritenga necessario.

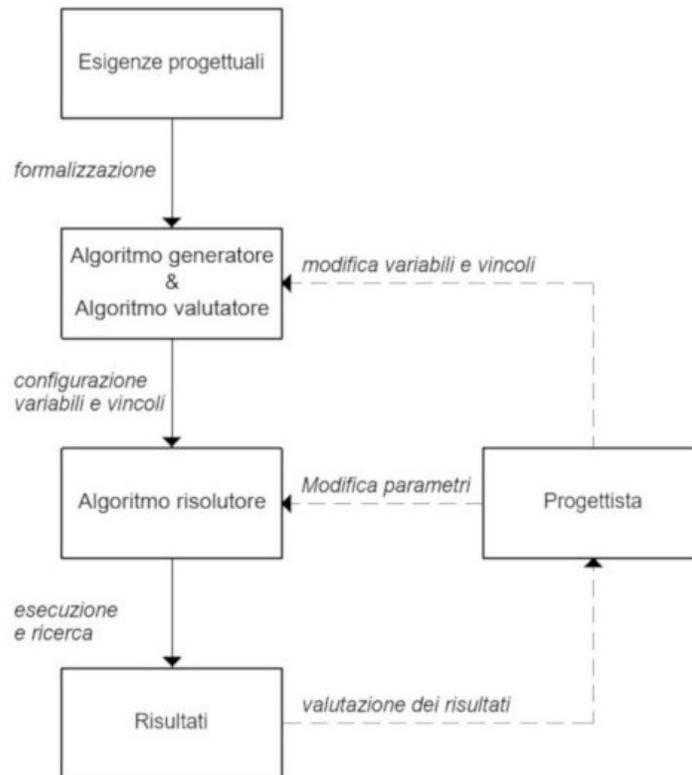


Figura 15 Schema tipo di un algoritmo computazionale

FONTE: <https://www.ingenio-web.it/25592-il-generative-design-nella-progettazione-bim-e-gli-strumenti-per-metterlo-in-pratica>

In generale, uno script generato tramite Dynamo, il software di programmazione visuale di Revit, è composto di diverse parti, ognuna delle quali con un preciso compito.

Nella prima parte vengono definite e formalizzate le esigenze progettuali, definite come costanti o come variabili gestibili dall'utente. In funzione di queste variabili viene definito un algoritmo generatore, che ha il compito di espletare le richieste introdotte dal progettista, in funzione delle costanti e variabili denunciate. Una volta definito l'output, l'algoritmo valutatore verifica la rispondenza dell'output calcolato in funzione di parametri definiti anch'essi da utente.

Per fare un esempio, si immagini di definire i parametri di resistenza del calcestruzzo e dell'acciaio per armatura di un pilastro in calcestruzzo armato, nonché la sollecitazione cui esso è soggetto.

L'algoritmo generatore potrebbe dimensionare tale elemento in funzione delle costanti denunciate a priori.

Una volta generato l'output l'algoritmo valutatore verificherà la corretta rispondenza a limiti imposti dal progettista, come ad esempio il fatto che il lato di base del pilastro non sia inferiore ai 25 cm.

In caso di esito negativo il processo verrà reiterato inserendo costanti differenti al fine di ottenere un output idoneo.

L'ultimo step, quello rappresentato dall'algoritmo risolutore, fornirà all'utente l'output corretto, mediante ad esempio un messaggio che esplicita quanto dedotto dall'algoritmo generatore, oppure ancora un aggiornamento automatico dell'elemento sul modello.

La sinergia tra il computational design e la progettazione con metodologia BIM può fornire ottimi risultati in termini di ottimizzazione del processo decisionale e progettuale.

1.8. Definizione degli obiettivi

Il presente elaborato di tesi ha come primo scopo quello di definire le potenzialità e i vantaggi derivanti dall'applicazione di un approccio BIM integrato per la generazione della modellazione strutturale e analitica.

In secondo luogo, mediante l'ausilio del computational design, si vuole mostrare come l'applicazione di un protocollo interamente gestito mediante la programmazione visuale, possa essere utile per la generazione di un sistema di supporto decisionale per la valutazione speditiva di diverse configurazioni strutturali per delle strutture a telaio in calcestruzzo armato.

In aggiunta, sempre mediante il computational design, si intende mostrare come, l'applicazione di tali protocolli, possa rivelarsi utile al fine di gestire tutti gli aspetti della progettazione, dal management delle interferenze con altre discipline a quello dei costi, durante le primissime fasi progettuali, anticipando i tempi e generando una soluzione progettuale il più idonea possibile, in breve tempo.

2. La modellazione analitica e l'analisi strutturale

“Essere in grado di costruire la parte analitica del progetto in parallelo con la sua modellazione è innegabilmente una risorsa utile. Questo aspetto migliora la produttività durante le diverse fasi di studio, facilitando gli scambi tra l'ingegnere e il disegnatore”.

Cit. Revit per il BIM, pag. 425

La modellazione analitica congiunta a quella materica rappresenta certamente un vantaggio in termini di risorse temporali per i professionisti. Ciò nonostante, il modello analitico generato dai software di modellazione è tutt'altro che perfetto. Per certi versi questo aspetto non è da vedersi come un totale svantaggio, dato che, la progettazione strutturale di un edificio necessita considerazioni e attenzioni che è corretto siano demandate ad una attenta analisi del professionista, e non al semplice output di un algoritmo di modellazione.

2.1. Generazione del modello analitico

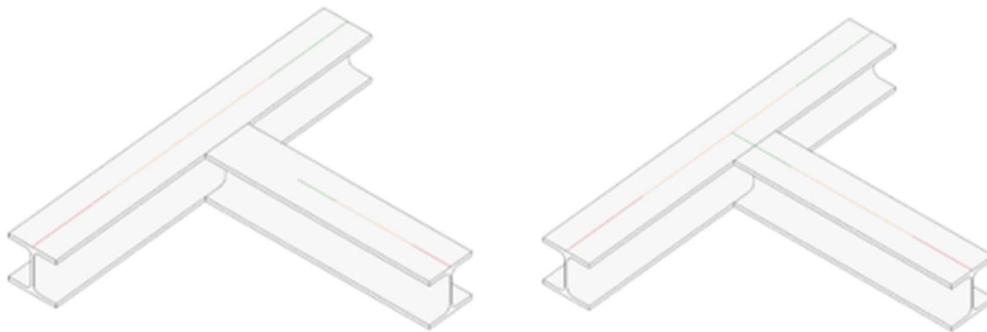


Figura 16 Corretta modellazione di un giunto trave-trave

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Nell'immagine soprastante si mostra come l'intersezione tra due travi apparentemente identica dal punto di vista della modellazione digitale presentino invece una differenza sostanziale.

Nel primo caso le bacchette analitiche delle due travi non sono tra di loro connesse.

Questo significa che il software di analisi strutturale sul quale sarà esportato il modello, indipendentemente da quale esso sia, fornirà un'analisi nella quale il comportamento del giunto strutturale non è quello corretto.

Altri errori simili e spesso commessi sono l'intersezione tra le barre analitiche, oppure la modellazione delle barre su due livelli differenti, ed in tutti i casi forniscono approssimazioni errate da parte del software di calcolo.

In generale, si tratta di errori puntuali semplici da correggere e facilmente evitabili, ma se l'errore puntuale si propaga assieme ad altri su più nodi, all'interno di un modello complesso, la correzione del modello analitico può diventare anche più dispendiosa che non la sua generazione da zero.

All'interno di Revit è dunque possibile, con le dovute accortezze, generare un modello di calcolo corretto in ogni sua parte, facilmente rettificabile in caso di variazioni progettuali o più semplicemente errori, ed esportabile verso un software sul quale eseguire l'analisi strutturale.

In merito a quanto già sottolineato nel capitolo precedente, il miglior modo di approcciarsi alla modellazione strutturale è certamente quello di cercare di inserire tutti i dati progettuali direttamente all'interno del modello Revit, in modo da contenere tutte le informazioni all'interno del modello, demandando il meno possibile operazioni di post processing ad altri software esterni.

Sono innumerevoli le operazioni necessarie per ottenere un modello analitico corretto e, come detto, è necessario scegliere con quale strategia effettuare tali operazioni. Svolgerle al di fuori del modello Revit significa necessariamente perdere una parte di informazioni progettuali, o doverle ripetere in caso di modifiche.

Se ad esempio, più travi convergono in un pilastro ortogonalmente e senza nessun tipo di disallineamento, il modello analitico creato automaticamente da Revit sarà effettivamente corretto dato che rappresenterà l'effettiva disposizione analitica dei vari elementi.

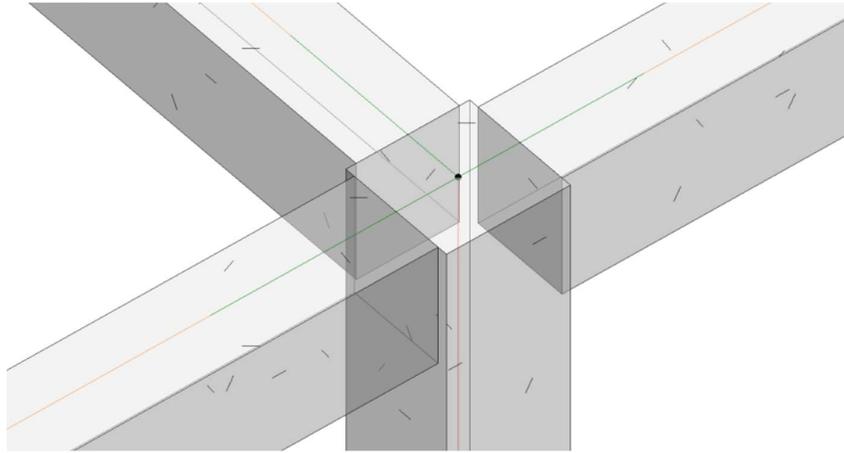


Figura 17 Modello analitico di un nodo trave-pilastro

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Il nodo, rappresentato dal pallino nero in figura, determina l'unione analitica tra gli elementi rappresentati. Il software di calcolo interpreta il comportamento strutturale del nodo analitico, e valuta la propagazione degli sforzi e delle sollecitazioni.

2.1.1. I vincoli interni

I nodi generati automaticamente da Revit sono analiticamente considerati come degli incastri, con tutte le considerazioni progettuali che ne derivano.

Nel caso in cui, ad esempio, una o più travi convergano su di un pilastro disallineate rispetto al centro del pilastro, la rappresentazione analitica offerta di default dal software sarà affetta da errore.

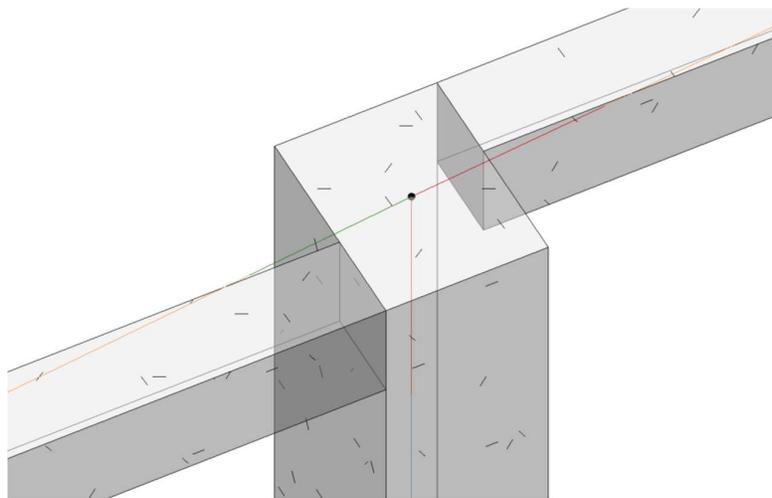


Figura 18 Modello analitico standard di un nodo trave disallineata-pilastro

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

In questo caso si nota come l'approssimazione analitica nel nodo sia effettivamente scorretta, dato che la bacchetta analitica che rappresenta la trave non si congiunge col pilastro né nella posizione corretta, né tantomeno con la giusta angolazione.

Per risolvere tale problema è necessario agire sul singolo elemento per settare il collegamento analitico in maniera corretta.

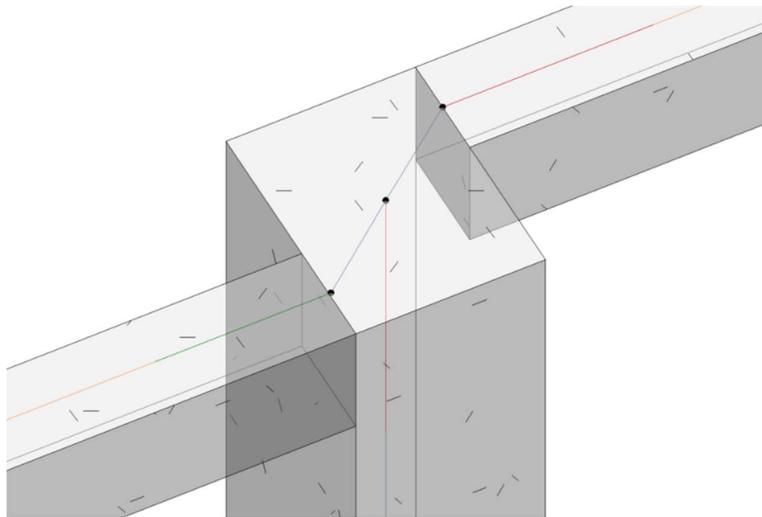


Figura 19 Modello analitico corretto di un nodo trave disallineata-pilastro

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

I collegamenti analitici sono una famiglia di sistema, le cui proprietà di tipo definiscono il loro comportamento per l'analisi strutturale.

Sono elementi in funzione dei quali la rigidezza strutturale e la propagazione della sollecitazione vengono calcolate secondo le esigenze del progettista.

A differenza delle barre analitiche degli elementi strutturali, i collegamenti hanno unicamente il compito di approssimare correttamente il comportamento della struttura, quindi non sono dotati di rigidezza intrinseca e non concorrono a sopportare i carichi agenti sulla struttura.

Come detto in precedenza, i nodi generati di default dal software vengono interpretati come incastri, ma non è detto che questo sia il comportamento che il progettista desidera per il suddetto nodo.

Per questo motivo è possibile agire sui parametri di tipo del nodo analitico per far sì che tale nodo sia interpretato ad esempio come cerniera e non come incastro.

Famiglia:

Tipo:

Parametri tipo

Parametro	Valore	
Dati identità ^		
Immagine tipo		
Commenti sul tipo		
Descrizione		
Contrassegno tipo		
Traslazione in ^		
Traslazione X	Fisso	
Traslazione Y	Fisso	
Traslazione Z	Fisso	
Rotazione intorno a ^		
Rotazione X	Rilasciato	
Rotazione Y	Rilasciato	
Rotazione Z	<input type="text" value="Rilasciato"/>	

Figura 20 *Settaggio dei parametri di rilascio di un nodo analitico*

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Nella figura soprastante viene mostrata l'interfaccia di gestione dei rilasci di un nodo. In questo caso il nodo è stato settato in modo da comportarsi come cerniera.

Come detto, il collegamento analitico è una famiglia di sistema di Revit, e i parametri legati ai rilasci, sia per quanto riguarda la traslazione che per quanto concerne la rotazione, sono parametri di tipo. Questo significa che per generare un nuovo tipo di collegamento è necessario duplicare un tipo esistente e applicare le modifiche desiderate.

Sebbene possa sembrare un processo dispendioso, la creazione di famiglie e tipi standardizzati che siano versatili e quindi riutilizzabili in diversi progetti, fa parte del lavoro preliminare di standardizzazione e generazione di un template discusso all'interno del capitolo introduttivo.

In generale sono molteplici le motivazioni per le quali è necessario agire sui rilasci. In primis, per la redazione di un modello analitico corretto, ma anche perché, ad esempio, è volontà del progettista approssimare in maniera diversa il comportamento di una struttura.

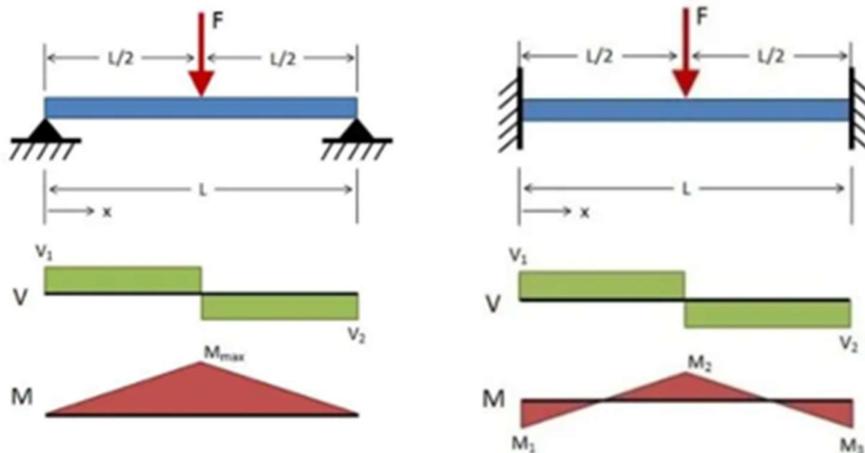


Figura 21 Momento massimo per trave appoggiata e incastrata

FONTE: <https://www.nunziogrieco.it/calcolo-freccia-trave-appoggiata/>

Ad esempio, potrebbe risultare opportuno modellare una trave come appoggiata anziché incastrata al fine di massimizzare il momento in mezzeria e progettare la sezione della trave suddetta con un maggiore margine di sicurezza.

2.1.2. I vincoli esterni

Ogni struttura, semplice o complessa che essa sia, deve essere valutata dal punto di vista delle reazioni vincolari che scaturiscono quando essa viene caricata.

In generale i vincoli sono di duplice natura: quelli interni, che concorrono alla continuità strutturale tra due membri contigui, e quelli esterni, che possono essere descritti come punti terminali di una struttura, o di una parte di essa.

Oltre a redigere il modello e analizzare correttamente come si desidera che ogni nodo analitico si comporti, è necessario definire anche i vincoli esterni.

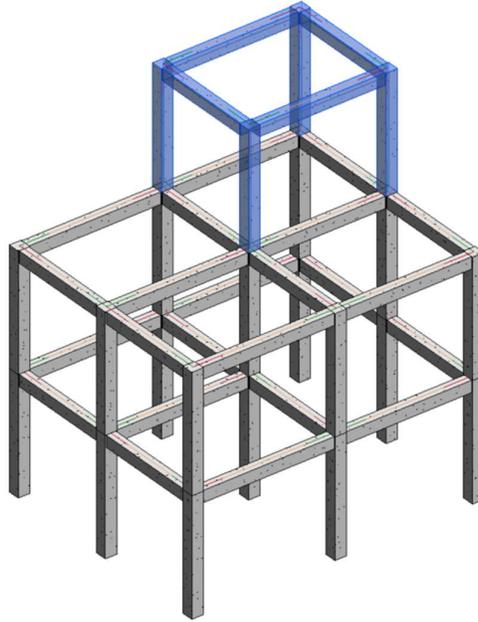


Figura 22 Struttura in c.a. di esempio

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Si prenda ad esempio la struttura in calcestruzzo armato raffigurata sopra. Si supponga che la parte evidenziata della struttura costituisca un ampliamento in fase di progetto, mentre la parte non evidenziata sia la struttura esistente. Le strategie di modellazione sono diverse e tutte valide, e scegliere la migliore è compito del progettista.

Modellando per intero la struttura, l'intersezione tra i nuovi pilastri e le travi esistenti può essere gestita attraverso un collegamento analitico, corrispondente a un vincolo interno. La struttura verrà nuovamente analizzata per intero con in aggiunta l'ampliamento e verranno di seguito espletate tutte le procedure progettuali del caso.

Il secondo metodo è quello di valutare separatamente le due strutture. Il secondo caso qui descritto, ad esempio, è molto usuale per il progetto delle strutture di fondazione.

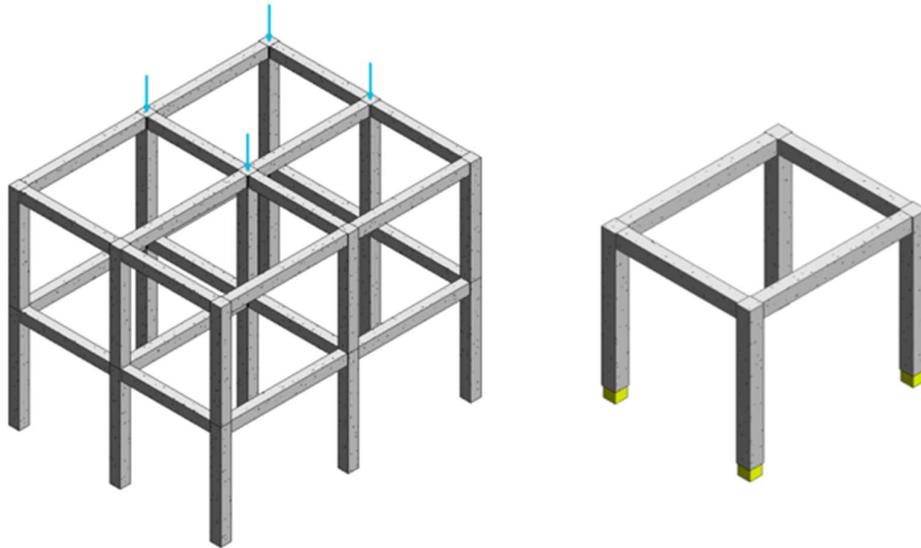


Figura 23 Strutture in c.a. valutate separatamente

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Il telaio della nuova struttura viene modellato separatamente e corredato da vincoli esterni, raffigurati con dei cubi gialli nell'immagine soprastante.

L'analisi strutturale produrrà in output le sollecitazioni agenti sugli elementi strutturali, in funzione delle quali essi saranno correttamente dimensionati.

Inoltre, verranno calcolate le reazioni vincolari ai nodi esterni applicati e dipenderanno ovviamente dal tipo di vincolo che il progettista ha imposto, sia esso un incastro, una cerniera, un carrello o altro.

Applicando puntualmente le reazioni vincolari calcolate sulla nuova struttura a quella esistente, così come si può vedere nella figura soprastante, si otterrà il medesimo comportamento strutturale valutato considerando l'intera struttura congiuntamente.

Chiaramente non esiste una strategia di modellazione corretta in assoluto, ma certamente esiste una strategia migliore di altre in funzione del caso oggetto dell'analisi e di tutte le sue condizioni al contorno.

Quanto fin ora descritto è meramente esplicativo e ha il solo scopo di fornire una panoramica delle diverse alternative possibili.

La modellazione dei vincoli esterni è importante tanto quanto quella dei vincoli interni per l'ottenimento di un prodotto finale soddisfacente.

All'interno di Revit è possibile definire i vincoli esterni mediante famiglie di sistema apposite.

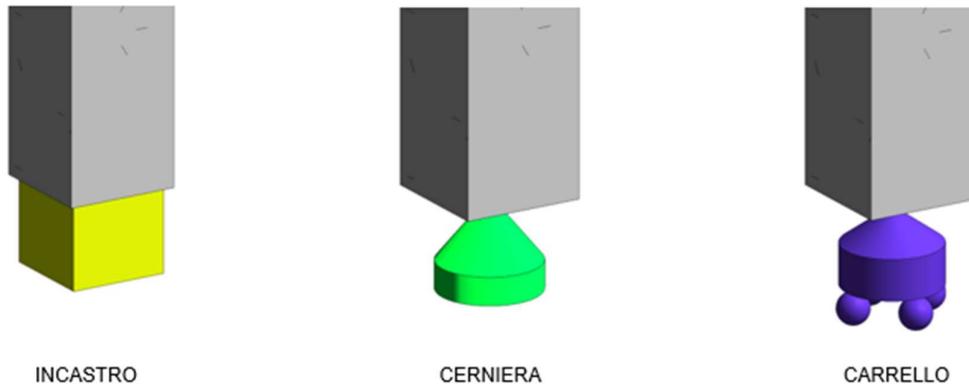


Figura 24 Rappresentazione grafica delle principali tipologie di vincolo

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Quelle rappresentate in figura sono le più comuni tipologie di vincolo, nonché le uniche presenti di default all'interno del template di Revit.

La tipologia di vincolo esterno si gestisce esattamente come i vincoli analitici, presentati in precedenza, andando a settare come desiderato i rilasci del vincolo. Per le famiglie di sistema i parametri dei rilasci appaiono come *read only*, vale a dire che non sono modificabili dall'utente, e gli unici parametri settabili sono il tipo di vincolo e l'orientamento dello stesso (in funzione dell'orientamento i rilasci agiscono nella direzione desiderata, sia per quanto riguarda gli spostamenti che per le rotazioni).

Vincoli esterni (1) Modifica tipo	
Analisi strutturale	
Orienta su	Progetto
Tipo di vincoli esterni	Punto
Stato	Cerniera
Traslazione in	
Traslazione X	Incastro
Traslazione Y	Incastro
Traslazione Z	Incastro
Rotazione intorno a	
Rotazione X	Rilascio
Rotazione Y	Rilascio
Rotazione Z	Rilascio

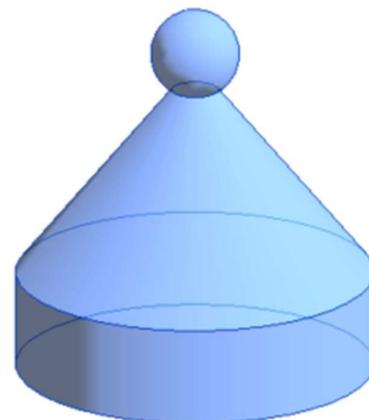


Figura 25 Parametri di una famiglia vincoli esterni

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

In aggiunta alle più comuni tipologie di vincolo esterno è chiaramente possibile definirne di nuove da utente.

Oltre a poter definire quali rilasci bloccare e quali consentire, è possibile assegnare una rigidezza ad ogni rilascio, in modo da modellare vincoli cedevoli, vale a dire vincoli non perfettamente rigidi che sono in grado di sopportare la sollecitazione consentendo uno spostamento o una rotazione proporzionali alla sollecitazione stessa e alla rigidezza impostata sul vincolo.

Vincoli esterni (1) Modifica tipo	
Analisi strutturale	
Orienta su	Progetto
Tipo di vincoli esterni	Punto
Stato	Definito dall'utente
Traslazione in	
Traslazione X	Rilascio
Traslazione Y	Rilascio
Traslazione Z	Rigidezza
Modulo di rigidezza Z	1.00 kN/m
Rotazione intorno a	
Rotazione X	Rilascio
Rotazione Y	Rilascio
Rotazione Z	Rilascio

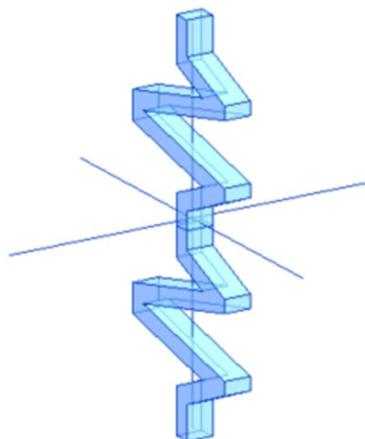


Figura 26 Vincolo esterno definito da utente

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Quando si imposta un vincolo eterno come definito dall'utente tutti i parametri legati ai rilasci del vincolo divengono parametri di istanza, pertanto sarà necessario copiare manualmente il vincolo creato attraverso il comando "copia istanza" in ogni nodo dove esso è necessario.

Di conseguenza, non sarà possibile modificare un altro vincolo esterno attraverso il comando "copia proprietà del tipo" dato che, come detto, tutte le proprietà legate ai rilasci sono proprietà di istanza.

Questo è chiaramente un limite alla produttività, dato che non consente un rapido settaggio globale di vincoli non standardizzati, ed inoltre facilita il generarsi di errori dovendo impostare manualmente i parametri dei vincoli non canonici.

Le tipologie di vincolo non variano solamente in funzione dei rilasci coinvolti ma anche in funzione della loro tipologia spaziale.

È chiaramente possibile creare vincoli puntuali, ad esempio per la base di un pilastro, o vincoli lineari ad esempio per un muro strutturale.

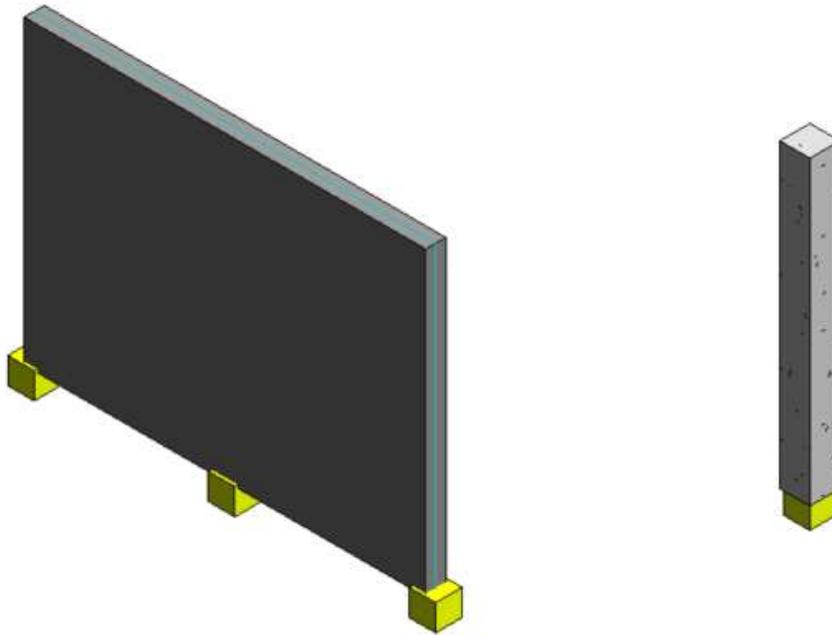


Figura 27 Vincolo incastro per muro e pilastro strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

La terza ed ultima tipologia di vincolo è quella basata su superficie, utile ad esempio per modellare il comportamento del terreno sul quale poggiano le fondazioni.

Si può ricorrere ad un vincolo cedevole per idealizzare il coefficiente di Winkler del terreno ad interfaccia con la fondazione.

2.1.3. Strumenti di revisione del modello analitico

La redazione del modello analitico, in funzione di tutte le considerazioni appena descritte, può risultare complessa e quindi facilmente affetta da errore.

Per questo motivo esistono nativamente all'interno di Revit degli strumenti atti a controllare il modello generato e trovare automaticamente errori.

The image shows a screenshot of the 'Controlli automatici' (Automatic Controls) dialog box in Revit. It is organized into several sections:

- Controlli automatici:** Contains two checkboxes: 'Supporti degli elementi' (unchecked) and 'Omogeneità modello analitico/fisico' (unchecked).
- Tolleranze:** Contains four input fields for tolerance values:
 - 'Distanza supporto:': 30.00
 - 'Rilevamento automatico modello analitico -': 30.00
 - 'Distanza tra modello analitico e fisico:': 15.00
 - 'Rilevamento automatico modello analitico - Verticale:': 30.00
 - 'Rilevamento automatico collegamento analitico:': 30.00
- Verifica supporti elementi:** Contains one checked checkbox: 'Riferimenti circolari'.
- Verifica omogeneità modello analitico/fisico:** Contains six checkboxes:
 - 'Connettività modello analitico' (checked)
 - 'Distanziamento di rettifica modello analitico dalla posizione di default' (checked)
 - 'Verifica sovrapposizione trave analitica e pavimento' (checked)
 - 'Probabile instabilità in base alle condizioni di rilascio' (checked)
 - 'Modello analitico esterno al modello fisico' (checked)
 - 'Materiale fisico valido' (unchecked)
- Visibilità modello analitico:** Contains one checked checkbox: 'Distingui le estremità dei modelli analitici lineari'.

Figura 28 Strumenti di revisione del modello analitico

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Nella figura precedente sono rappresentate le impostazioni di default in funzione delle quali Revit può eseguire un check sulla correttezza del modello analitico.

Nella fattispecie è possibile eseguire un controllo dei vincoli, e quindi verificare l'assenza di labilità, ed un controllo di congruenza tra il modello analitico e quello fisico.

In ogni caso l'output dell'analisi necessita certamente un'interpretazione critica. Il software non è in grado di discernere tra una labilità derivante da un errore ed una derivante da un'esigenza progettuale.

Risulta però utile al fine di prevenire o correggere errori di allineamento del modello analitico come quelli presentati a inizio capitolo.

2.2. Analisi e applicazione dei carichi

Una volta correttamente redatto il modello analitico, indipendentemente dal metodo che si è scelto, il passo successivo è quello di eseguire una analisi dei carichi, propri e portati dalla struttura, applicare tali carichi sugli elementi strutturali deputati a sopportarli, e valutare il comportamento della struttura.

In generale, per quanto sia acclarata l'esigenza di automatizzare il più possibile il processo progettuale, al fine di ridurre i tempi e minimizzare gli errori, la fase preliminare di progettazione strutturale deve discernere da una analisi critica effettuata in prima persona dal progettista, e non demandata ad un software che esegua l'operazione decisionale al suo posto.

Il software di calcolo è in grado di aiutare il progettista a diversi livelli, di seguito presentati, ma è ovviamente compito del progettista stesso utilizzare il software come un aiuto e rimanere padrone del processo decisionale, e non farsi guidare egli stesso dal software.

2.2.1. *Il peso proprio strutturale*

Il peso proprio degli elementi strutturali ha certamente una grande influenza sul computo complessivo dei carichi agenti su di una struttura, e per altro può comportare difficoltà di valutazione dato che gli elementi strutturali sono suscettibili di variazioni dimensionali proprio in funzione delle forze agenti.

In questo senso, l'aiuto del software di calcolo è certamente fondamentale, dato che, una volta definiti i parametri materici dell'elemento, il calcolo del peso proprio strutturale viene effettuato in automatico.

La variazione di un profilo in conseguenza al ridimensionamento strutturale non comprometterà l'analisi dei carichi effettuata in precedenza e non richiederà correzioni puntuali.

In generale, perché il software esegua da sé il calcolo del peso proprio, è necessario definire i parametri in funzione dei quali esso genera il calcolo.

Per le sezioni più semplici come travi e pilastri a sezione regolare rettangolare o circolare, è sufficiente settare correttamente i parametri relativi al materiale di cui essi sono composti.

All'interno di Revit esiste una sezione dedicata unicamente ai materiali, tramite la quale è possibile gestire i parametri legati all'aspetto dell'elemento a seconda dello stile di visualizzazione e per la generazione di render fotorealistici.

Relativamente all'aspetto strutturale risulta importante la sottocategoria "Fisico", all'interno della quale sono elencate le caratteristiche meccaniche del materiale.

Proprietà	Valore
Comportamento	Isotropico
Coefficiente di espansione termica	0,00001 inv °C
Modulo di Young	23.250,0 MPa
Coefficiente di Poisson	0,17
Modulo a taglio	9.964,0 MPa
Densità	2.407,31 kg/m³
Compressione calcestruzzo	24,1 MPa
Modifica resistenza a taglio	1,00
Leggero	<input type="checkbox"/>
Sollecitazione di snervamento	2,4 MPa
Resistenza alla trazione	2,4 MPa

Figura 29 Parametri fisici del materiale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Se per le sezioni più semplici la forma e le dimensioni dell'elemento sono automaticamente lette dal software di calcolo nel quale si va a inserire il modello, per le sezioni più complesse, come ad esempio i profili metallici, è necessario definire parametri ulteriori legati alla forma della sezione.

All'interno dell'editor di famiglia è possibile definire il parametro "forma sezione", il quale, una volta definito in funzione della forma dell'elemento strutturale, dà accesso ad una serie di parametri legati appunto alla sezione stessa, per affinare la valutazione del peso dell'elemento e il suo comportamento strutturale.

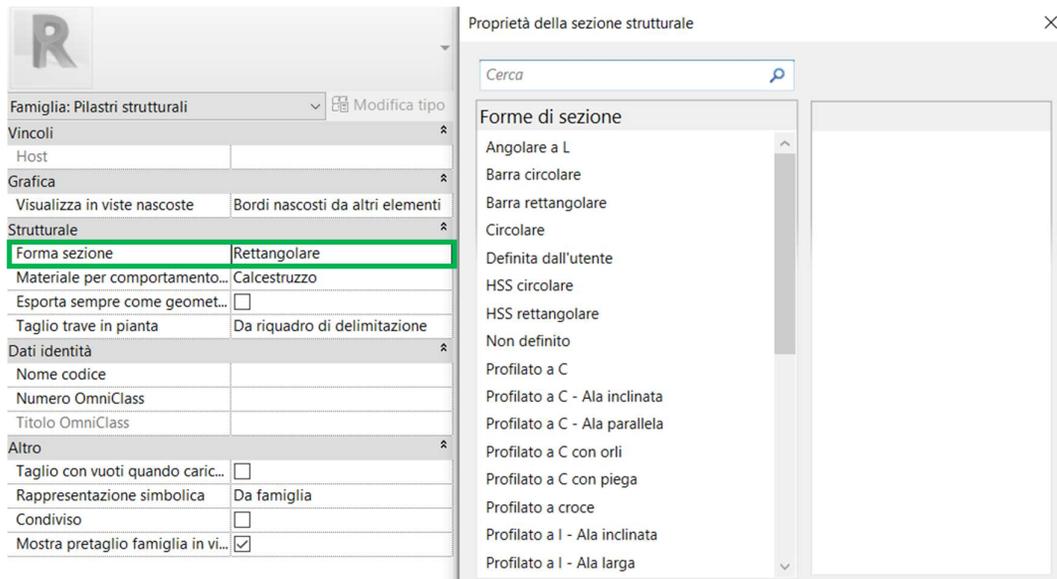


Figura 30 Parametro forma sezione degli elementi strutturali

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Le forme sezione presenti sono quelle relative ai profili in acciaio standard presenti sul mercato e alle sezioni più usuali per il calcestruzzo armato e il legno. È inoltre possibile definire da utente forme sezione più complesse o comunque non presenti in libreria.

Quando si imposta la forma sezione compaiono una serie di nuovi parametri di tipo che, correttamente settati, permettono al software di riconoscere dimensionalmente l'elemento e di poter generare elaborazioni più complesse, sia in termini di calcolo che in termini di modellazione, dal punto di vista strutturale.

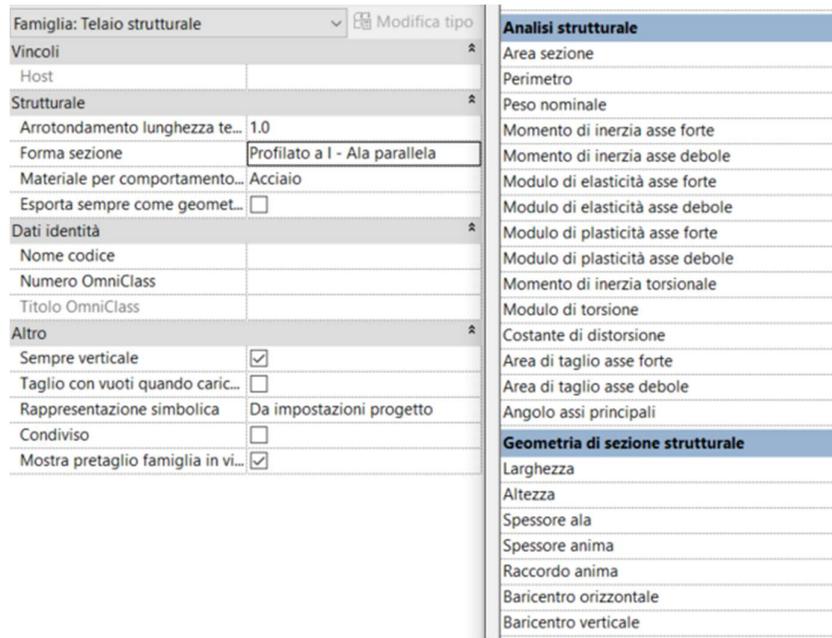


Figura 31 Parametri di forma sezione per generico profilato a I

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

In figura vengono mostrati tutti i nuovi parametri editabili per un generico profilo a I nel quale è stata impostata la forma sezione.

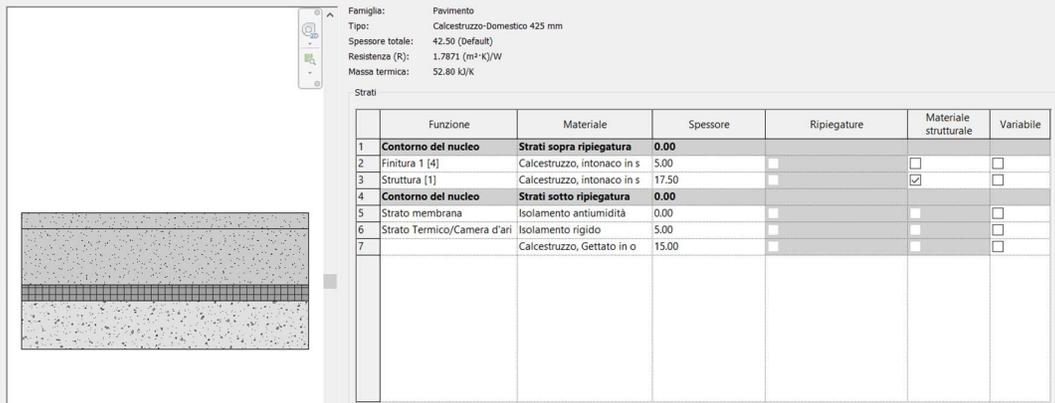
Si noti come effettivamente compaiono due nuove categorie di parametri chiaramente inerenti all'analisi strutturale.

Questo passaggio non risulta indispensabile per profili standard caricabili dalle librerie di Revit, ma è necessario ad esempio per profili compositi definiti da utente. Se i sopracitati parametri non saranno correttamente settati, risulterà impossibile per Revit riconoscere la geometria dell'elemento ed eseguire elaborazioni più complesse come, ad esempio, la generazione di un giunto in acciaio parametrico.

2.2.2. Il peso proprio non strutturale

Anche gli elementi non strutturali possono essere valutati automaticamente in termini di peso proprio, dato che le stratigrafie murarie e dei solai possono essere modellate con un livello di dettaglio tale da inserire ogni strato che compone la stratigrafia.

Ad ogni strato viene associato un materiale così come si è fatto per gli elementi strutturali portanti, e di conseguenza ad ogni singolo strato può essere associato un peso.



	Funzione	Materiale	Spessore	Ripiegature	Materiale strutturale	Variabile
1	Contorno del nucleo	Strati sopra ripiegatura	0.00			
2	Finitura 1 [4]	Calcestruzzo, intonaco in s	5.00		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Struttura [1]	Calcestruzzo, intonaco in s	17.50		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Contorno del nucleo	Strati sotto ripiegatura	0.00		<input checked="" type="checkbox"/>	
5	Strato membrana	Isolamento antiumidità	0.00		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Strato Termico/Camera d'ari	Isolamento rigido	5.00		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7		Calcestruzzo, Gettato in o	15.00		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 32 Stratigrafia di un solaio in Revit

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Nell'immagine soprastante viene raffigurata la stratigrafia di una famiglia pavimento presente di default in Revit. Come si può vedere ad ogni strato sono associati un materiale, e quindi delle proprietà fisiche e meccaniche, ed inoltre uno spessore e una superficie di estensione.

La computazione automatica del peso proprio di un elemento così complesso però, può comportare errori e approssimazioni grossolane, ad esempio perché non si tiene conto della quota parte portante e della quota parte portata del solaio, le quali secondo le Norme Tecniche delle Costruzioni vengono considerate con un coefficiente amplificativo diverso nella combinazione dei carichi.

Questo aspetto potrebbe essere ovviato facilmente modellando distintamente la componente architettonica da quella strutturale.

In aggiunta bisogna considerare che, soprattutto per gli elementi piani, la modellazione architettonica differisce drasticamente rispetto alla modellazione del comportamento strutturale dell'elemento.

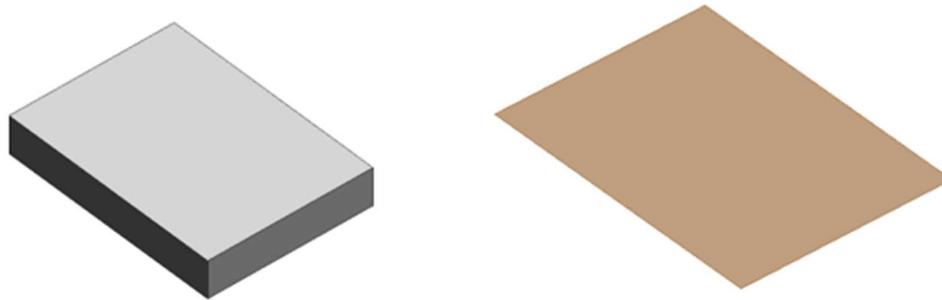


Figura 33 Modello digitale e analitico di un solaio laterocementizio

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

In generale per la modellazione architettonica, soprattutto nelle fasi preliminari, è importante definire l'ingombro di un oggetto piano come un solaio, ma non è necessario un livello di dettaglio molto avanzato, e di conseguenza l'elemento viene approssimato ad una piastra di materiale omogeneo.

Dal punto di vista strutturale invece, un elemento piano può essere modellato come piastra solo ed esclusivamente se le sue caratteristiche materiche e di resistenza sono omogenee su tutta la sua superficie.

Un solaio laterocementizio è per definizione disomogeneo in quanto composto da travetti portanti in calcestruzzo armato e pignatte di alleggerimento, ed inoltre è ordito in un'unica direzione, pertanto scarica il proprio peso e quelli che porta unicamente sulle travi principali.

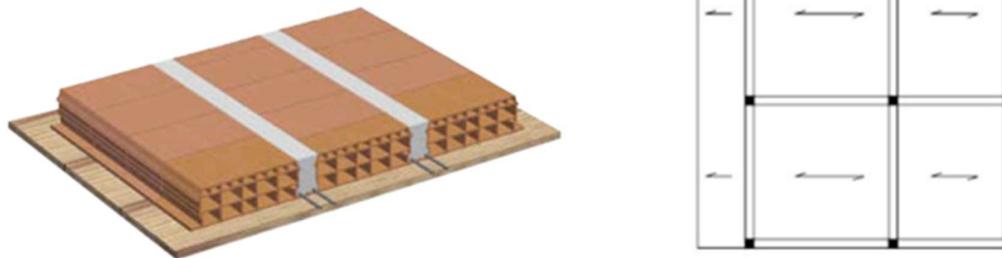


Figura 34 Solaio laterocementizio

FONTE: https://it.wikipedia.org/wiki/Solaio_in_laterocemento#/media/File:Solaio_realizzato_in_opera.jpg

Per i motivi sopra citati è molto importante definire adeguatamente la strategia di modellazione dei carichi agenti, valutando se modellare direttamente l'elemento o se definire il suo peso direttamente attraverso dei carichi applicati.

2.2.3. I carichi variabili

In generale, all'interno dei software di calcolo strutturale, una volta definito il modello analitico e assegnate le sezioni strutturali agli elementi, il passo successivo è quello di caricare la struttura disponendo elemento per elemento i carichi che gravano su di esso.

Tale operazione può essere eseguita quindi dopo l'esportazione del modello analitico sul software di calcolo, oppure è possibile effettuarla direttamente su Revit.

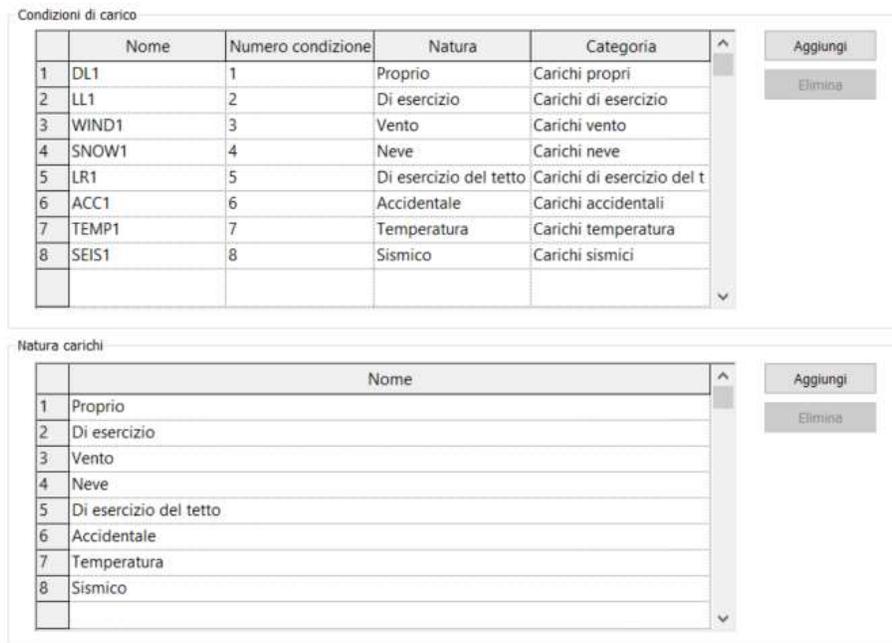


Figura 35 Impostazione delle condizioni di carico su Revit

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Il primo passaggio è quello di definire le diverse condizioni di carico che gravano sulla struttura e la loro natura, dato che è proprio in funzione di essa che saranno impostati i coefficienti di combinazione e di contemporaneità dei carichi.

Quelle rappresentate in figura sono le condizioni di carico presenti di default nell'interfaccia di Revit, ma è possibile generarne di nuove e distinguere vari casi di carico, anche con la medesima natura.

Potrebbe ad esempio risultare opportuno distinguere tra la parte portante e quella portata di un solaio, dato che i rispettivi coefficienti di combinazione di carico sarebbero diversi.

Una volta definiti i casi di carico si può procedere alla generazione delle combinazioni.

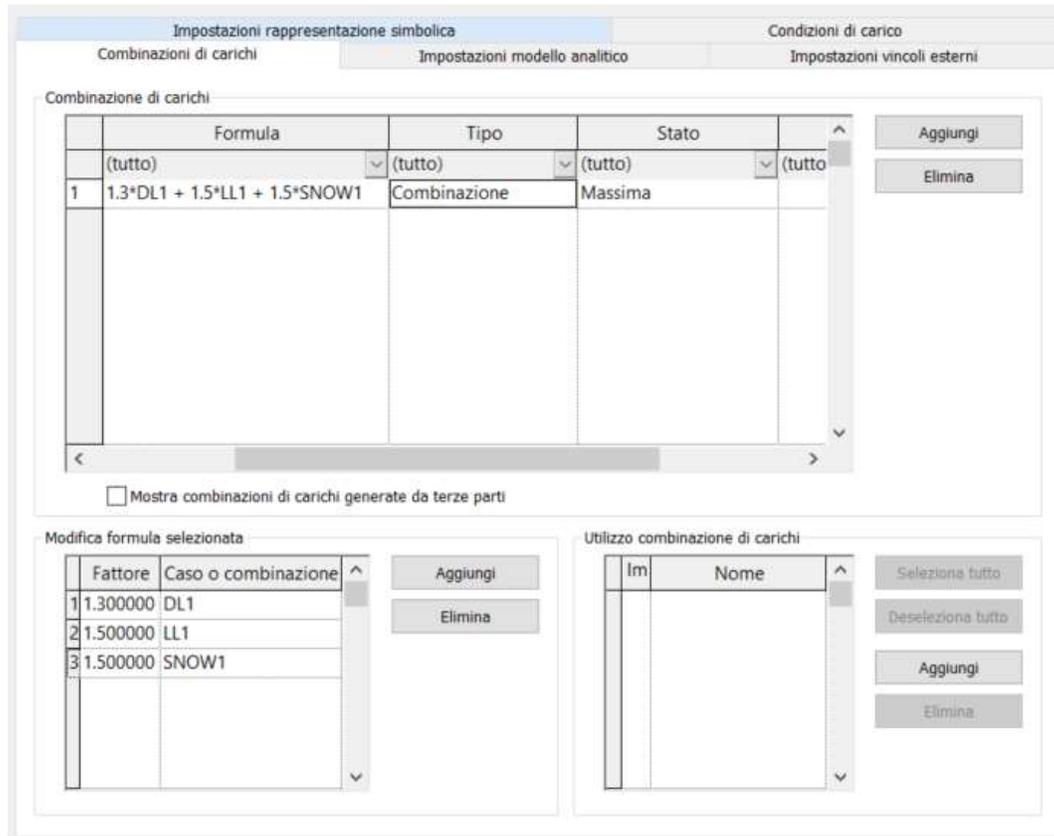


Figura 36 Generazione delle combinazioni di carico

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

In generale è possibile definire diverse combinazioni di carico ma, come si evince dalla figura sopra, è possibile attribuire un unico fattore di combinazione di carico, e quindi per poter inserire sia i coefficienti parziali γ che quelli di combinazione ψ sarebbe necessario inserire nella combinazione il prodotto dei due, il che risulta scorretto dal punto di vista informativo della metodologia BIM.

Per questo motivo potrebbe risultare conveniente, una volta definiti e applicati correttamente i casi di carico, gestire le varie combinazioni sul software sul quale verrà esportato il modello, nel quale, essendo specifico per l'analisi strutturale, sarà più agevole e preciso gestire le combinazioni di carico.

Caricare la struttura significa andare a inserire manualmente i carichi che non possono essere direttamente calcolati dal software, o che in casi particolari come quelli visti prima, non si desidera che vengano calcolati automaticamente.

I carichi inseribili possono essere puntuali, sviluppati su linea oppure su area. Solitamente i carichi puntuali vengono utilizzati per valutare il dimensionamento di singoli nodi strutturali, per i quali il carico sopportabile può essere effettivamente approssimato a un carico puntiforme. Un secondo caso, come visto in precedenza, può essere quello in cui due parti di struttura vengano analizzate separatamente, e l'interazione tra le due parti venga realizzata inserendo in una le reazioni vincolari dell'altra, tramite carichi puntiformi.



Figura 37 Tipi di carico inseribili su Revit

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

In generale, Revit offre la possibilità di modellare i carichi in due modi differenti. Il primo è quello di inserire il carico disegnandolo sul modello analitico mediante i comandi standard di disegno, mentre il secondo è quello di inserire dei carichi ospitati, cioè assegnare i carichi direttamente agli elementi coinvolti solo selezionandoli.

Nel primo caso, il carico può essere disegnato dovunque all'interno dello spazio di modellazione, ma se non si disegna il carico contiguo al modello analitico, il software di calcolo segnalerà un errore non riconoscendo il carico come applicato sull'elemento.

Nel secondo caso, infatti, Revit assegna il carico all'elemento materico inserendolo direttamente sul modello analitico.

La differenza sostanziale tra i due metodi è che nel secondo caso, modificando l'estensione dell'elemento, il carico seguirà tale modifica, mentre nel primo caso no.

In generale quindi il secondo metodo è preferibile rispetto al primo data la maggiore versatilità e la minor possibilità di errore, ma chiaramente il primo metodo rimane valido per casi particolari.

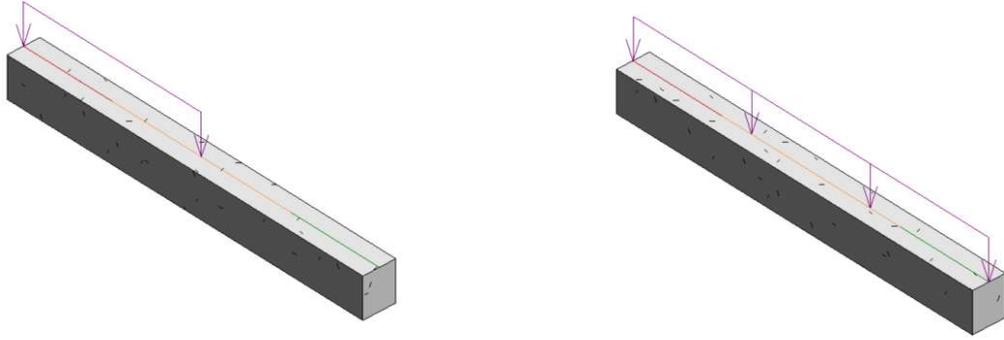


Figura 38 Carichi lineari su travi

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

In figura, si possono vedere due elementi trave con carico lineare applicato, nel primo caso tramite lo strumento disegno, e nel secondo associando il carico ospitato all'elemento.

Nell'ipotesi in cui non tutta la lunghezza della trave sia caricata omogeneamente allora la strategia di modellazione potrebbe essere quella di spezzare la trave e applicare due carichi ospitati, oppure quella di inserire due diversi carichi lineari tramite disegno.

Disporre di entrambe le alternative per poter scegliere quella che meglio si adatta al caso specifico, rende certamente più versatile l'attività di modellazione all'interno di Revit.

Carico puntuale, lineare e su area sono famiglie di sistema e quindi native di Revit. L'entità dei carichi introdotti è gestibile mediante parametri di istanza, pertanto così come per i vincoli esterni, sarà necessario copiare un'istanza o inserire simultaneamente tutte le istanze carico i cui valori di sollecitazione siano uguali.

I parametri di tipo sono invece legati unicamente alla scala di rappresentazione grafica dell'entità delle sollecitazioni, pertanto di poco conto ai fini pratici del calcolo strutturale.

Carichi lineari (1)		Modifica tipo
Analisi strutturale		
Condizione di carico	DL1 (1)	
Natura	Proprio	
Orienta su	Progetto	
Carico uniforme	<input type="checkbox"/>	
Carico proiettato	<input type="checkbox"/>	
Forze		
Fx 1	0.00 kN/m	
Fy 1	0.00 kN/m	
Fz 1	-1.00 kN/m	
Fx 2	0.00 kN/m	
Fy 2	0.00 kN/m	
Fz 2	-3.00 kN/m	
Momenti		
Mx 1	0.00 kN-m/m	
My 1	0.00 kN-m/m	
Mz 1	0.00 kN-m/m	
Mx 2	0.00 kN-m/m	
My 2	0.00 kN-m/m	
Mz 2	0.00 kN-m/m	

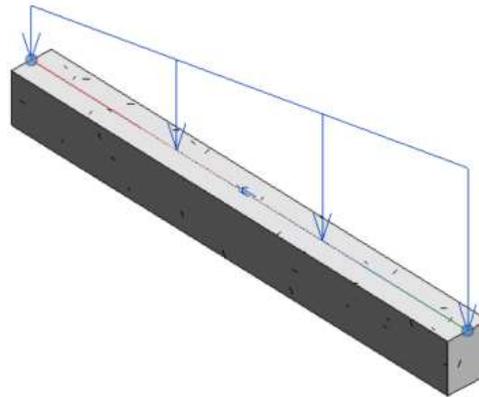


Figura 39 Parametri di un'istanza carico lineare

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Analizzando la figura si può vedere come sia chiaramente possibile inserire una forza o un momento applicato, oppure la combinazione dei due in tutte le direzioni della terna cartesiana.

Gli assi di riferimento per l'orientamento del carico sono di default quelli globali del progetto, ma possono essere orientati rispetto ad altri piani di lavoro, ad esempio per elementi inclinati.

È possibile creare anche carichi non uniformi ma bensì, come si vede in figura, trapezoidali.

Tale opzione però, non è disponibile per i carichi ad area.

2.3. Processo standard e integrato per l'analisi strutturale

Nel presente capitolo è stata presentata una panoramica delle potenzialità legate alla modellazione strutturale direttamente all'interno dell'ambiente di modellazione di Revit.

Chiaramente, non essendo Revit un software deputato all'analisi strutturale, presenta effettivamente talune limitazioni alla modellazione analitica, non presenti in software ad hoc per la progettazione di strutture.

L'intento dimostrato dagli aggiornamenti susseguitisi negli ultimi anni è però quello di cercare di riunire la progettazione di tutte le discipline coinvolte all'interno dell'ambiente Revit, per poi demandare unicamente il processo di analisi, calcolo ed estrapolazione dei risultati ai software per l'analisi strutturale, energetica, illuminotecnica, ecc.

Da questo punto di vista, e ribadendo quanto scritto all'interno del capitolo 1 relativamente al worksharing, è chiaro che il processo BIM è tanto più efficace quanto più le informazioni di carattere progettuale sono accessibili e stoccate all'interno del medesimo database.

In generale, i software di modellazione strutturale non contemplano le possibilità offerte da software come Revit per il worksharing e il lavoro in simultanea da parte di più progettisti, e per questo motivo la modellazione analitica e strutturale redatta in Revit può divenire un potente strumento di interfaccia tra professionisti, sia in ambito strutturale, che per le altre discipline.

Il flusso di lavoro sarà tanto più snello ed efficace quanto maggiore sarà il grado di interoperabilità tra Revit e il software deputato all'esecuzione dell'analisi.

Nel caso del presente elaborato di tesi, per la generazione del calcolo strutturale è stato scelto Robot Structural Analysis, un software prodotto dalla medesima Software House di Revit, e pertanto altamente interoperabile.

In generale, la scelta dei software da adottare all'interno di uno studio di progettazione che voglia lavorare con metodologia BIM, non può prescindere da un'analisi del livello di interoperabilità tra i software prescelti, perché chiaramente questo è un aspetto che si ripercuote drasticamente sulle tempistiche di progettazione e sulla qualità del prodotto finale ottenibile.

3. Revit e Robot Structural Analysis

Come già accennato, il software prescelto per l'elaborazione dell'analisi strutturale è Robot Structural Analysis.

Robot è un software agli elementi finiti altamente interoperante con Revit, attraverso un plug-in installabile, che consente il passaggio diretto di informazioni tra i due software.

In generale, il metodo di trasmissione di informazioni tra due software rappresenta l'elemento cruciale per la maggiore o minore efficienza del processo progettuale.

È fondamentale fare ricorso al processo che comporta la minore perdita di informazioni necessarie, dato che la ricompilazione manuale delle stesse sul software di destinazione, comporta perdite di tempo e quindi un processo meno efficiente.



Figura 40 Plug-in di Robot per l'analisi strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Installando il plug-in sarà possibile dialogare direttamente con Robot senza passare da formati di esportazione intermedi, come ad esempio il formato .ifc.

All'interno del capitolo 2 sono state presentate le accortezze necessarie per l'ottenimento di un modello analitico corretto e leggibile da un software di calcolo.

Lo step successivo è chiaramente quello di esportare il modello ottenuto in Robot e verificare che le informazioni necessarie allo svolgimento dell'analisi strutturale siano state correttamente importate.

3.1. Migrazione dei dati verso Robot

Per esportare il modello analitico sarà sufficiente attivare il collegamento con Robot Structural Analysis.

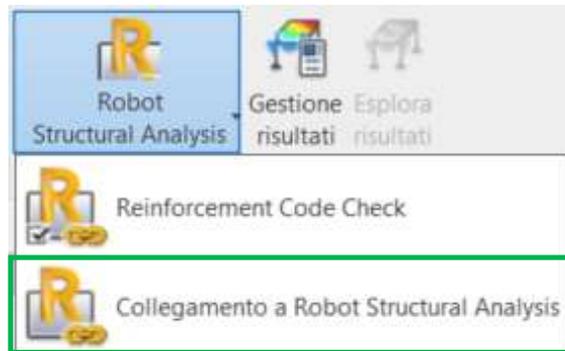


Figura 41 Interfaccia di collegamento con Robot Structural Analysis

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

L'interfaccia che si apre consente di effettuare l'esportazione o la reimportazione dei risultati dell'analisi effettuata in Robot.

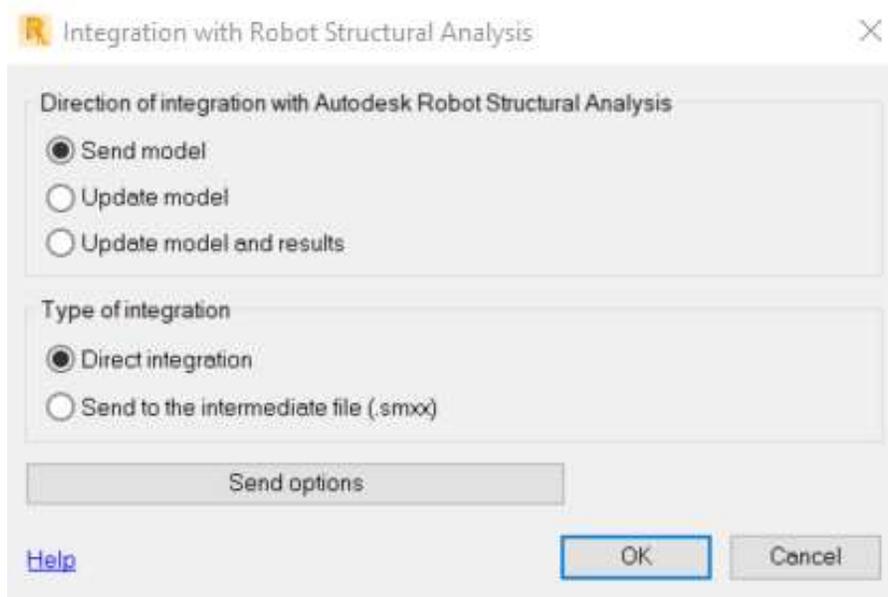


Figura 42 Modalità di migrazione dei dati tra Revit e Robot

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Visualizzando le impostazioni avanzate presenti nel tool di esportazione si vede come è possibile esportare anche elementi di armatura e componenti in acciaio da verificare all'interno di Robot.

L'aspetto fondamentale però, è quello relativo alla scelta dell'utente circa come intende considerare il peso proprio degli elementi strutturali importati, dato che sarà Robot a calcolare automaticamente tali valori.

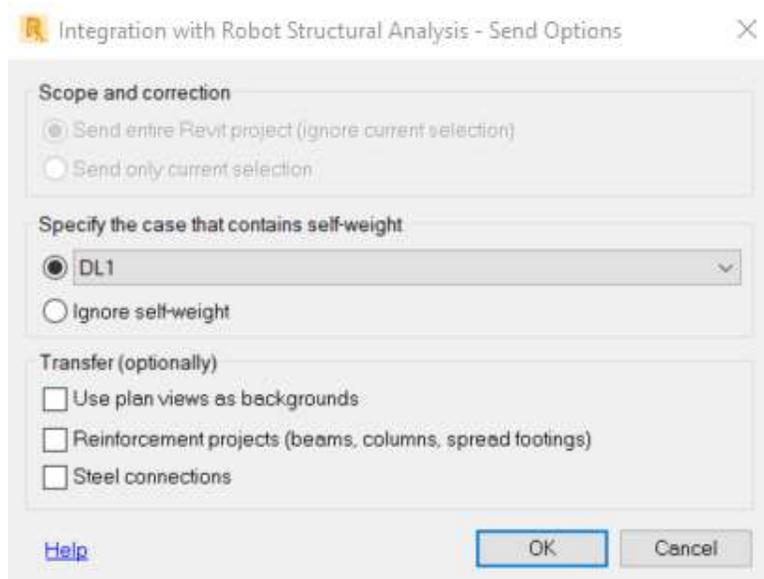


Figura 43 Opzioni aggiuntive di migrazione dei contenuti

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Il peso proprio può essere associato automaticamente a uno dei casi di carico precedentemente creati, oppure può essere ignorato.

Ignorare il peso proprio è chiaramente un'opzione, perché il progettista potrebbe volerlo modellare come carico applicato sugli elementi strutturali, anche se effettivamente risulterebbe una strada più lenta e dove sarebbe più facile commettere errori.

Una volta settate come desiderato le modalità di esportazione il modello analitico viene esportato in Robot.

Il modello analitico esportato in Robot è identico a quello generato in Revit, e ha conservato tutti i parametri relativi a vincoli interni ed esterni precedentemente descritti.

Vengono esportati unicamente gli elementi che su Revit sono riconosciuti come elementi strutturali, dato che sono gli unici per i quali è possibile attivare il modello analitico.

Nell'esempio in figura, infatti, quelli rappresentati sono setti in calcestruzzo armato, e sono stati correttamente esportati.

L'ultimo aspetto che è necessario verificare è che le proprietà degli elementi

strutturali relative alla sezione e al materiale siano state correttamente esportate. Una volta correttamente importato il modello di analisi è necessario definire le combinazioni di carico, le quali come detto non sono facilmente gestibili all'interno di Revit.

Per farlo è sufficiente verificare che tutti i casi di carico siano stati correttamente esportati e procedere alla definizione delle combinazioni di carico.

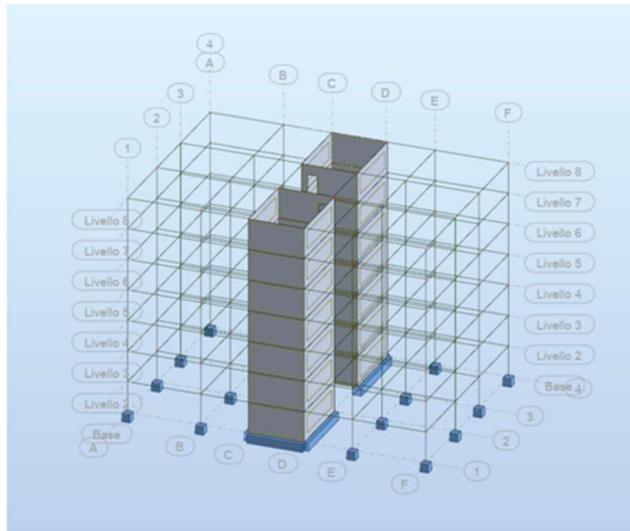
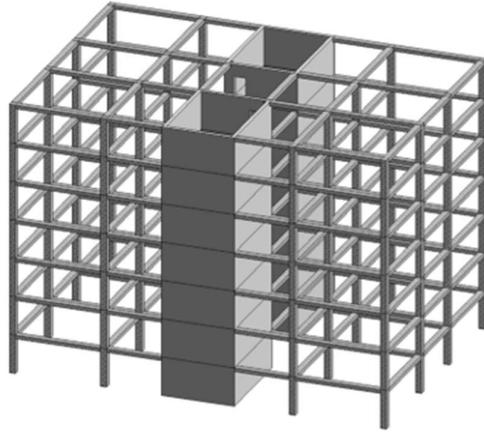


Figura 44 Modello strutturale in Revit e analitico in Robot

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit e Robot ®

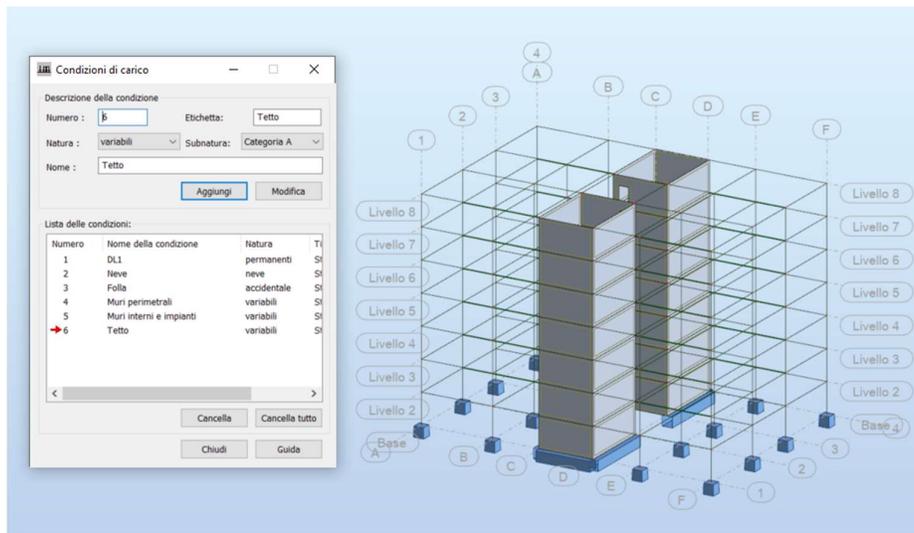


Figura 45 Visualizzazione casi di carico

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ®

Nell'immagine soprastante sono visualizzati tutti i casi di carico inseriti in Revit e poi esportati verso Robot. Distinguere in casi diversi i pesi propri portati dalla struttura come la copertura, i solai di interpiano o la muratura perimetrale, potrà permettere una facile modifica sul modello in caso di variazioni progettuali inerenti ai pacchetti stratigrafici. Uno degli aspetti fondamentali, già dibattuto in precedenza, riguarda il peso proprio degli elementi strutturali, il quale è stato automaticamente calcolato e applicato a tutti gli elementi evidenziati. La definizione dell'intensità dei vari casi di carico è strettamente correlata al tipo di struttura ed è pertanto esplicitata nel capitolo 5, inerente ai singoli casi studio. Relativamente invece agli aspetti operativi del software verrà di seguito esplicitato il calcolo automatizzato dell'apporto dovuto al vento.

3.1.1. Definizione del carico da vento

La definizione del carico da vento secondo le NTC 2018 varia in funzione della tipologia di edificio.

“Il vento esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici. Per le costruzioni usuali tali azioni sono convenzionalmente ridotte alle condizioni statiche equivalenti”.

NTC 2018, par. 3.3

Il calcolo dell'azione del vento si effettua a partire dalla definizione della velocità base di riferimento V_b , la quale deriva dalla formula

$$V_b = V_{b,0} \cdot C_a$$

dove $V_{b,0}$ è la velocità di riferimento sul livello del mare mentre C_a è il coefficiente di altitudine e dipende dalle seguenti relazioni

$$C_a = 1 \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$C_a = 1 + k_s \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

Tab. 3.3.I -Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

Figura 46 Valori di riferimento per il calcolo della velocità di base di riferimento del vento

FONTE: NTC 2018, par. 3.3.1

Una volta nota la velocità di riferimento del vento, l'applicazione del carico viene effettuata dal software inserendo i dati relativi alla direzione del vento e al livello del terreno rispetto al livello 0.00 m di progetto. In generale, per considerare

l'azione massima offerta dal vento viene considerata la direzione tale per cui la superficie direttamente lambita dal vento sia quella maggiore.

È possibile definire su quali aste far agire il vento e soprattutto definire come debbano essere considerate le aperture, in modo da considerare o meno i carichi derivanti dalla sovrappressione all'interno dell'edificio.

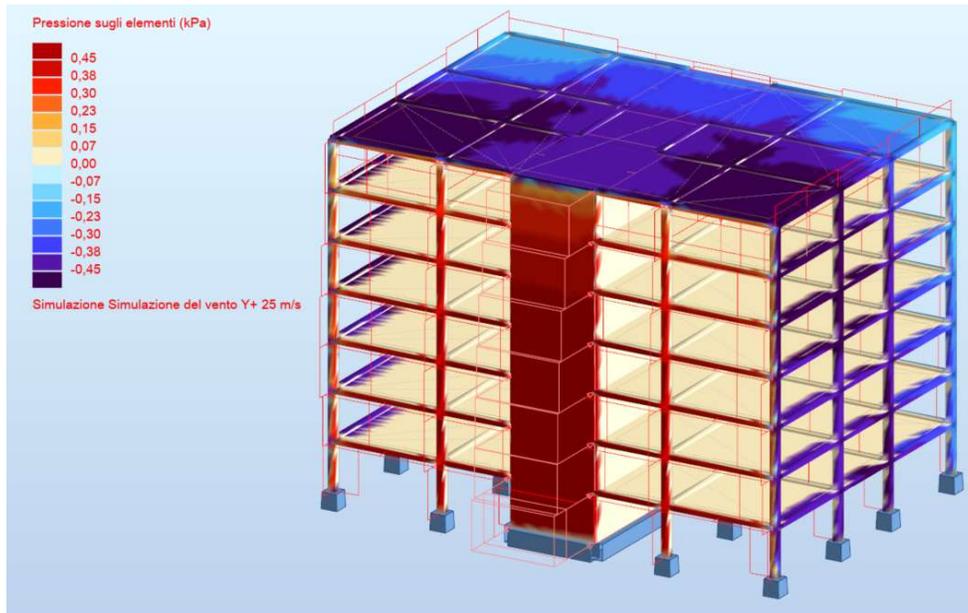


Figura 47 Rappresentazione grafica del carico da vento

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ®

L'elaborazione consente di visualizzare le zone in pressione e in depressione per effetto del vento mediante una scala colore espressa in kPa. Il carico viene automaticamente tradotto in kN/m e applicato agli elementi strutturali. È quindi possibile considerare il carico da vento come una delle azioni agenti e inserirla all'interno della combinazione dei carichi.

3.1.2. Definizione dell'azione sismica

Per definire l'azione provocata sulla struttura dal sisma, così come per l'azione prodotta dal vento, si è fatto ricorso al calcolo automatico offerto dal software.

L'Eurocodice 8 definisce quali restrizioni devono essere rispettate perché si possa ricorrere ad un'analisi sismica semplificata mediante il metodo delle forze laterali.

I criteri in oggetto sono definiti nel par. 4.3.3.2 dell'Eurocodice 8, il quale specifica che l'applicabilità del già menzionato metodo semplificato è limitata agli "edifici la cui risposta non è significativamente influenzata dai contributi dei modi di vibrazione più alti del modo fondamentale in ogni direzione principale".

Cit. par. 4.3.3.2.1 EC8

L'Eurocodice stesso traduce tale dicitura in due condizioni che devono essere rispettate dall'edificio, vale a dire che l'edificio sia regolare in elevazione, come definito all'interno del par. 4.2.3.3 EC8 ed inoltre rispetti la seguente condizione riguardo il periodo fondamentale di vibrare:

$$T_1 \leq \begin{cases} 4 \times T_C \\ 2,0s \end{cases}$$

Per strutture di altezza inferiore a 40 m il periodo fondamentale T1 può essere calcolato in maniera approssimativa mediante la seguente formula, definita nel par. 4.3.3.2.2 EC8:

$$T_1 = C_t \times H^{3/4}$$

H è l'altezza dell'edificio dalla fondazione alla sommità, mentre C_t è un coefficiente funzione della tipologia di tecnologia strutturale, ed è pari a 0.075 per strutture a telaio in calcestruzzo armato con nodi rigidi, come in casi studio in esame.

Il termine T_c invece viene definito secondo il prospetto 3.2 EC8:

prospetto 3.2 Valori dei parametri che descrivono lo spettro di risposta elastico raccomandato di Tipo 1

Tipo di terreno	S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Figura 48 Prospetto 3.2 dell'Eurocodice 8 per la definizione di T_c

FONTE: Par. 3.2.2.2 EC8

In merito alla regolarità in pianta e in altezza l'EC8 definisce ai paragrafi 4.2.3.2 e 4.2.3.3 tutti i criteri che devono contemporaneamente essere rispettati dall'edificio in analisi perché si possa definire regolare.

In sintesi, tali criteri fanno riferimento all'omogeneità tra i diversi impalcati di piano in termini di dimensioni, forma e rigidezza, nonché a limitazioni in merito al rapporto tra i due lati di base dell'edificio.

Come sarà brevemente descritto all'interno del capitolo 5 relativo ai casi studio, gli edifici in oggetto rispettano i criteri imposti dall'EC8 ed è pertanto possibile applicare l'analisi semplificata col metodo delle forze laterali.

3.1.3. Definizione dell'analisi statica equivalente in Robot

L'analisi statica mediante il metodo delle forze equivalenti prevede la valutazione dell'azione sismica mediante l'applicazione di forze statiche ai vari impalcati di piano, proporzionali alle masse stanti al medesimo impalcato.

A tali forze viene applicata un'eccentricità, la quale è pari al valore maggiore tra la distanza tra il centro di massa e il centro di rigidezza dell'impalcato di piano, e il 5% del lato dell'edificio perpendicolare all'azione, in modo da simulare l'effetto torsionale prodotto dal sisma.

Figura 49 Definizione dell'azione sismica in Robot

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ©

Il metodo di calcolo automatico di tali forze è definito proprio in funzione dell'EC8. I parametri in esso contenuti legati alla definizione dell'azione sismica sono sintetizzati dell'immagine seguente, e sono legati alla tipologia di struttura, alla categoria di sottosuolo e alla definizione dell'azione sismica in funzione della zona sismica. Nei casi in esame viene ipotizzato che tutti i casi studio sorgano in

Torino, zona sismica 4 e pertanto a_g viene posta pari all'accelerazione orizzontale massima convenzionale per la zona 4 secondo le NTC2018.

Parametri EN 1998-1:2004

Condizione: EN 1998-1:2004

Condizione ausiliaria

Periodo fondamentale - T1

Metodo di definizione: Approssimato (norma sismica)

Direzione X: Ct, x Telai in CA (Ct=0.075)

Direzione Y: Ct, x Telai in CA (Ct=0.075)

ag: 0,05

q: 1,5

Beta: 0,200000

Categoria di sottosuolo

A B C D E Involuppo Parametri

Spettro

Tipo 1 Tipo 2

Ignora la densità

OK Annulla Guida

Figura 50 Parametri dell'azione sismica per la definizione delle forze statiche equivalenti

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ®

La definizione dell'entità di tali forze viene definita automaticamente dal software una volta definiti i piani di azione delle forze statiche precedentemente descritte. Avendo definito il modello di calcolo in ambiente Revit, sono già presenti i livelli di riferimento con i quali è stata effettuata la modellazione strutturale. A tali livelli è necessario associare manualmente i piani che il software considererà per l'azione sismica.

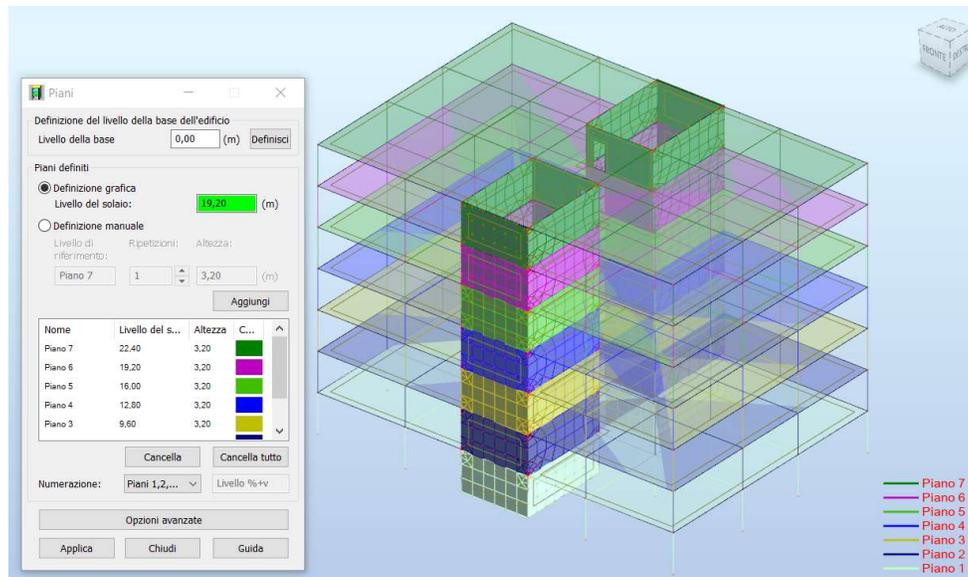


Figura 51 Definizione dei piani per la valutazione automatica dell'azione sismica

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ®

Una volta effettuata l'associazione il software genera degli elementi detti "cladding" i quali fungono unicamente da ripartitori di carico sul piano che definiscono, senza fornire contributo né in termini di massa, né in termini di rigidità.

A questo punto è possibile lanciare l'analisi sismica, la quale fornirà in output i casi di carico relativi alle combinazioni delle azioni orizzontali nelle due direzioni, come definito dalla stessa analisi statica equivalente.

Le combinazioni sismiche vengono generate manualmente considerando i casi di carico connessi all'analisi sismica come caso E, combinandolo con i carichi permanenti precedentemente definiti.

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad [2.5.5]$$

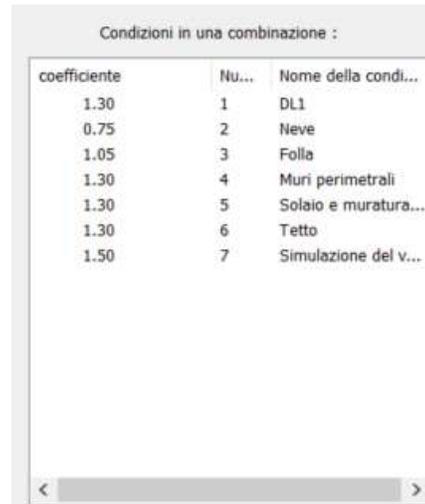
Figura 52 Combinazione sismica

FONTE: NTC2018 par. 2.5.3

3.2. Esecuzione analisi e controllo dei risultati

Una volta definite tutte le azioni agenti sulla struttura è possibile generare la combinazione di carico di interesse e lanciare l'analisi.

Generando manualmente la combinazione dei carichi è possibile applicare un unico coefficiente, che sarà quindi il prodotto del coefficiente parziale γ e di quello di combinazione ψ .



coefficiente	Nu...	Nome della condi...
1.30	1	DL1
0.75	2	Neve
1.05	3	Folla
1.30	4	Muri perimetrali
1.30	5	Solaio e muratura...
1.30	6	Tetto
1.50	7	Simulazione del v...

Figura 53 Combinazione dei carichi di esempio

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

In generale, come detto, è possibile generare automaticamente tutte le combinazioni di carico automaticamente, ma se la combinazione manuale prescelta è, come in questo caso, certamente quella che genera la situazione di carico peggiore, allora non ha senso richiedere al software il calcolo di tutte le combinazioni di carico, specialmente in fase preliminare quando, per il dimensionamento degli elementi, è necessaria unicamente la sollecitazione massima agente.

Il dettaglio delle combinazioni di carico prescelte sarà trattato caso per caso all'interno del capitolo 5 inerente ai casi studio.

Una volta lanciata l'analisi è buona norma valutare puntualmente i diagrammi delle sollecitazioni in output al fine di verificare la correttezza degli stessi.

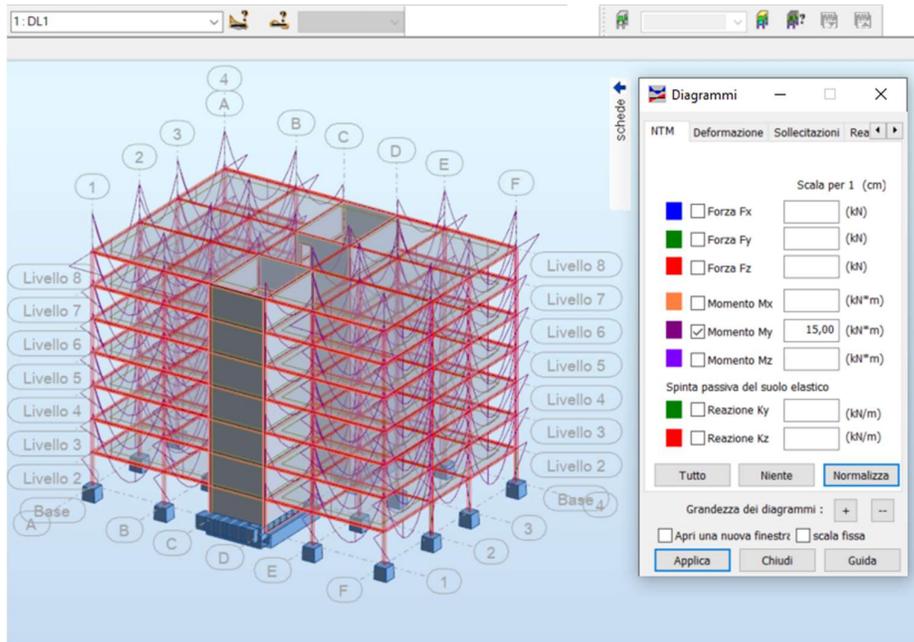


Figura 54 Diagramma di momento generato dal peso proprio strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ©

In figura viene mostrato il diagramma di momento derivante dall'applicazione del peso proprio della struttura, indice del corretto calcolo del peso proprio, demandato al software.

3.3. Visualizzazione e management dei risultati in ambiente Revit

Una volta eseguita l'analisi strutturale è possibile riportare i risultati in Revit attraverso lo stesso plug-in utilizzato per esportare i dati di progetto verso Robot.

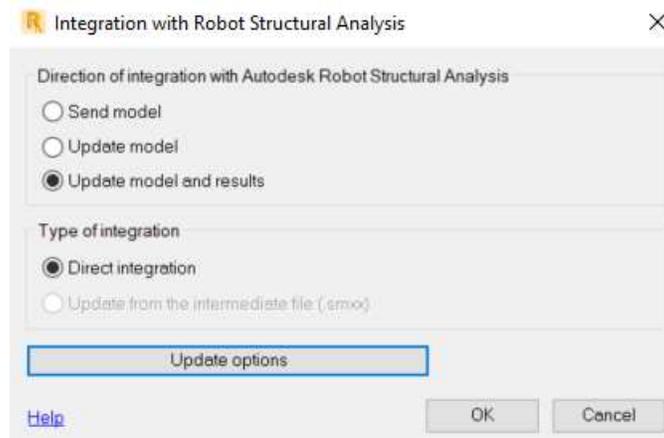


Figura 55 Interfaccia per la reimportazione dei dati in Revit

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Attraverso tale modulo è possibile in aggiunta importare sia le barre di armatura che le connessioni in acciaio se queste sono state progettate in Robot.

L'aspetto fondamentale legato alla riesportazione dei risultati consiste nella possibilità di visualizzarli attraverso un apposito tool direttamente all'interno di Revit.

Sarà possibile interrogare il modello al fine di conoscere sollecitazioni, deformazioni, ecc. per la struttura in esame nel suo complesso, oppure per una parte di essa.

Questo è chiaramente un potente strumento nelle mani di un team di progettazione strutturale, il quale ha la possibilità di coordinarsi in funzione di un modello strutturale interrogabile, visualizzabile e modificabile da parte di tutto il team simultaneamente mediante i metodi di worksharing di cui dispone Revit, e che invece i software di calcolo strutturale in genere non possiedono.

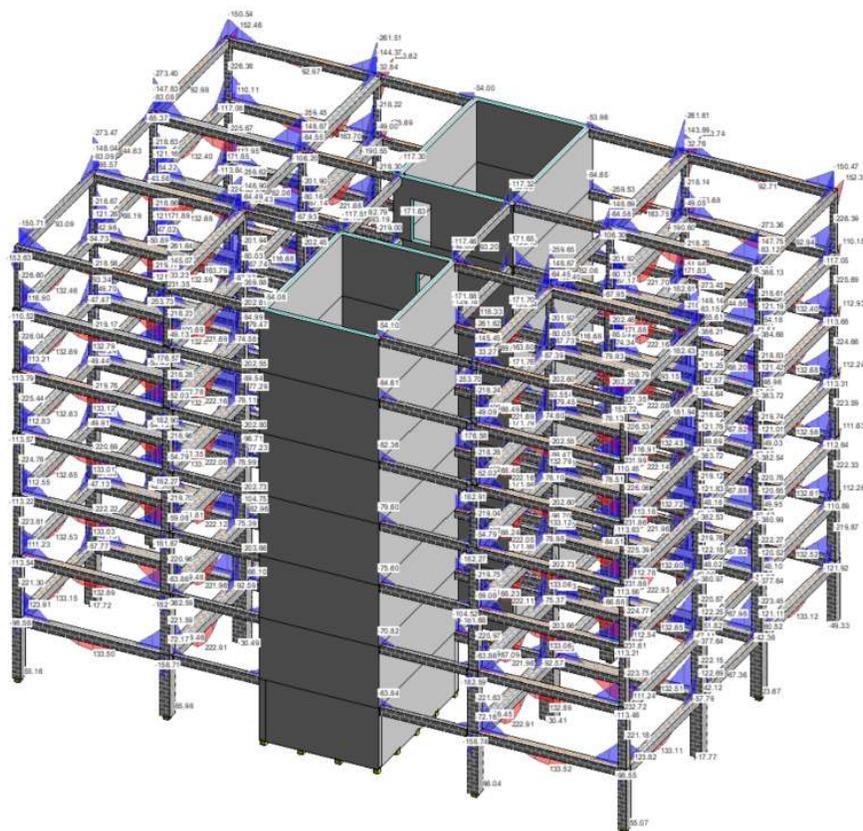


Figura 56 Del diagramma di momento a SLU per l'intera struttura

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

In generale, pur essendo questo chiaramente un potente strumento di interfaccia tra progettisti, rimane fine a sé stesso in quanto i dati interrogabili e visualizzabili mediante questo tool non sono in alcun modo utilizzabili ai fini di una progettazione automatizzata, dato che sono unicamente visualizzabili.

In un'ottica sempre più rivolta alla metodologia BIM, e quindi al management delle informazioni racchiuse all'interno del modello, risulta una limitazione eccessiva.

3.3.1. Importazione e gestione dei risultati attraverso Dynamo

Al fine di rendere i dati relativi all'analisi utilizzabili, è stato ideato un processo di importazione dei dati generato ad hoc mediante Dynamo, una piattaforma di visual programming per la gestione dei dati e la modellazione digitale parametrica.

Il flusso di lavoro ideato consente l'importazione delle sollecitazioni di interesse, e l'associazione delle stesse ad ogni elemento strutturale.

Questi valori saranno inseriti all'interno di parametri di istanza, i quali saranno quindi non solo interrogabili ma anche utilizzabili per operazioni di dimensionamento strutturale direttamente in ambiente Revit.

La trasmissione dei dati avviene per mezzo di un passaggio intermedio tramite Excel. I valori delle sollecitazioni vengono esportati in formato .csv e quindi aperti in Excel. A questo punto, mediante Dynamo, è possibile riordinare, catalogare e assegnare tali valori alle singole istanze del modello strutturale in Revit.



Figura 57 Workflow per l'esportazione delle sollecitazioni da Robot a Revit

FONTE: Elaborazione autore

Questo processo è possibile grazie al fatto che all'interno di Revit, ad ogni elemento modellato è associato un ID univoco composto da sei cifre casuali. L'unica regola in base alla quale Revit genera automaticamente questo ID è l'ordine nel quale gli elementi del modello sono stati modellati.

Quando il modello analitico viene esportato in Robot, quest'ultimo numerava gli elementi secondo una codifica che parte dal numero 1, ma preserva l'esatto ordine nel quale gli elementi sono catalogati su Revit.

In questo modo il passaggio di informazioni è facile e privo di errori, perché l'associazione dei parametri mediante Dynamo avviene a partire da due liste, all'interno delle quali elementi e rispettive sollecitazioni sono perfettamente ordinati sequenzialmente: al primo posto, da una parte ci sarà l'elemento con ID più basso, dall'altra le sollecitazioni corrispondenti all'elemento 1, e così via.

Per implementare questo processo è necessario creare dei parametri di progetto all'interno di Revit, per poterli compilare con i valori delle sollecitazioni. Vengono importati unicamente i valori massimi di ognuna delle caratteristiche della sollecitazione, per ogni elemento.

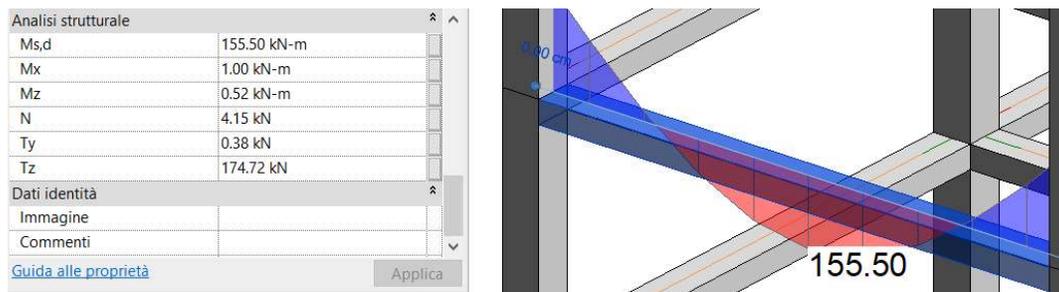


Figura 58 Caratteristiche della sollecitazione per una trave

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

I parametri di progetto creati sono parametri di istanza, e sono quindi diversi e gestibili separatamente per ogni elemento del modello. Vengono raggruppati sotto la categoria "Analisi strutturale" e, compatibilmente con le unità di misura adottate all'interno del progetto, sono correttamente definiti in termini dimensionali.

L'asse di riferimento principale, contrariamente alla convenzione usuale, è l'asse X. Di conseguenza ad esso sono associati lo sforzo normale e il momento torcente. Rispetto all'asse Y vi è il momento flettente di interesse per il progetto dell'armatura inferiore della trave, rispetto all'asse Z il taglio.

4. Ottimizzazione strutturale

L'iter legato alla progettazione strutturale ordinaria prevede solitamente un'operazione di predimensionamento degli elementi strutturali, basato tanto sulle prescrizioni dimensionali contenute negli Eurocodici quanto sull'esperienza del progettista.

Una volta effettuata l'operazione preliminare di predimensionamento, in genere si richiede al software di calcolo strutturale la generazione automatica dei ferri di armatura in funzione dei carichi applicati, oppure si esegue un predimensionamento di massima dell'armatura e si richiede al software di calcolare se il quantitativo è corretto, inferiore a quello minimo richiesto o in esubero.

La configurazione degli elementi strutturali così ottenuta, sarà certamente corretta in quanto rispondente ai canoni dettati dalla normativa vigente, ma non sarà figlia di considerazioni legate all'ottimizzazione sia dal punto di vista del coordinamento con le altre discipline, che dal punto di vista del minimo utilizzo di materiale, sia per quanto concerne le dimensioni degli elementi strutturali, che dal punto di vista delle barre di armatura inserite.

In questo capitolo verrà presentato come, una volta note le sollecitazioni agenti sulla struttura, sia possibile impiegare un processo di ottimizzazione della struttura, sia nel suo complesso che per ogni elemento considerato singolarmente, mediante il generative design e l'ausilio della piattaforma di programmazione visuale Dynamo.

4.1. Criteri generali di ottimizzazione strutturale

Come già accennato, il predimensionamento degli elementi strutturali deriva solitamente da considerazioni di carattere geometrico legate alle dimensioni del manufatto edilizio progettato, come ad esempio l'altezza di interpiano o la lunghezza delle campate delle due direzioni di orditura dell'impalcato di piano.

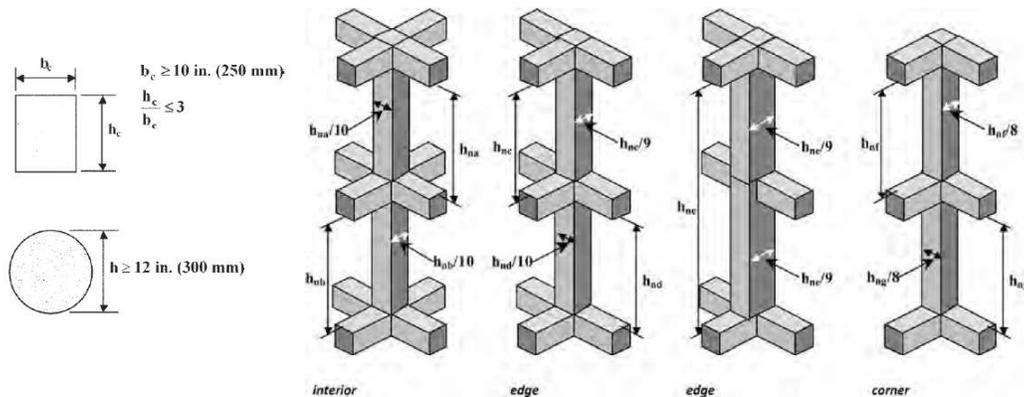


Figura 59 Predimensionamento di pilastri in calcestruzzo armato secondo le norme ACI

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

Un esempio di semplici ma efficaci regole per il predimensionamento delle strutture è quello offerto dalle normative ACI ("American Concrete Institute"), le quali forniscono delle linee guida per ipotizzare, come si vede in figura, il dimensionamento di pilastri e travi, in funzione di criteri legati ai parametri dimensionali del manufatto.

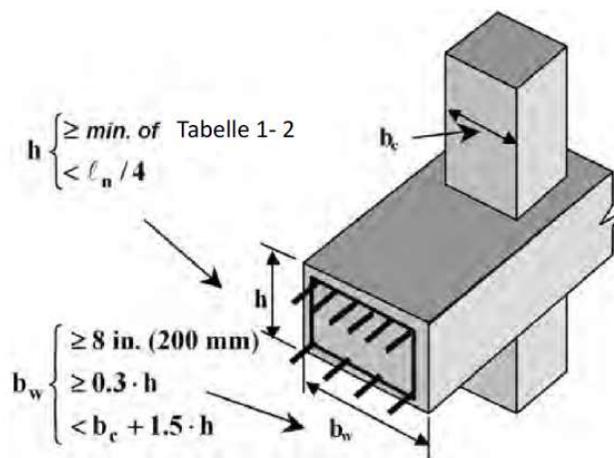


Figura 60 Predimensionamento di travi in calcestruzzo armato secondo le norme ACI

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

Queste indicazioni rappresentano una linea guida chiara e semplice, mediante la quale il progettista può approcciarsi facilmente al predimensionamento della struttura nella fase progettuale iniziale.

Ma come già accennato, una volta effettuato il predimensionamento e valutate le sollecitazioni agenti, è necessario tornare sui propri passi al fine di ottimizzare la struttura progettata.

Per farlo, senza l'ausilio di sistemi di automazione, è necessario procedere per tentativi al fine di ottenere una configurazione soddisfacente.

Il processo progettuale standard prevede l'inserimento di parametri di input univoci, per poi demandare al software la verifica di tali parametri, ottenendo in output un responso in base al quale modificare o validare i parametri stessi.

Per esempio, si inserisce l'armatura longitudinale all'interno di un elemento trave e si chiede al software se con tale configurazione l'elemento risulta verificato.

In aggiunta, tale processo è poco controllabile dal progettista, perché l'output ottenuto deriva da un algoritmo sul quale non si ha controllo.

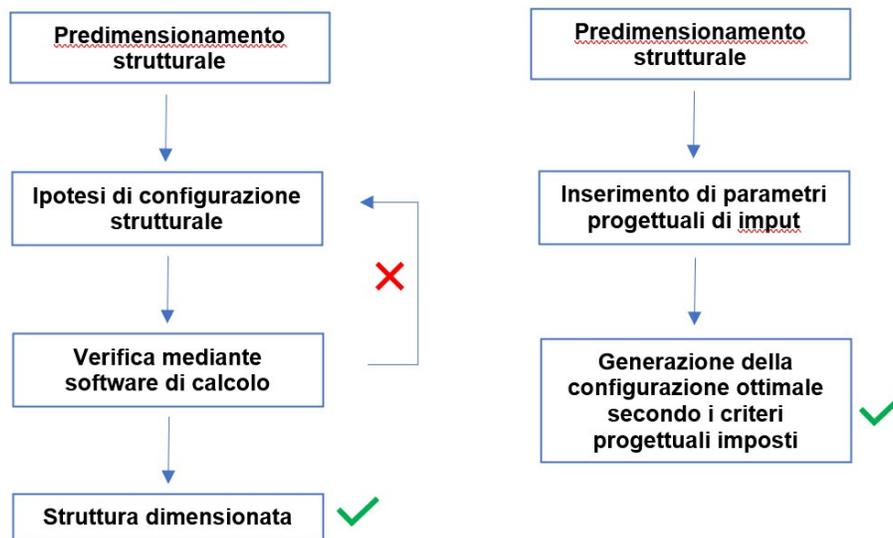


Figura 61 Processo progettuale standard e integrato

FONTE: Elaborazione autore

Il processo integrato presentato invece, pone come condizioni al contorno vincoli progettuali, legati ad esempio al migliore rapporto tra armatura e sezione in calcestruzzo, e genera in output il dimensionamento dell'elemento, sia per quanto riguarda la sezione che per quanto concerne l'armatura teorica

necessaria, corrispondente alla migliore configurazione possibile secondo i criteri progettuali inseriti.

4.2. Dimensionamento degli elementi trave

Dimensionare le travi che compongono una struttura significa, come detto, a partire dalla sollecitazione calcolata, determinare le quantità minime di calcestruzzo e acciaio necessarie per sopportare tali sollecitazioni, in funzione di criteri di dimensionamento posti come condizioni al contorno.

Di seguito vengono presentati i concetti teorici appresi durante il corso di Strutture e Fondazioni, in base ai quali si definiscono i coefficienti adimensionali delle tabelle di Montoya, per mezzo dei quali sarà poi eseguito il progetto degli elementi strutturali.

4.2.1. Campi di rottura e definizione delle equazioni alla traslazione e rotazione

Le NTC definiscono i limiti normativi legati alle deformazioni dei materiali, per acciaio e calcestruzzo ordinario, mediante le leggi costitutive dei materiali.

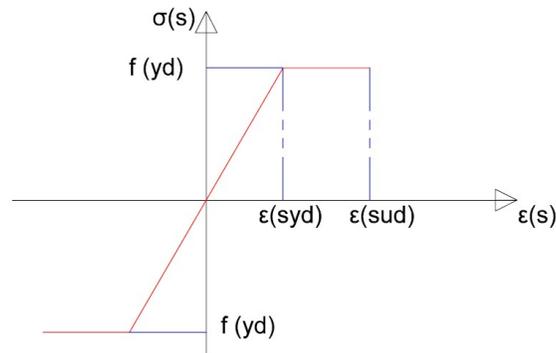


Figura 62 Legge costitutiva per l'acciaio

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

In figura è rappresentato il legame costitutivo dell'acciaio, dove f_{yd} è la tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio, mentre ϵ_{syd} e ϵ_{sud} rappresentano rispettivamente i limiti di deformazione elastica e plastica del materiale.

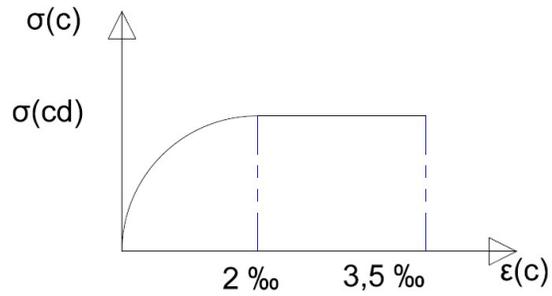


Figura 63 Legge costitutiva per il calcestruzzo ordinario

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

In figura è rappresentato il legame costitutivo per calcestruzzo ordinario, detto anche parabolo rettangolo, dove sono rappresentati i limiti deformativi per il calcestruzzo al lembo compresso. La resistenza offerta dal calcestruzzo in zona tesa, essendo minima, viene ignorata.

In virtù delle differenti configurazioni possibili che porterebbero una generica sezione a rottura, vengono definite diverse configurazioni limite chiamate campi di rottura.

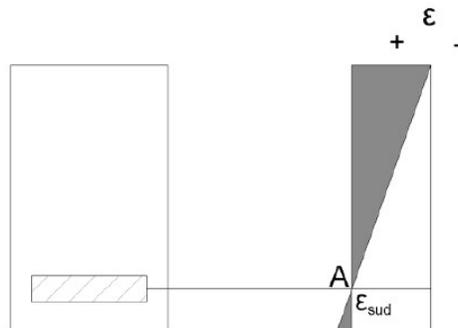


Figura 64 Campo di rottura 1

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

Nel campo 1 la sezione è interamente sollecitata a trazione, la deformazione massima per l'acciaio è pari a ϵ_{sud} , mentre quella del calcestruzzo è compresa tra 0 e ϵ_{sud} .

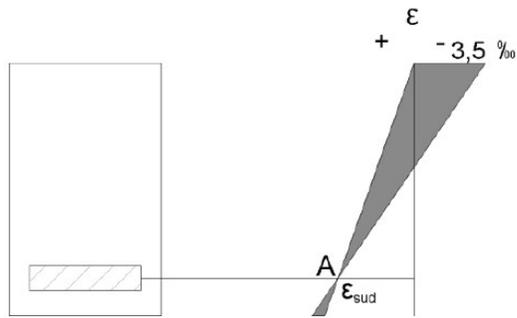


Figura 65 Campo di rottura 2

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

Nel campo 2 la sezione è in parte sollecitata a trazione e in parte a compressione. La deformazione dell'acciaio è pari a ϵ_{sud} , mentre quella del calcestruzzo è compresa tra 0 e $-3,5\text{‰}$, limite di deformazione plastica per il calcestruzzo.

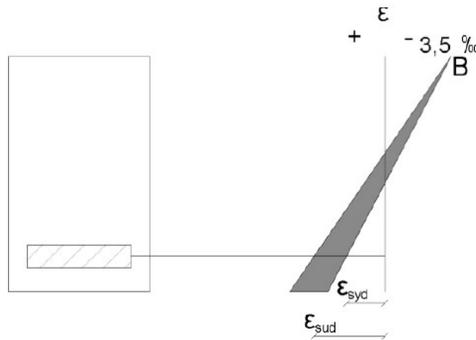


Figura 66 Campo di rottura 3

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

Anche nel campo 3 la sezione è parzialmente tesa e parzialmente compressa. La deformazione del calcestruzzo è pari al limite plastico imposto da normativa mentre quella dell'acciaio è compresa tra ϵ_{syd} e ϵ_{sud} .

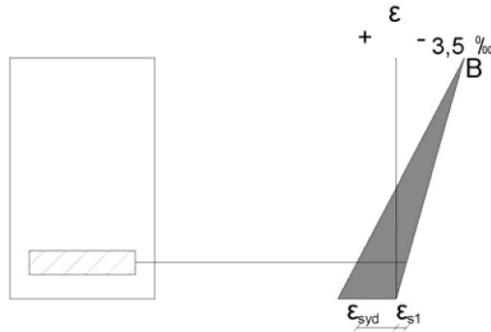


Figura 67 Campo di rottura 4

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

Nel campo 4 l'acciaio è nuovamente in campo elastico e la sollecitazione al lembo inferiore può essere sia di trazione che di compressione, quindi può verificarsi la condizione di pura compressione sulla sezione.

La deformazione del calcestruzzo è ancora al limite plastico, mentre quella dell'acciaio è in campo elastico e varia tra ϵ_{synd} e ϵ_{s1} , che può essere calcolato come proporzione rispetto alla deformazione del calcestruzzo.

$$\frac{-3,5\text{‰}}{H} = \frac{\epsilon_{s1}}{c} \rightarrow \epsilon_{s1} = \frac{H}{c} \cdot (-3,5\text{‰})$$

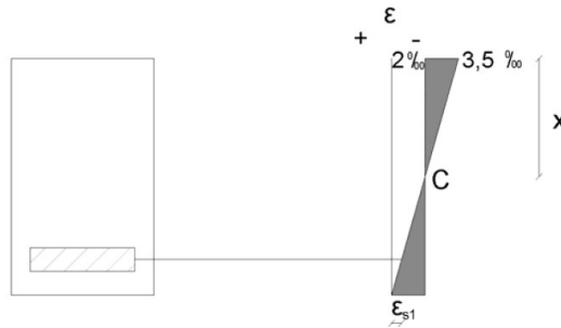


Figura 68 Campo di rottura 5

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

Nel campo 5 si tiene conto del fatto che per normativa la deformazione media del calcestruzzo è minore o uguale al 2‰.

L'approfondimento x definisce il punto della sezione a deformazione nulla e si può valutare come proporzione.

$$\frac{x}{(3,5 - 2)\text{‰}} = \frac{H}{3,5\text{‰}} \cdot x = \frac{3}{7} \cdot H$$

La scelta del campo di rottura rispetto al quale eseguire il progetto di una sezione definisce i valori di resistenza dei materiali impiegati, in funzione dei legami costitutivi. In generale, progettare ipotizzando che la sezione si trovi in campo 3 è la condizione ottimale dato che sia il calcestruzzo al lembo compresso, che l'acciaio al lembo teso, lavorano alla tensione di snervamento, e pertanto offrono la massima resistenza possibile, senza raggiungere il punto di collasso, nei confronti della sollecitazione. Ne consegue che il dimensionamento, sia della sezione di calcestruzzo che delle barre di armatura in zona tesa, sarà quello minore possibile per sopportare efficacemente la sollecitazione.

L'equilibrio della sezione è governato dalle equazioni alla rotazione e alla traslazione, le quali valgono indipendentemente dal campo di rottura.

C rappresenta la componente di resistenza a compressione offerta dal calcestruzzo, mentre $\sigma_{(s)}$ quella a trazione dell'acciaio in zona tesa. y_0 è definito come approfondimento dell'asse neutro.

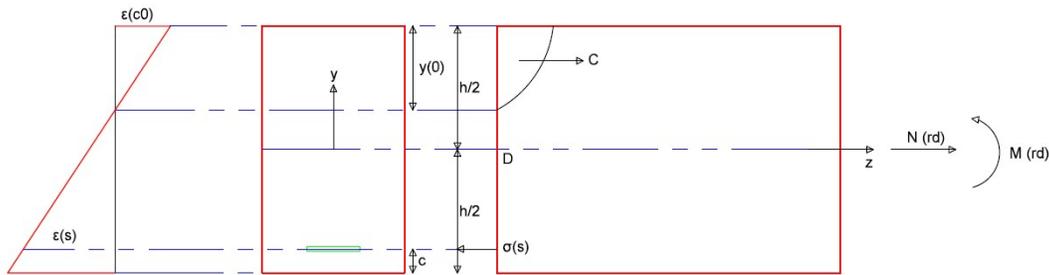


Figura 69 Comportamento della sezione soggetta a flessione

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

$$N_{rd} = \int \sigma dA$$

$$M_{rd} = \int \sigma y dA$$

Dunque, all'equilibrio si ottiene:

$$N_{rd} - \sigma_s A_s - \int \sigma_c dA = 0 \quad (1)$$

$$M_{rd} - \sigma_s A_s \left(\frac{h}{2} - c \right) + \int \sigma_c y dA = 0 \quad (2)$$

L'integrale $\int \sigma_c dA$ corrisponde alla resistenza a compressione offerta dal calcestruzzo in zona compressa.

La sua valutazione viene semplificata approssimando l'area parabolica che la rappresenta ad un'area rettangolare, mediante il coefficiente adimensionale β_1 .

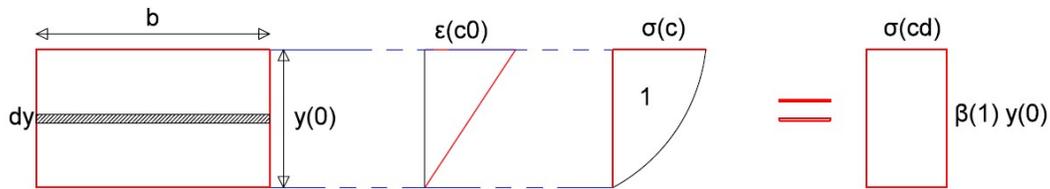


Figura 70 Approssimazione della componente di resistenza a compressione

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

$$\int \sigma_c dA = b y_0 \beta_1 \sigma_c$$

Il coefficiente β_1 è funzione della deformazione del calcestruzzo in campo elastico, ma definendo tale relazione in campo 3, dove il calcestruzzo viene considerato sempre al limite superiore del campo plastico, il coefficiente assume valore costante, pari a 0,81.

Anche l'apporto del calcestruzzo all'equazione alla rotazione è di complessa definizione e quindi viene introdotto un secondo coefficiente al fine di semplificare la valutazione del braccio della componente C.

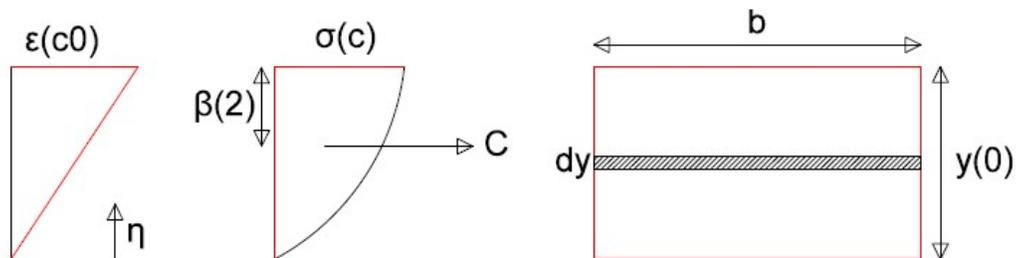


Figura 71 Approssimazione del braccio della componente di resistenza a compressione

FONTE: Slide del corso di Strutture e Fondazioni

Anche il coefficiente β_2 è funzione della deformazione del calcestruzzo, ma per le ragioni appena descritte assume anch'esso valore costante, pari a 0,42.

$$\int \sigma_c y dA = b y_0 \beta_1 \sigma_c \left(\frac{h}{2} - y_0 \beta_2 \right)$$

Le equazioni (1) e (2), nel caso della flessione semplice, vengono quindi riscritte come:

$$\sigma_s A_s = b y_0 \beta_1 \sigma_c \quad (3)$$

$$M_{rd} - \sigma_s A_s \left(\frac{h}{2} - c \right) - b y_0 \beta_1 \sigma_c \left(\frac{h}{2} - y_0 \beta_2 \right) = 0 \quad (4)$$

L'equazione (4) può essere riscritta come:

$$M_{rd} - b y_0 \beta_1 \sigma_c (d - y_0 \beta_2) = 0 \quad (5)$$

Dove d è pari all'altezza della sezione meno il copriferro inferiore.

Per adimensionalizzare il problema vengono introdotti tre coefficienti appunto adimensionali, di seguito descritti.

$$\xi = \frac{y_0}{d} \quad (6)$$

ξ descrive la profondità dell'asse neutro in funzione della sezione utile. Per sezione utile si intende la parte di sezione che va dal lembo superiore all'asse dei ferri in zona tesa, dato che il calcestruzzo che si trova in zona tesa non ha sostanzialmente interesse dal punto di vista della resistenza flessionale della sezione.

Volendo definire le equazioni (3) e (4) nel campo di rottura σ_s sarà pari a f_{yd} , vale a dire la resistenza caratteristica dell'acciaio a snervamento, ridotta rispetto al coefficiente di sicurezza $\gamma_s = 1,15$.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

Per definire il secondo coefficiente si divide l'equazione (3) per $b d \sigma_c$:

$$\frac{f_{yd} A_s}{b d \sigma_c} = \frac{b y_0 \beta_1 \sigma_c}{b d \sigma_c} = \xi \beta_1$$

$$\omega = \xi \beta_1 \quad (7)$$

ω definisce la percentuale meccanica di armatura.

Per definire il terzo e ultimo coefficiente si divide l'equazione (5) per $b d^2 \sigma_c$:

$$\frac{M_{rd}}{b d^2 \sigma_c} = \frac{b y_0 \beta_1 \sigma_c}{b d^2 \sigma_c} \cdot (d - y_0 \beta_2) \quad (8)$$

Il primo membro dell'equazione è uguale a μ_{rd} , detto anche momento resistente ridotto.

Dalle equazioni (6), (7) e (8) si ottiene:

$$\mu_{rd} = \xi \beta_1 (1 - \xi \beta_2) \quad (9)$$

Tramite questo metodo di progetto, le caratteristiche dimensionali della sezione sono governate da parametri numerici adimensionali. Per questo motivo il metodo si sposa molto bene con un approccio automatizzato per il predimensionamento della sezione, gestito mediante visual programming.

Volendo ricercare, mediante questo metodo, la configurazione in base alla quale la struttura sia ottimizzata anche in termini dimensionali oltre che di resistenza, si fa riferimento all'Eurocodice 2, il quale prescrive di imporre $\xi \leq 0,25$ per avere un comportamento duttile della sezione.

Un valore di ξ basso comporta una profondità dell'asse neutro minore, e di conseguenza una sezione più grande. Per questo motivo viene preliminarmente preso come riferimento il valore massimo possibile, pari a 0,25.

I valori di ω e μ_{rd} derivano quindi dalle espressioni (7) e (9):

$$\omega = 0,2$$

$$\mu_{rd} = 0,18$$

Chiaramente sarà facoltà del progettista modificare tali valori, pur mantenendo invariati i rapporti tra di essi, ma se lo scopo è quello di ottimizzare il più possibile il quantitativo di conglomerato cementizio e di acciaio allora questi sono i valori da prendere a riferimento.

4.2.2. Gestione del calcolo mediante Visual Programming

Mediante Dynamo, viene generato un algoritmo in grado di fornire in output il dimensionamento di tutti gli elementi trave contemporaneamente, seguendo le prescrizioni e le formule descritte nel paragrafo precedente.

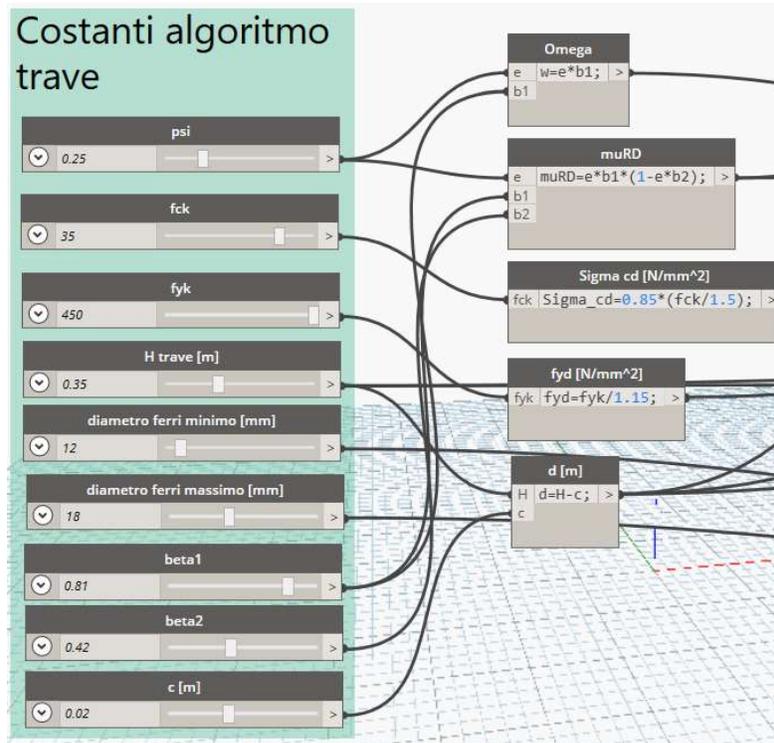


Figura 72 Costanti gestibili mediante script Dynamo

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ©

Le costanti ω e μ_{rd} sono correlate alla costante ξ mediante le formule descritte al paragrafo precedente. Le altre costanti fanno riferimento alle caratteristiche resistive del calcestruzzo e dell'acciaio, opportunamente ridotte dai coefficienti di sicurezza secondo le NTC2018.

L'altro parametro sul quale il progettista ha libertà di scelta, alla ricerca della configurazione strutturale complessivamente migliore, è l'altezza della trave.

L'obiettivo è quello di dimensionare tutti gli elementi trave, in funzione della sollecitazione agente su ognuno degli elementi, secondo i medesimi criteri progettuali, i quali saranno determinati da esigenze progettuali globali legate alla migliore correlazione possibile con le altre discipline progettuali. Posti tali vincoli a monte, il risultato sarà quello tale per cui la struttura nel suo complesso è ottimizzata sia in termini volumetrici che materici, ed è quindi meno massiva e anche meno costosa.

Per prima cosa viene dimensionata la sezione di conglomerato cementizio, a partire dalla formula (8):

$$b = \frac{M_{rd}}{\mu_{rd} d^2 \sigma_c}$$

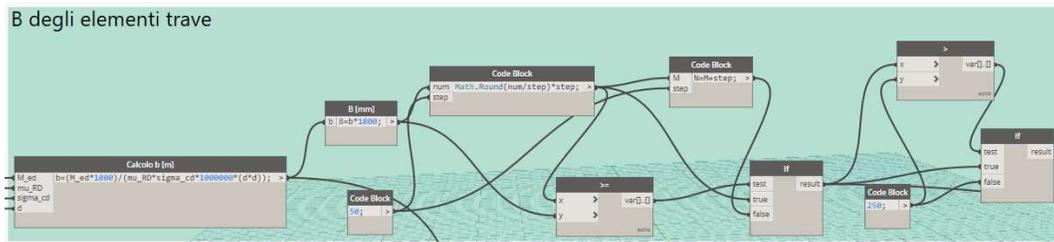


Figura 73 Calcolo della base dell'elemento trave

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ©

Mediante lo script viene calcolata la base teorica ideale, la quale un valore probabilmente non “cantierabile”. Per questo motivo viene successivamente arrotondata per eccesso.

L’algoritmo di controllo verifica poi l’accettabilità della dimensione calcolata, la quale potrebbe essere non idonea perché troppo piccola per via di un basso momento sollecitante, e quindi eventualmente sostituita con un valore minimo imposto dal progettista, in questo caso pari a 250 mm.

A questo punto la sezione è definita, in funzione del parametro ξ tale per cui la sezione è la minore possibile in termini dimensionali.

M_{rd} è stato precedentemente assegnato al singolo elemento trave, ed è il momento sollecitante. Ponendo il momento reagente di progetto pari a quello sollecitante si ottiene un dimensionamento pari al minimo indispensabile per resistere a tale sollecitazione, rimanendo fedeli a quanto prescritto in termini prestazionali all’interno delle NTC.

$$M_{rd} \geq M_{ed} \quad [C4.1.1 \text{ NTC2018}]$$

Il passaggio successivo è quello di calcolare l’armatura teorica in zona tesa, tale per cui si verifichi la condizione di stabilità dell’elemento.

La definizione dell’armatura in zona tesa deriva dalla relazione (7) precedentemente esplicitata:

$$A_s = \frac{\omega b d \sigma_c}{f_{yd}}$$

Anche in questo caso l’armatura in zona tesa dedotta è figlia di considerazioni a priori, tali per cui sia la minore possibile.

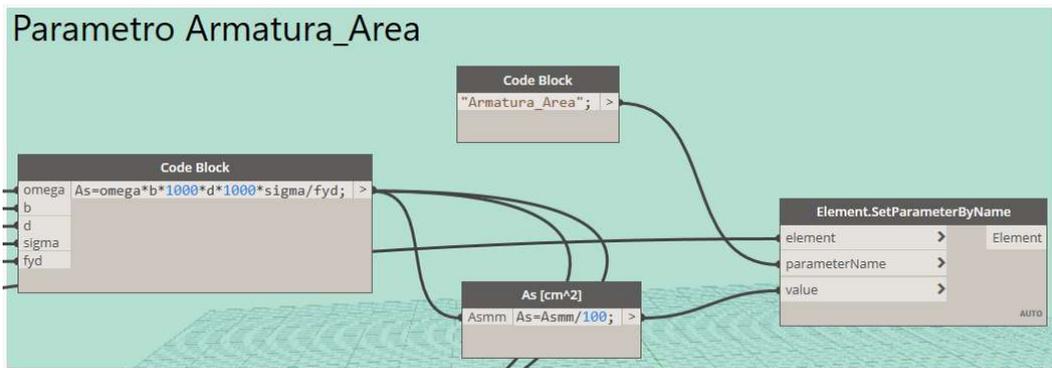


Figura 74 Calcolo dell'armatura teorica per ogni elemento trave

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ©

Il valore così ottenuto corrisponde all'armatura teorica necessaria all'interno di ogni trave, e viene compilato come parametro di progetto all'interno del modello Revit. Sempre tramite l'ausilio di Dynamo, viene poi valutato il diametro tale per cui la differenza tra armatura teorica e reale sia la minore possibile, dando però all'utente la possibilità di definire il range di diametri di armatura tra i quali valutare quello più adatto.

Il processo è di per sé semplice: viene calcolata l'armatura reale di tutte le travi in funzione di tutti i diametri proposti come input; dopodiché viene calcolato per ogni trave lo scarto tra armatura teorica e reale, per ogni diametro inserito.

La sommatoria di tutti gli scarti con valore minore determina il diametro di armatura tale per cui la quantità di armatura è globalmente ottimizzata all'interno della struttura.

Questo parametro fornisce unicamente un'indicazione di massima al progettista, il quale sarà poi libero di seguirla o di utilizzare il diametro che ritiene più opportuno.

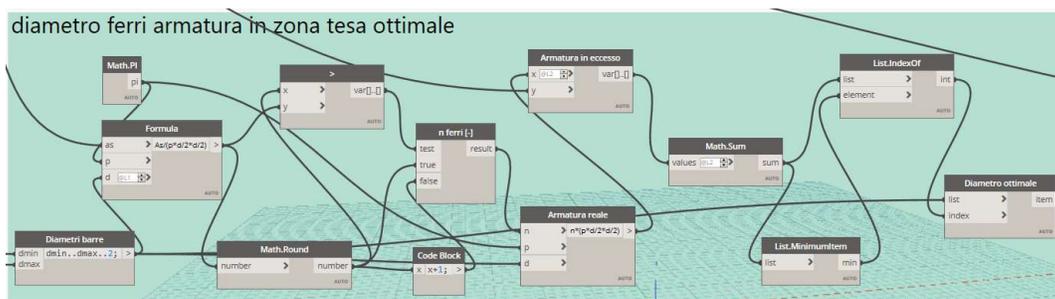


Figura 75 Script Determinazione del diametro di armatura ottimale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ©

4.3. Dimensionamento elementi pilastro

Il dimensionamento dei pilastri viene effettuato secondo quanto prescritto all'interno dell'Eurocodice 2, il quale impone che lo sforzo normale cui è soggetto il pilastro stesso sia assorbito dall'armatura longitudinale per una quota parte non inferiore al 10%.

Al fine di progettare il pilastro in condizioni più favorevoli rispetto al momento flettente che sollecita l'elemento, e per ottenere un'area di sezione di calcestruzzo minore, viene imposta preventivamente una percentuale pari al 15%, la quale però potrà essere facilmente modificata all'interno dello script Dynamo dall'utente, a seconda delle esigenze progettuali.

Così come si è operato per le travi, sono state per prima cosa definite le costanti di progetto in base alle quali lo script genererà il dimensionamento strutturale.

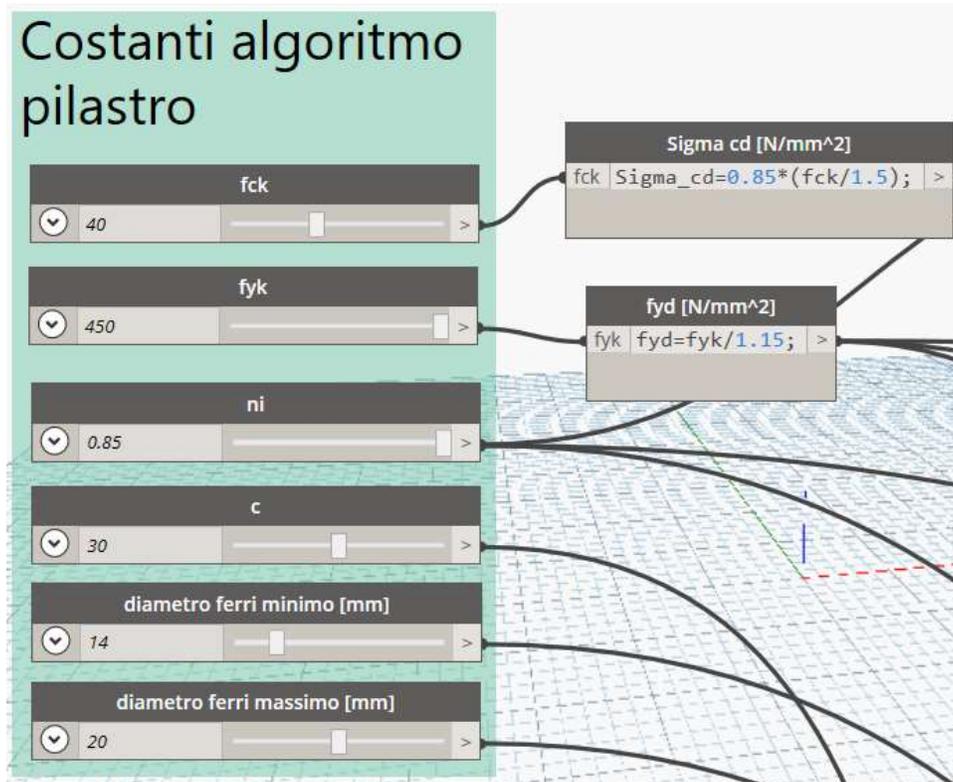


Figura 76 Costanti gestibili mediante script Dynamo

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ©

Per prima cosa viene valutata l'area minima di calcestruzzo della sezione del pilastro, in funzione dello sforzo normale agente.

$$A_{c,min} = \frac{vN}{\sigma_c}$$

Dove v rappresenta la percentuale di sforzo normale sopportata dalla sezione in calcestruzzo.

Da tale area deriva il lato minimo del pilastro, il quale viene approssimato per eccesso con passo pari a 5 cm.

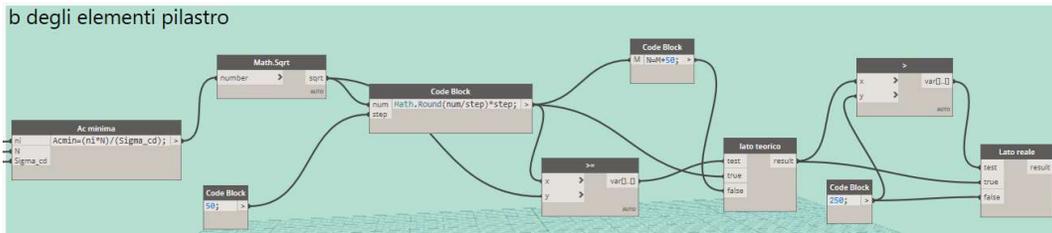


Figura 77 Dimensionamento della sezione del pilastro

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ®

Un'ulteriore prescrizione vieta che il lato di base del pilastro sia inferiore a 25 cm. Per questo motivo viene logicamente imposto che se un lato risulta inferiore a tale misura, questi venga posto uguale ad appunto 25 cm.

Una volta dimensionata l'area di calcestruzzo, il passaggio successivo è quello di definire l'area di armatura delle barre longitudinali.

Avendo definito una determinata percentuale di sforzo normale sopperita dal calcestruzzo, il dimensionamento dell'area di armatura minima viene eseguito di conseguenza.

$$A_{s,min} = \frac{(1 - v)N}{f_{yd}}$$

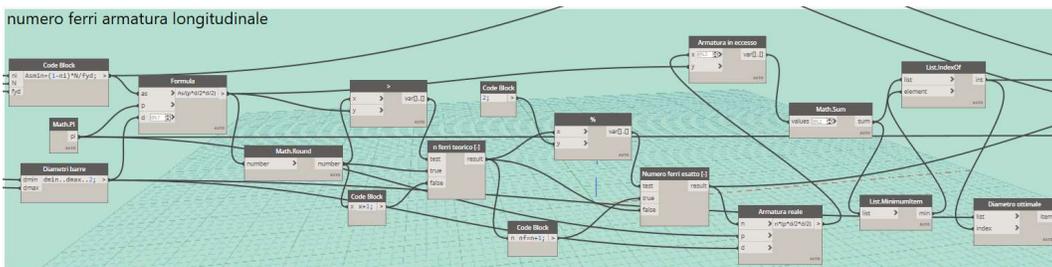


Figura 78 Script Dynamo per determinare il diametro di armatura ottimale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ®

Una volta determinata l'armatura teorica, mediante lo script è possibile definire il range dei diametri di armatura coi quali si intenderebbe armare i pilastri, per avere come output, così come già visto per le travi, il diametro di armatura tale per cui la differenza tra armatura teorica e reale sia globalmente il minore possibile.

La determinazione del numero di barre è effettuata imponendo un minimo di 4 barre di armatura ed aumentando di 2 in 2 il numero fino a soddisfare la condizione di armatura minima.

A questo punto il pilastro è dimensionato rispetto allo sforzo normale agente.

Il momento resistente viene valutato mediante la formula della capacità portante e confrontato con il momento sollecitante al fine di verificare l'elemento anche alla componente di flessione cui è soggetto. Considerando il maggiore dei due momenti agenti la verifica risulterà soddisfatta per entrambi data la simmetria della sezione progettata.

$$M_{rd} = 0,9(b - c)A_s f_{yd} \geq M_{ed}$$

Se la relazione non risulta soddisfatta l'area di armatura viene rivalutata in funzione del momento sollecitante.

4.4. Importazione dei risultati del dimensionamento strutturale in Revit

Una volta ottenuti i risultati relativi al dimensionamento degli elementi strutturali, questi ultimi vengono automaticamente riportati all'interno del modello strutturale in Revit.

Ogni istanza presente nel modello viene automaticamente assegnata al tipo corretto, e se quest'ultimo non esiste ancora all'interno del modello, viene generato ad hoc dallo script.



Figura 79 Generazione nuovi tipi e assegnazione alle istanze

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ©

I nuovi tipi presentano la medesima nomenclatura di quelli già esistenti e vengono generati per duplicazione.

Vengono assegnati loro i parametri di tipo relativi a base e altezza dell'elemento e, in questo modo, avviene l'aggiornamento del modello dal punto di vista grafico e geometrico.

I parametri relativi all'armatura e alla verifica strutturale sono invece parametri di istanza, perché sono differenti per ogni elemento.

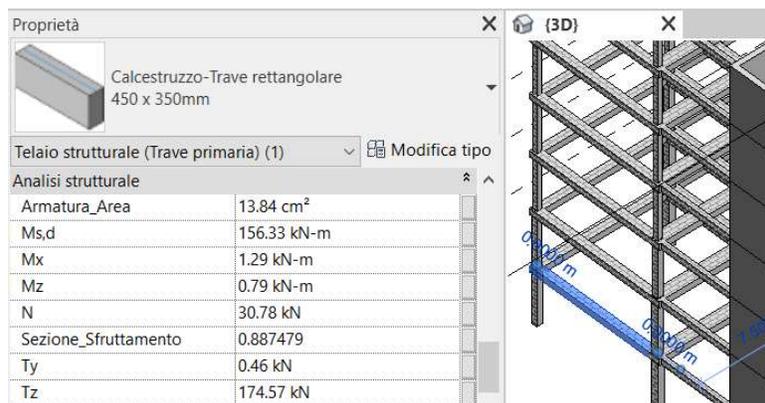


Figura 80 Visualizzazione dei parametri di progetto in Revit

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

L'armatura importata in Revit è quella minima derivante dal calcolo. Questa scelta deriva dal fatto che, essendo questo script concepito come uno strumento di aiuto al predimensionamento strutturale, pur fornendo indicazioni in merito al diametro ottimale, risulta più corretto inserire un dato progettuale sulla base del

quale sarà compito del progettista effettuare considerazioni a posteriori, al fine di effettuare il vero e proprio progetto dell'armatura.

Il secondo parametro inserito è legato allo sfruttamento della sezione, e deriva da un confronto tra lo sforzo sollecitante di progetto e lo sforzo resistente calcolato al termine del predimensionamento. Avendo utilizzato le sollecitazioni per la determinazione delle dimensioni minime degli elementi, e avendo poi approssimato per eccesso tali valori, il rapporto tra i due risulterà certamente inferiore a 1, e quindi l'elemento strutturale risulterà in prima istanza verificato. Risulta però interessante poter effettuare una rapida valutazione visiva al fine di comprendere quanto tale arrotondamento incida sull'ottimizzazione degli elementi strutturali.

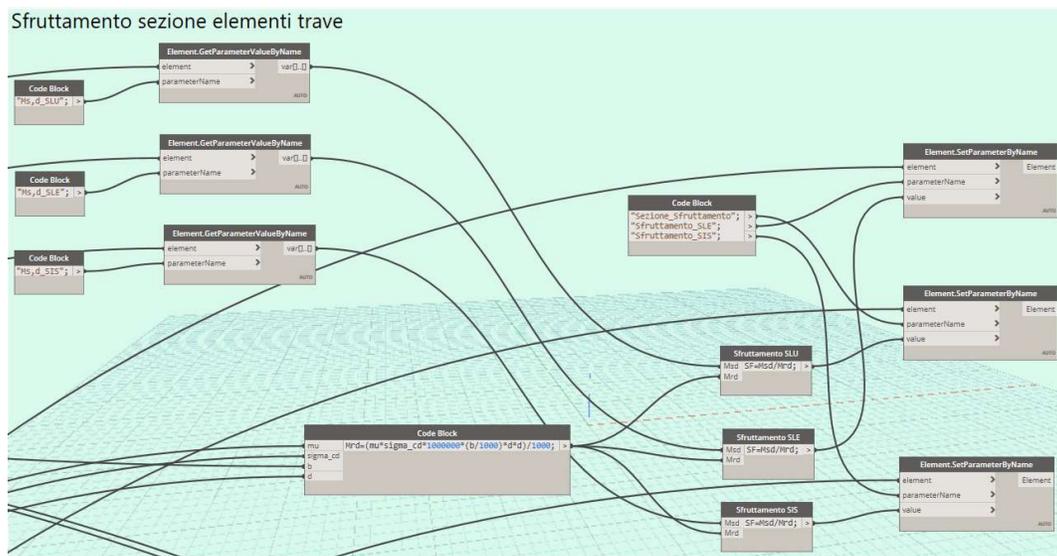


Figura 81 Compilazione del parametro relativo all'indice di sfruttamento

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Dynamo ©

È stata quindi predisposta una vista 3D, alla quale sono stati applicati dei filtri che colorano gli elementi strutturali in funzione del parametro "Sezione_Sfruttamento", il quale è compilato sempre mediante Dynamo al termine del processo di dimensionamento, valutando appunto il rapporto tra azione sollecitante e azione resistente.

Nome	Visibilità	Proiezione/Superficie			Taglio		Mezzitoni
		Linee	Motivi	Trasparenza	Linee	Motivi	
Sfruttamento 60%	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
Sfruttamento 60%-70%	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
Sfruttamento 70%-80%	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
Sfruttamento 80%-95%	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
Sfruttamento 95%-99%	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
Sfruttamento +99%	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>

Figura 82 Filtri di visualizzazione dello sfruttamento degli elementi

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Lo sfruttamento della sezione viene valutato in funzione del momento di progetto, pari al massimo tra quelli calcolati, cioè quelli corrispondenti alle combinazioni SLU, SLE e sismica.

Vengono però calcolati anche i parametri di sfruttamento rispetto alle altre sollecitazioni calcolate, perché sono informazioni che è bene contenere all'interno del modello per le fasi di progetto strutturale successive.

Tramite la vista 3D con filtri applicati è possibile valutare celermente l'impatto che ha sulla struttura la modifica di una o più delle costanti di progetto in input, e di conseguenza scegliere la configurazione strutturale apparentemente migliore.

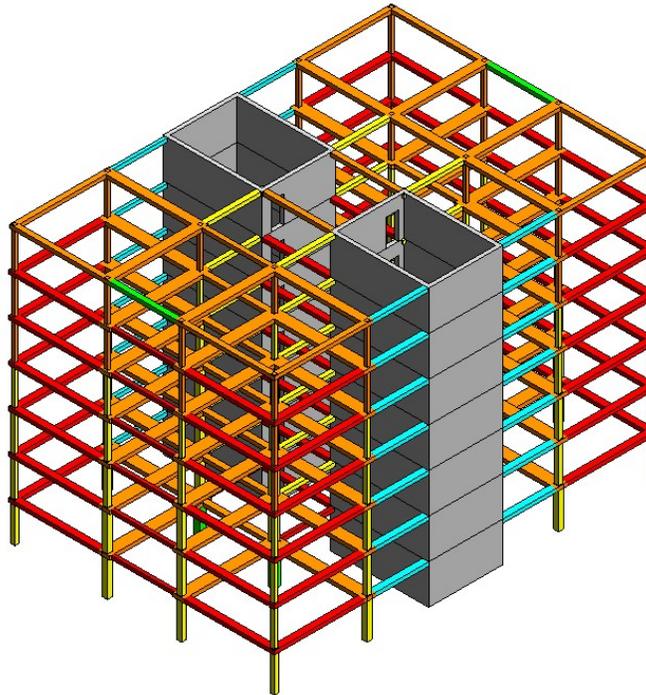


Figura 83 Schema a colori per la valutazione dello sfruttamento della struttura

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

5. Casi studio

Al fine di valutare l'applicabilità del processo ideato, sono stati individuati tre diversi casi studio sui quali applicarlo. La scelta è stata effettuata tenendo conto della destinazione d'uso degli edifici, in modo da valutare anche l'adattabilità del processo a differenti tipologie progettuali.

5.1. Caso studio 1: Edificio commerciale

L'edificio commerciale analizzato è il blocco D del complesso dei Docks Dora.

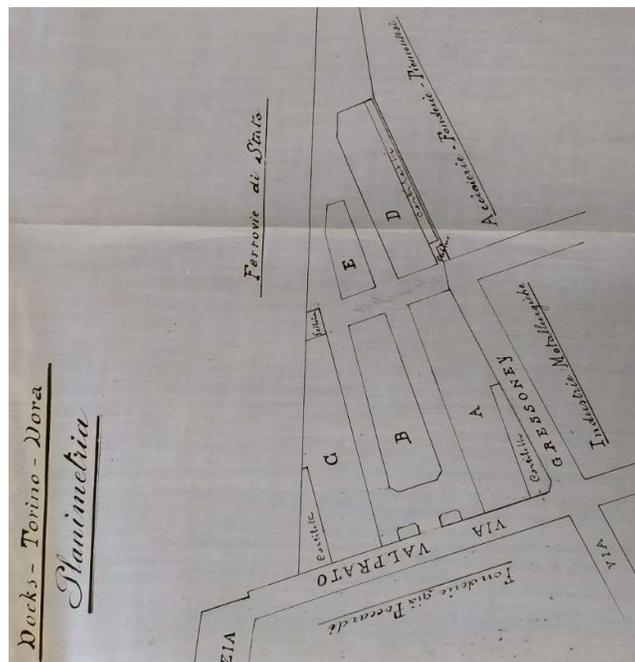


Figura 84 Planimetria di progetto del complesso dei Docks Dora

FONTE: Archivio Porcheddu del Politecnico di Torino

Sono state prese in considerazione le geometrie dell'edificio e i pacchetti stratigrafici che lo compongono, per effettuare l'analisi dei carichi. Dopodiché si è proceduto ipotizzando la costruzione ex novo di un edificio con le medesime caratteristiche dimensionali.

L'impalcato di piano si sviluppa prettamente in una direzione, riproponendo molteplici volte la medesima configurazione strutturale, composta da tre orditure di luce variabile.

Il lato corto dell'edificio misura 19 metri, mentre il lato lungo si estende per 70 metri riproponendo come detto la medesima configurazione strutturale con un passo di 5 m.

L'edificio si sviluppa su due livelli fuori terra più uno interrato e lo scheletro portante è interamente composto da travi e pilastri in cemento armato con solai laterocementizi. Le tamponature sono in mattoni pieni, così come le partizioni interne.

I pilastri hanno a tutta altezza sezione 45x45 cm, mentre le travi presentano sezioni molto ripetitive. Lungo l'orditura principale, parallela al lato lungo e perimetralmente hanno sezione 30x50 cm, mentre lungo l'orditura secondaria la sezione si riduce a 20x40 cm. Non si ravvisano restringimenti di sezione tra i diversi impalcati di piano.

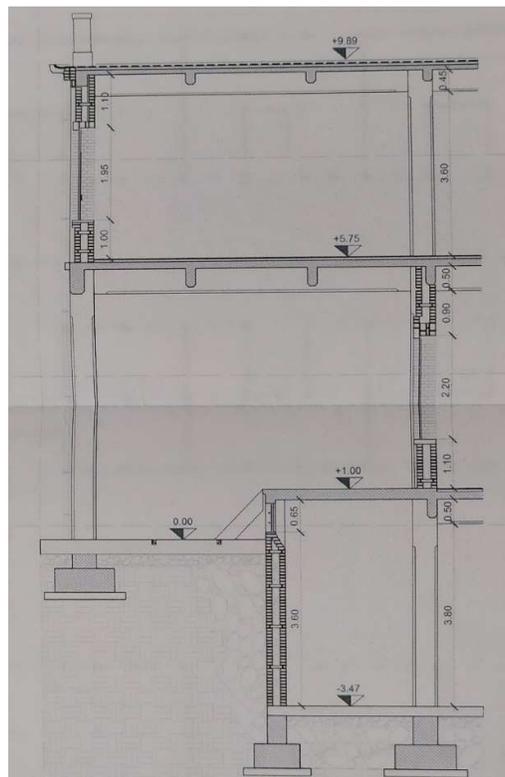


Figura 85 Sezione tipo del complesso

FONTE: Archivio della Biblioteca Centrale di Architettura del Politecnico di Torino

In virtù degli elaborati grafici reperiti presso l'Archivio Porcheddu e visionati presso la Biblioteca Centrale di Architettura, è stato possibile riprodurre in BIM il corpo dei Docks Dora.

Il complesso fu progettato dall'Ingegnere Porcheddu, concessionario del metodo Hennebique per il nord Italia, mediante l'omonimo brevetto.

Tale metodo consiste in uno dei primi esempi di progettazione in calcestruzzo armato, mediante formule empiriche studiate e progettate dallo stesso Hennebique. La riprogettazione secondo la normativa vigente consente quindi, tra l'altro, uno stimolante confronto tra un metodo vecchio ormai di più di un secolo, e la disciplina attuale.

5.1.1. Analisi dei carichi

L'analisi dei carichi, utile alla definizione dell'azione sollecitante, è stata parzialmente definita in funzione dei pacchetti stratigrafici dedotti dagli elaborati grafici consultati e in parte, come descritto all'interno del capitolo 2, demandata al software di calcolo.

Il peso proprio degli elementi strutturali trave e pilastro viene automaticamente calcolato da Robot in funzione dei parametri dimensionali degli elementi, mentre per quanto concerne i solai, questi ultimi sono stati valutati mediante l'inserimento all'interno del modello di carichi su area.

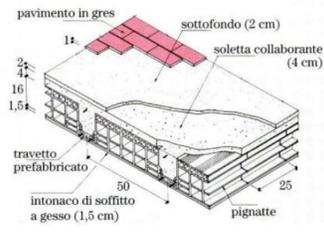
6 Solai in c.a e laterizi a travetti prefabbricati (16+4)		3.20 kN/m ²
	<ul style="list-style-type: none"> Pignatte con travetti prefabbricati posti a $i=50$ cm (peso=0.075 kN/m²/cm) 16×0.075 	1.20 kN/m ²
	<ul style="list-style-type: none"> Soletta collaborante non armata (4 cm) $1.00 \times 1.00 \times 0.04 \times 24$ 	0.96 kN/m ²
	<ul style="list-style-type: none"> Intonaco soffitto in gesso (1.5 cm) $1.00 \times 1.00 \times 0.015 \times 12.00$ 	0.18 kN/m ²
	<ul style="list-style-type: none"> Massetto in malta di cemento (2 cm) $1.00 \times 1.00 \times 0.02 \times 21.00$ 	0.42 kN/m ²
	<ul style="list-style-type: none"> Pavimento in gres ceramico (1 cm) 	0.40 kN/m ²

Figura 86 Analisi dei carichi del pacchetto solaio

FONTE: Slides del corso di Costruzioni Edili, Zanghi, 2011

Del pacchetto rappresentato in figura, la parte inerente al peso della componente strutturale è stato valutato come G1, mentre la parte di sottopavimentazione e pavimentazione come G2.

Data la similitudine tra i pacchetti dei solai di interpiano e quello della copertura, è stato utilizzato il medesimo peso per tutti i pacchetti.

La restante componente dell'azione G2, corrispondente ai tramezzi interni e agli impianti, è stata valutata come carico distribuito sulla superficie degli impalcati, così come stabilito dalle NTC 2018 par. 3.1.3, con intensità pari a 1,2 kN/m².

La muratura perimetrale è stata valutata come carico lineare in funzione dell'altezza di interpiano, a partire da un carico pari a 3,4 kN/m² di superficie verticale. Sul primo solaio grava quindi un carico lineare di intensità pari a 16,16 kN/m, mentre sul secondo solaio pari a 14,76 kN/m.

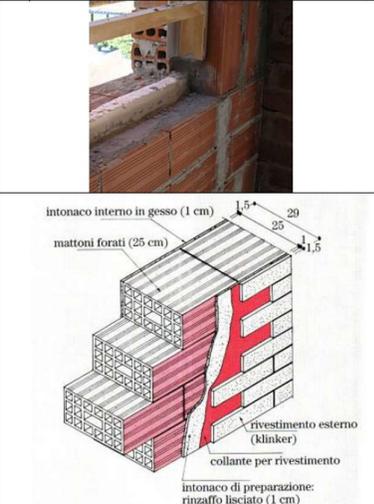
4 Muratura di mattoni forati (29 cm)		3.40 kN/m ²
	<ul style="list-style-type: none"> Rivestimento in clinker (1.5 cm) 1.00 x 1.00 x 0.015 x 17.00 Collante per laterizio (4 cm) Intonaco di rinzaffo (1 cm) 1.00 x 1.00 x 0.01 x 19.00 Mattoni forati (25 cm) 1.00 x 1.00 x 0.25 x 11.00 Intonaco interno a gesso (1.5 cm) 1.00 x 1.00 x 0.015 x 12.00 	0.255 kN/m ² 0.005 kN/m ² 0.19 kN/m ² 2.75 kN/m ² 0.18 kN/m ²

Figura 87 Analisi dei carichi della muratura perimetrale non portante

FONTE: Slides del corso di Costruzioni Edili, Zanghi, 2011

L'azione della neve è stata valutata considerando l'effettiva posizione geografica del manufatto, situato a Torino.

L'azione neve è valutabile secondo la seguente formula tratta dalle NTC 2018:

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_E \cdot C_t \quad [NTC 2018 \text{ par. } 3.4.1]$$

q_{sk} è il valore di riferimento del carico della neve al suolo, ed è valutato in funzione della posizione geografica e dell'altitudine del manufatto. In questo caso ci si trova in zona 1, ad altitudine inferiore a 200 m s.l.m. ed è quindi pari a 1,50 kN/m².

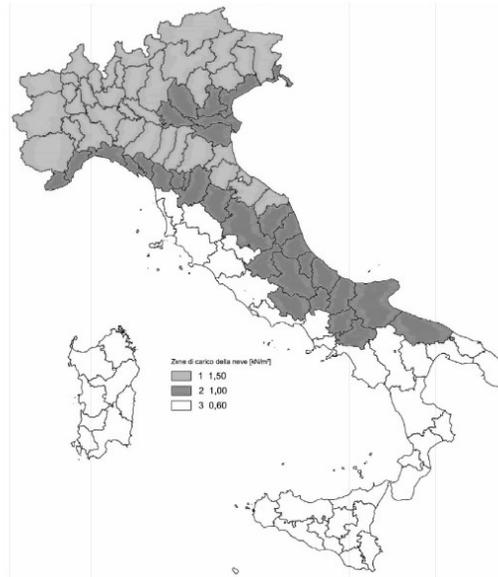


Figura 88 Zone di carico della neve

FONTE: NTC 2018, par. 3.4.1

μ_i è il coefficiente di forma della copertura. Il presente caso studio è dotato di copertura piana e pertanto μ_i è pari a 0,8.

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_i	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

Figura 89 Valori del coefficiente di forma

FONTE: NTC 2018, par. 3.4.1

C_E è il coefficiente di esposizione e tiene conto della conformazione dell'area in cui sorge l'edificio.

Topografia	Descrizione	C_E
Battuta dai venti	Aree pianeggianti non ostruite esposte su tutti i lati, senza costruzioni o alberi più alti	0,9
Normale	Aree in cui non è presente una significativa rimozione di neve sulla costruzione prodotta dal vento, a causa del terreno, altre costruzioni o alberi	1,0
Riparata	Aree in cui la costruzione considerata è sensibilmente più bassa del circostante terreno o circondata da costruzioni o alberi più alti	1,1

Figura 90 Valori di C_E per diverse classi di esposizione

FONTE: NTC 2018, par. 3.4.4

C_t è il coefficiente termico e tiene conto della capacità del manufatto di sciogliere più velocemente i depositi di neve a causa di una maggiore dispersione di calore. La normativa prescrive di porlo uguale a 1 se, come in questo caso, non sono presenti studi specifici a tale riguardo.

Una volta determinati tutti i coefficienti è possibile valutare il valore da attribuire all'azione neve, che in questo caso è pari a 1,2 kN/m².

Mediante l'ausilio di Robot, è stata valutata l'azione del vento.

All'interno del software è necessario inserire due valori di riferimento in funzione dei quali viene calcolata la sollecitazione come carico statico equivalente applicato agli elementi strutturali.

Il primo corrisponde alla quota del piano di campagna rispetto ai piani di progetto impostati sul modello, mentre il secondo è la velocità di riferimento.

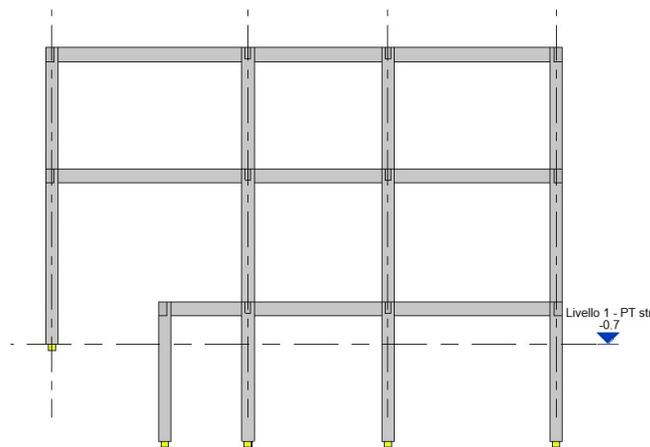


Figura 91 Piano di campagna sul modello strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Impostando correttamente la quota del piano di campagna Robot saprà quali elementi sono effettivamente lambiti dal vento e quali invece no.

La velocità base di riferimento del vento, in assenza di indagini statistiche, è funzione di una formula tratta dalle NTC 2018.

$$V_b = V_{b,0} \cdot C_a$$

$V_{b,0}$ è la velocità base di riferimento al livello del mare, mentre C_a è il coefficiente di altitudine, fornito dalla seguente relazione:

$$c_a = 1 \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m} \quad \text{[NTC 2018, par. 3.3.1.b]}$$

Tutti i parametri qui descritti sono tratti dalla seguente tabella contenuta nelle NTC 2018.

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

Figura 92 Valori dei parametri $V_{b,0}$, a_0 , k_s

FONTE: NTC 2018, par. 3.3.1

Una volta definito V_b , in questo caso pari a 25 m/s, i dati inseriti all'interno di Robot forniscono in output l'analisi dell'azione del vento e la rispettiva azione statica sugli elementi strutturali.

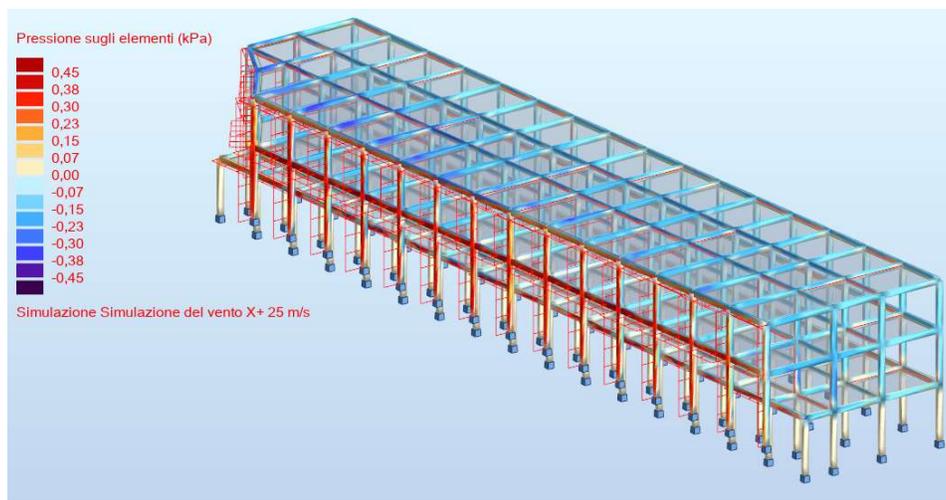


Figura 93 Rappresentazione in schema colore dell'azione del vento

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ®

A questo punto è possibile inserire il vento assieme alle altre azioni per la definizione delle combinazioni.

Infine, è stata valutata l'azione derivante dal sovrappollamento, attraverso le NTC 2018 e in funzione della destinazione d'uso della struttura.

Cat.	Ambienti	q _k [kN/m ²]	Q _k [kN]	H _k [kN/m]
D	Ambienti ad uso commerciale			
	Cat. D1 Negozi	4,00	4,00	2,00
	Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini	5,00	5,00	2,00
	Scale comuni, balconi e ballatoi	Secondo categoria d'uso servita		
E	Aree per immagazzinamento e uso commerciale ed uso industriale			
	Cat. E1 Aree per accumulo di merci e relative aree d'accesso, quali biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri	≥ 6,00	7,00	1,00*
	Cat. E2 Ambienti ad uso industriale	da valutarsi caso per caso		
F-G	Rimesse e aree per traffico di veicoli (esclusi i ponti)			
	Cat. F Rimesse, aree per traffico, parcheggio e sosta di veicoli leggeri (peso a pieno carico fino a 30 kN)	2,50	2 × 10,00	1,00**
	Cat. G Aree per traffico e parcheggio di veicoli medi (peso a pieno carico compreso fra 30 kN e 160 kN), quali rampe d'accesso, zone di carico e scarico merci.	da valutarsi caso per caso e comunque non minori di		
H-I-K	Coperture			
	Cat. H Coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione	0,50	1,20	1,00
	Cat. I Coperture praticabili di ambienti di categoria d'uso compresa fra A e D	secondo categorie di appartenenza		
	Cat. K Coperture per usi speciali, quali impianti, eliporti.	da valutarsi caso per caso		

Figura 94 Valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso delle costruzioni

FONTE: NTC 2018, par. 3.1.4

Per i solai di interpiano è stata scelta la categoria D, alla quale corrisponde un carico da folla pari a 4 kN/m², mentre per la copertura, essendo accessibile solo ai fini manutentivi, è stata scelta la categoria H, alla quale corrisponde un carico da folla pari a 0,50 kN/m².

Infine, sono stati definiti i parametri legati alla simulazione dell'azione sismica. Per prima cosa è stata valutata la possibilità di effettuare l'analisi sismica mediante il metodo delle forze equivalenti.

Il periodo T₁ di riferimento è stato valutato come da prescrizione dell'EC8, considerando un'altezza complessiva del fabbricato pari a 14 m.

$$T_1 = 0,075 \cdot 14^{3/4} = 0,54 \text{ s} < \begin{cases} 2,0 \text{ s} \\ 4 \cdot 0,25 \text{ s} \end{cases}$$

Il secondo criterio, legato alla regolarità in pianta e in altezza risulta soddisfatto inquanto non vi sono sostanziali differenze né di dimensioni, né di forma, né di rigidezza tra i vari impalcati di piano. Il rapporto tra i lati di base dell'edificio risulta inferiore a 4, valore imposto da EC8 par.4.2.3.2, pertanto anche la regolarità in pianta risulta verificata.

5.1.2. Dimensionamento degli elementi strutturali

Una volta espletato il calcolo delle sollecitazioni queste ultime sono state reimportate all'interno del modello Revit, secondo la procedura descritta nel capitolo 3.

Successivamente è stato applicato lo script Dynamo per l'ottimizzazione strutturale, al fine di vagliare la possibilità di ridurre la sezione utile degli elementi trave.

Lo scopo di tale riduzione di altezza è quello di ottenere una configurazione degli impalcati di piano tale da ridurre l'interferenza rispetto all'eventuale componente impiantistica inseribile a controsoffitto, riducendo l'altezza delle travi da 50 cm a 30 cm.

L'applicazione dello script ha fornito come output la configurazione delle travi in funzione del momento massimo calcolato in mezzeria e quella dei pilastri rispetto allo sforzo normale e al momento flettente massimi agenti.

L'obiettivo dichiarato è quello di ottenere una configurazione strutturale efficace, ma comunque il più possibile ottimizzata.

In questo senso, sempre mediante lo script, è possibile valutare quale classe di calcestruzzo concorre più efficacemente al raggiungimento dell'obiettivo. Nel caso in esame è risultato opportuno utilizzare un calcestruzzo C25/30 sia per i pilastri che per le travi.

Una volta terminata la fase di dimensionamento e il calcolo dell'armatura minima, è stato richiesto allo script il diametro di armatura per travi e pilastri tale da ottenere una discrepanza minima tra armatura teorica e reale, nella globalità del progetto.

Il risultato fornito dallo script, cioè di utilizzare ferri $\varnothing 14$ per i pilastri e $\varnothing 12$ per le travi, verrà confermato dalle verifiche strutturali descritte nel capitolo 6.

In ultima istanza è stata valutata la percentuale di sfruttamento complessiva della struttura, mediante una vista 3D appositamente impostata in Revit mediante filtri di vista.

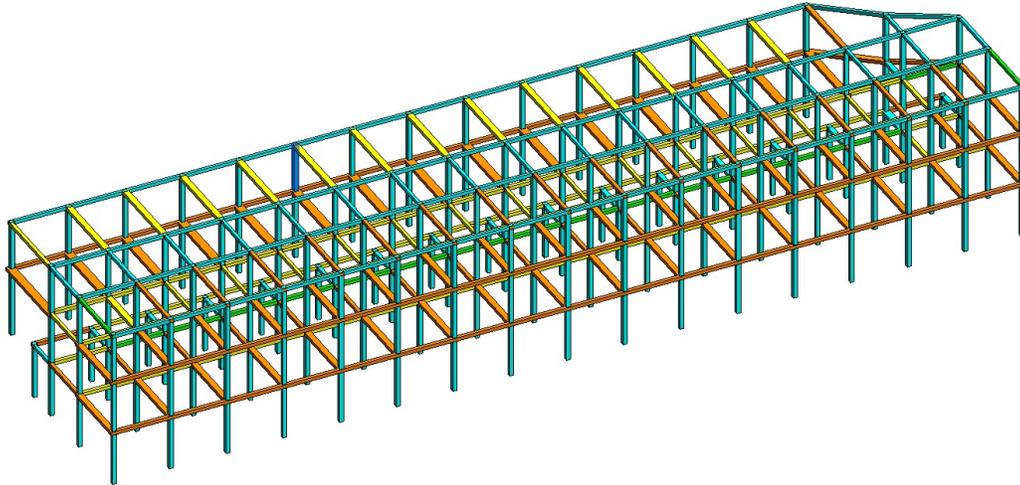


Figura 95 Mappa colore dello sfruttamento degli elementi strutturali

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

I risultati ottenuti denunciano come le travi dei primi due impalcati siano quelle maggiormente sollecitate, mentre quelle della copertura risultano in generale più scariche.

I pilastri invece, risultano tutti adeguatamente predimensionati.

5.2. Caso studio 2: Edificio residenziale

Il secondo caso al quale è stato applicato il processo di predimensionamento è un complesso residenziale composto da 7 piani fuori terra, anch'esso con struttura portante in calcestruzzo armato. Il progetto deriva da un caso studio della Fondazione Promozione Acciaio, la quale propone diverse soluzioni tecnologiche per il progetto del presente edificio, una delle quali è stata analizzata nel presente elaborato. Le travi sono inizialmente tutte di sezione 50x30 cm mentre i setti sono spessi 30 cm. I pilastri hanno inizialmente tutti sezione 50x50 cm. Il tetto è composto da una copertura piana estensiva.

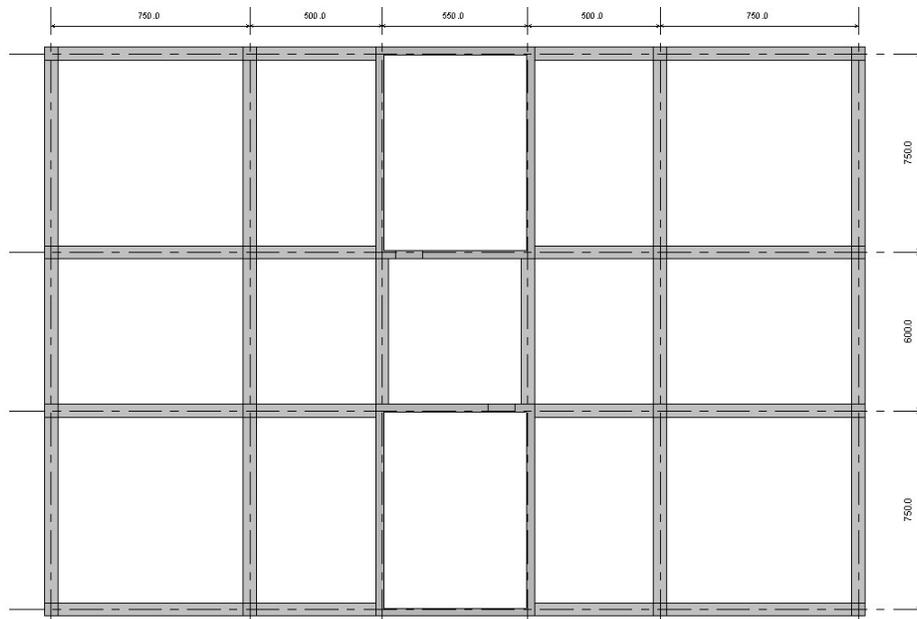


Figura 96 Vista in pianta del piano tipo

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

La peculiarità del caso studio risiede nella presenza di setti che cingono i due vani scale e ascensore, i quali essendo chiaramente molto rigidi assorbono gran parte della sollecitazione agente, provocando grosse differenze rispetto alle sollecitazioni agenti sia sui pilastri che sulle travi, nonostante la forte simmetria in pianta dell'edificio.

5.2.1. *Analisi dei carichi e delle sollecitazioni*

I pacchetti stratigrafici e di conseguenza i pesi propri portati sono definiti dal progetto oggetto del caso studio. Il carico permanente G1 del solaio di interpiano è pari a 7,50 kN/m², mentre la componente architettonica rappresentata da tramezzi, impianti e finitura è pari a 3,8 kN/ m².

La muratura perimetrale comporta un carico di 1 kN/m², e pertanto è stata valutata mediante un carico lineare di intensità pari a 3,2 kN/m applicato sulle travi di bordo.

L'azione della neve è stata valutata come per il caso studio precedente, e ipotizzando come sito per la costruzione Torino anche in questo caso. Pertanto, l'azione della neve è stata stimata pari a 1,2 kN/m².

L'azione del vento è stata valutata, come nel caso precedente, mediante l'ausilio di Robot.

Una volta impostate la velocità di riferimento e l'altezza del piano di campagna, è stato demandato al software il calcolo del carico statico equivalente applicabile agli elementi strutturali.

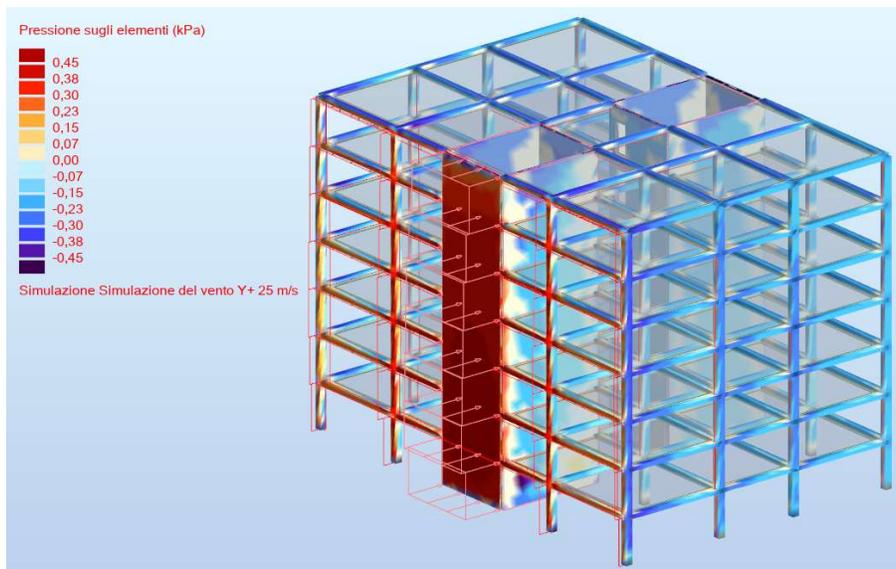


Figura 97 Rappresentazione in schema colore dell'azione del vento

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ®

In ultima istanza è stata valutata l'azione derivante dal sovraffollamento, che per edifici di categoria B come quello in oggetto è pari a 2 kN/m². In questo caso è stata adottata anche per la copertura essendo un tetto piano con verde estensivo, e quindi praticabile non solo ai fini manutentivi.

Il periodo T₁ di riferimento è stato valutato come da prescrizione dell'EC8, considerando un'altezza complessiva del fabbricato pari a 22,4 m.

$$T_1 = 0,075 \cdot 22,4^{3/4} = 0,77 \text{ s} < \begin{cases} 2,0 \text{ s} \\ 4 \cdot 0,25 \text{ s} \end{cases}$$

Il secondo criterio, legato alla regolarità in pianta e in altezza risulta soddisfatto inquanto non vi sono sostanziali differenze né di dimensioni, né di forma, né di rigidità tra i vari impalcati di piano. Il rapporto tra i lati di base dell'edificio risulta inferiore a 4, valore imposto da EC8 par.4.2.3.2, pertanto anche la regolarità in pianta risulta verificata.

5.2.2. *Dimensionamento degli elementi strutturali*

Il dimensionamento degli elementi strutturali è stato espletato esattamente come per il caso precedente, mediante il medesimo script Dynamo. In questo caso era necessario mantenere la medesima impostazione progettuale per quanto concerne le travi, dato che queste ultime dovevano necessariamente essere in spessore di solaio, con altezza quindi pari a 30 cm.

Essendo però i pilastri a sezione costante pari a 50x50 cm, risultava chiaramente interessante valutare la concreta possibilità di rastremarne la sezione lungo lo sviluppo in altezza.

Al fine di ottenere la configurazione strutturale desiderata, è risultato necessario utilizzare un calcestruzzo di classe C40/45 sia per i pilastri che per le travi.

L'ipotesi progettuale a monte prevedeva di utilizzare un calcestruzzo meno performante, ma soprattutto per i pilastri, volendo ottenere una significativa riduzione di volume, si è deciso di utilizzarne uno di classe superiore.

Relativamente ai ferri di armatura, risultano maggiormente indicati i ferri Ø14 sia per le travi che per i pilastri. Anche in questo caso, il dato ottenuto sarà verificato nel capitolo 6.

In ultima istanza è stata valutata la percentuale di sfruttamento complessiva della struttura, mediante una vista 3D appositamente impostata in Revit mediante filtri di vista.

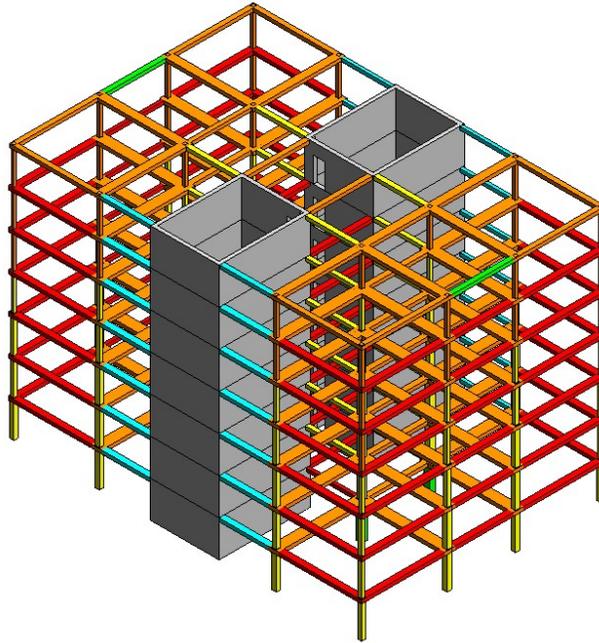


Figura 98 Mappa colore dello sfruttamento degli elementi strutturali

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

In questa vista si evince chiaramente come la distribuzione delle sollecitazioni sia molto simmetrica e inoltre, come diminuisca nei pressi dei setti, i quali assorbono gran parte della sollecitazione, sgravando gli elementi strutturali limitrofi. Come si vedrà nel capitolo relativo alle verifiche strutturali è risultato possibile ottimizzare notevolmente i pilastri tra un piano e il successivo, mentre le travi hanno mantenuto la medesima sezione sul lato corto, pari a 50x30 cm e sono risultati sufficienti di sezione 40x30 cm sul lato lungo.

5.3. Caso studio 3: Edificio scolastico

Il terzo ed ultimo caso studio analizzato è stato reperito da un articolo della software house ACCA, la quale presentava un progetto tipo per un edificio a destinazione d'uso scolastica.



Figura 99 Render dell'edificio scolastico

FONTE: <https://bim.acca.it/progetti-edifici-scolastici/>

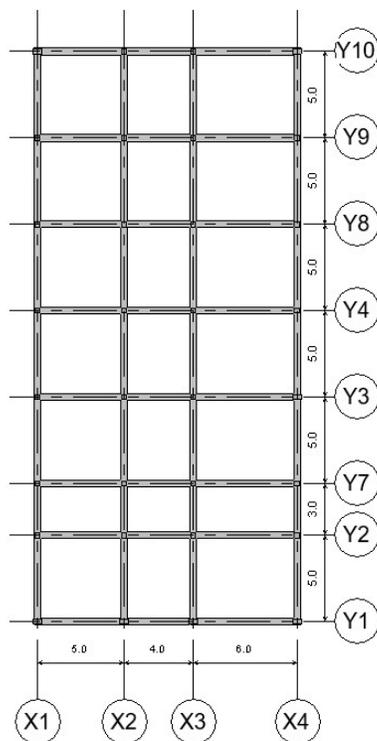


Figura 100 Maglia strutturale dell'edificio scolastico

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

L'edificio, a pianta rettangolare, è sviluppato su due piani fuori terra.

Le dimensioni degli elementi strutturali che compongono l'edificio sono state dedotte dagli elaborati progettuali disponibili.

I pilastri ad angolo presentano sezione 30x40 cm mentre tutti gli altri pilastri hanno sezione 30x30 cm. Le travi hanno tutte sezione 40x30 cm e sono in spessore di solaio.

5.3.1. Analisi dei carichi e delle sollecitazioni

Anche in questo caso l'analisi dei carichi era già presente all'interno degli elaborati del caso studio. I solai di interpiano comportano un'azione G1 pari a 3,2 kN/m², mentre tramezzi impianti e finiture determinano un'azione G2 di 3 kN/m². Solo la muratura perimetrale è stata computata singolarmente, mediante un carico lineare pari a 2 kN/m², che in funzione dell'altezza di interpiano è stato valutato pari a 6 kN/m.

Ipotizzando che l'edificio sorga a Torino, le ipotesi progettuali alla base sono le medesime e pertanto il carico da vento è pari a 1,2 kN/m².

Il carico derivante dall'affollamento per edifici in categoria C1 è pari a 3 kN/m², mentre per la copertura inclinata non praticabile, in categoria H, si considera solo il carico da manutenzione pari a 0,5 kN/m².

Il carico del vento è stato valutato, come per i casi studio precedenti, tramite Robot, imponendo anche in questo caso la velocità di riferimento del vento e l'altezza del piano di campagna.

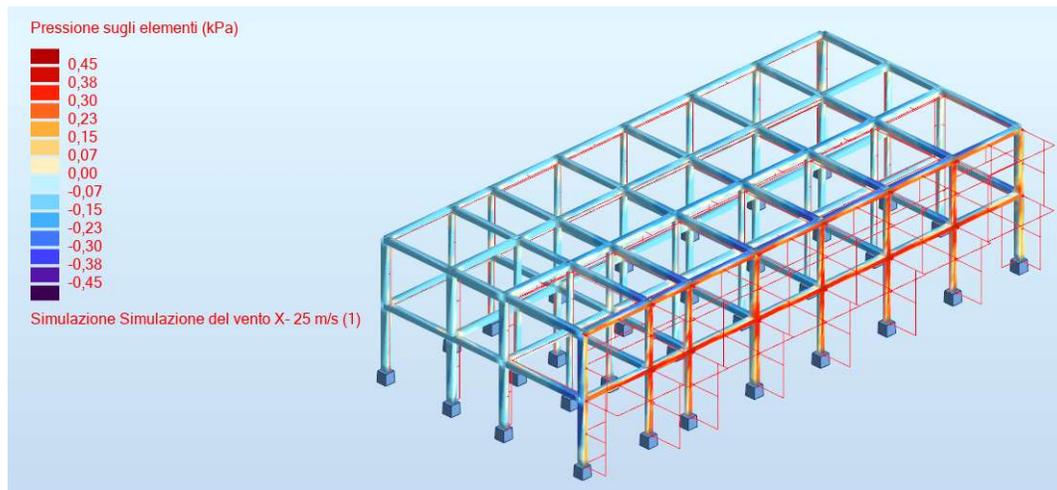


Figura 101 rappresentazione in schema colore dell'azione del vento

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Robot ®

Il periodo T_1 di riferimento è stato valutato come da prescrizione dell'EC8, considerando un'altezza complessiva del fabbricato pari a 22,4 m.

$$T_1 = 0,075 \cdot 8^{3/4} = 0,36 \text{ s} < \begin{cases} 2,0 \text{ s} \\ 4 \cdot 0,25 \text{ s} \end{cases}$$

Il secondo criterio, legato alla regolarità in pianta e in altezza risulta soddisfatto inquanto non vi sono sostanziali differenze né di dimensioni, né di forma, né di rigidezza tra i vari impalcati di piano.

Il rapporto tra i lati di base dell'edificio risulta inferiore a 4, valore imposto da EC8 par.4.2.3.2, pertanto anche la regolarità in pianta risulta verificata.

5.3.2. Dimensionamento degli elementi strutturali

L'edificio scolastico analizzato presenta, così come l'edificio residenziale, travi in spessore di solaio. In generale si tratta di una struttura di per sé abbastanza esile e dove non si evincono a priori possibilità concrete di diminuzione sostanziale delle sezioni. Da questo punto di vista il caso in esame risulta ancora più interessante, perché è possibile esplorare la possibilità di una diversa configurazione strutturale a partire da una che appare comunque già efficace.

Effettivamente le variazioni strutturali si sono dimostrate meno importanti rispetto a quelle dei due casi precedenti, ma comunque è stato possibile ottenere una riduzione volumetrica significativa.

In merito all'impiego di materiali utilizzati, dato lo scarso peso degli impalcati, ma la loro notevole estensione di campata, sono risultate in proporzione ben più sollecitate le travi che non i pilastri. Per questo motivo, sempre al fine di ottenere una configurazione volumetrica complessivamente soddisfacente, sono stati adottati calcestruzzi di classe differente: rispettivamente C 35/47 per le travi e C25/30 per i pilastri.

In merito ai ferri di armatura, sono risultati in prima istanza ottimali ferri $\varnothing 12$ per le travi e ferri $\varnothing 14$ per i pilastri e, come già detto per i casi studio precedenti, tale assunzione sarà verificata nel capitolo 6.

Come per i casi precedenti è stato poi valutato il comportamento globale della struttura anche nei confronti delle azioni sollecitanti.

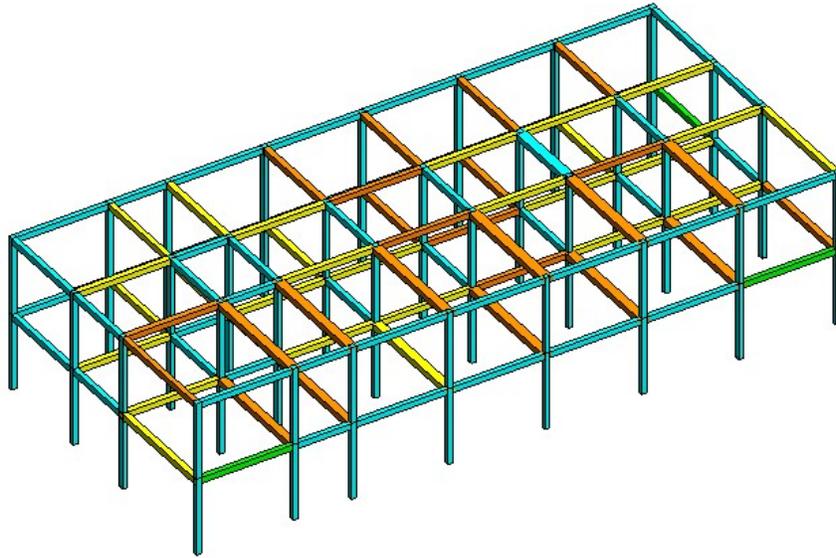


Figura 102 Mappa colore dello sfruttamento degli elementi strutturali

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Come già accennato, per quest'ultimo caso studio non era definibile a priori una strategia univoca di intervento, perché la struttura appariva già sufficientemente esile. L'applicazione dello script ha comunque comportato una significativa riduzione volumetrica, indice del fatto che il processo ideato trova applicazione anche su casi nei quali la necessità di ottimizzare la configurazione strutturale non risulta evidente.

6. Validazione del processo mediante verifica strutturale

Nel capitolo precedente sono state presentate le ipotesi progettuali fornite in output da Dynamo. Chiaramente tali ipotesi necessitano di essere validate secondo i canoni di verifica strutturale standard di progettazione per poter essere considerate attendibili.

All'interno di questo capitolo verranno presentate le verifiche strutturali eseguite su una travata e una pilastrata per ognuno dei tre casi studio.

6.1. Caso studio 1: Edificio commerciale

Come esplicitato nel capitolo precedente, per l'edificio commerciale lo scopo era quello di definire una configurazione strutturale tale per cui fosse possibile introdurre impianti a controsoffitto.

La riduzione dell'altezza delle travi comporta chiaramente una riduzione del braccio di leva interno e di conseguenza una minore resistenza allo sforzo flessionale in mezzzeria.

6.1.1. Progetto della travata

La travata presa in considerazione era composta da tre travi di sezione 30x50 cm, di luce variabile come mostrato in figura, ed è sita al secondo livello nella posizione indicata in figura.

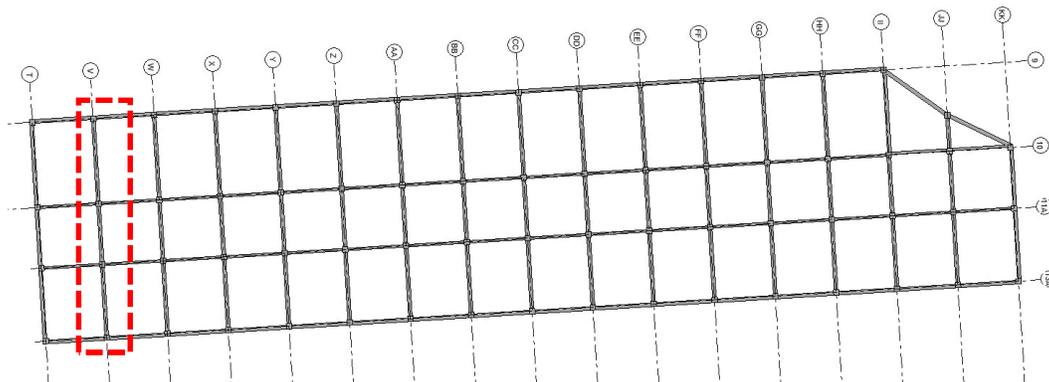


Figura 103 Inquadramento travata oggetto di verifica

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

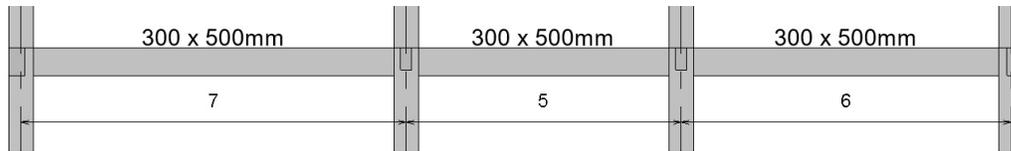


Figura 104 Travata oggetto di verifica

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Lo script ha fornito in output una configurazione strutturale secondo cui l'altezza delle travi risulta chiaramente la stessa, mentre la base della trave varia in funzione dello sforzo flessionale cui è soggetta, il quale è direttamente proporzionale alla luce della campata.

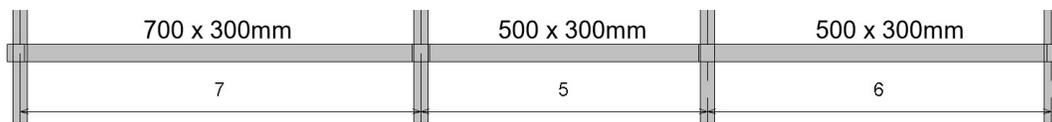


Figura 105 Trava post ottimizzazione strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Sempre mediante lo script, è stata calcolata l'armatura teorica necessaria per ognuna delle travi e il diametro di armatura ottimale. Tali dati sono riportati nella tabella sottostante.

Tabella 1 Armatura longitudinale teorica e reale nella travata

Sezione	Luce	Armatura teorica	Armatura reale	Numero ferri
70x30 cm	7 m	12,28 cm ²	13,85 cm ²	9ø14
50x30 cm	5 m	4,08 cm ²	4,61 cm ²	3ø14
50x30 cm	6 m	8,20 cm ²	9,23 cm ²	6ø14

Il passaggio dall'armatura teorica a quella reale viene effettuato andando ad analizzare il diagramma di momento resistente, il quale definisce la risposta dell'acciaio in termini di resistenza della sezione, decidendo se approssimare per difetto o per eccesso il numero di barre da inserire, mediante la seguente espressione:

$$M_{R,d} = 0,9 \cdot d \cdot A_s \cdot f_{yd}$$

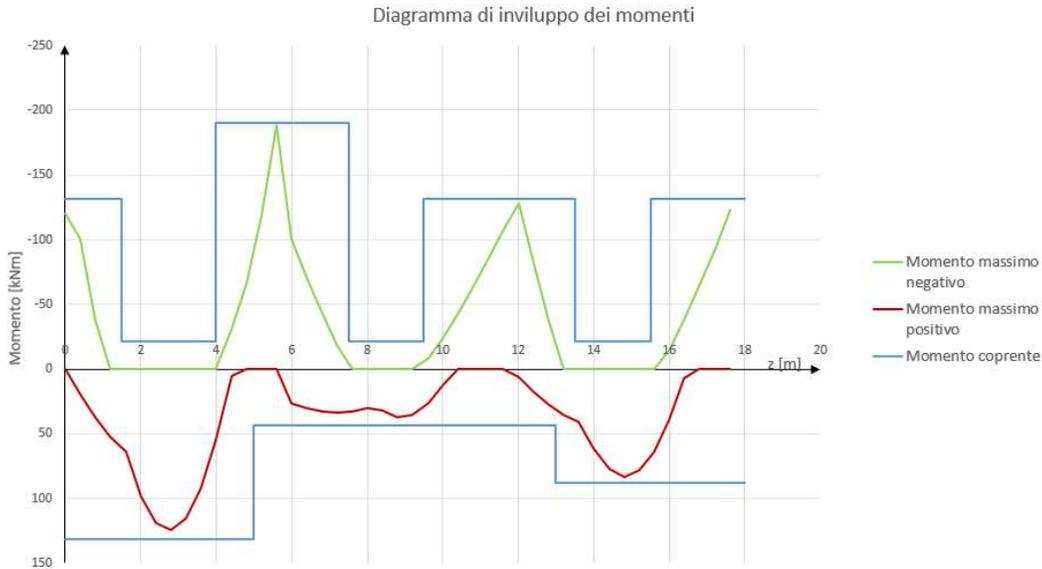


Figura 106 Involucro dei diagrammi di momento e momento resistente

FONTI: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Lo script esegue il calcolo della sezione nell'ipotesi di armatura nella sola zona tesa, rispetto al massimo momento in mezzera. In funzione del massimo momento agli appoggi viene definita anche l'armatura superiore. Le armature introdotte sono conformi a quanto prescritto dalle NTC2018 par. 4.1.6.1.1 le quali prescrivono che l'armatura in zona tesa deve essere maggiore dello 1,3‰ dell'area della sezione reagente ed inferiore al 4‰ dell'area complessiva.

Per la trave di sezione 70x30 il rapporto acciaio calcestruzzo, considerando la sola armatura in zona tesa è pari allo 0,7% mentre per le due travi di sezione 50x30 cm il rapporto è pari rispettivamente allo 0,3% per quella meno sollecitata (campata centrale) e 0,7% per quella più sollecitata (campata laterale).

Il passo dei ferri longitudinali deve essere maggiore del minimo tra 2 cm e il diametro utilizzato per i ferri longitudinali. Viene analizzato il caso maggiormente armato per ogni tipologia di trave. Per la trave 70x30 cm all'appoggio sono stati inseriti 13 ϕ 14, che comportano un interfero pari a 38,1 mm.

Per la trave 50x30 la zona all'appoggio nella maggiormente armata vi è lo stesso numero di ferri. In questo caso l'interfero risulta pari a 21,5 mm. Quindi pur essendo nel secondo caso al limite, la prescrizione normativa risulta rispettata.

Una volta definita l'armatura longitudinale sia superiore che inferiore, lo step successivo è la verifica a taglio.

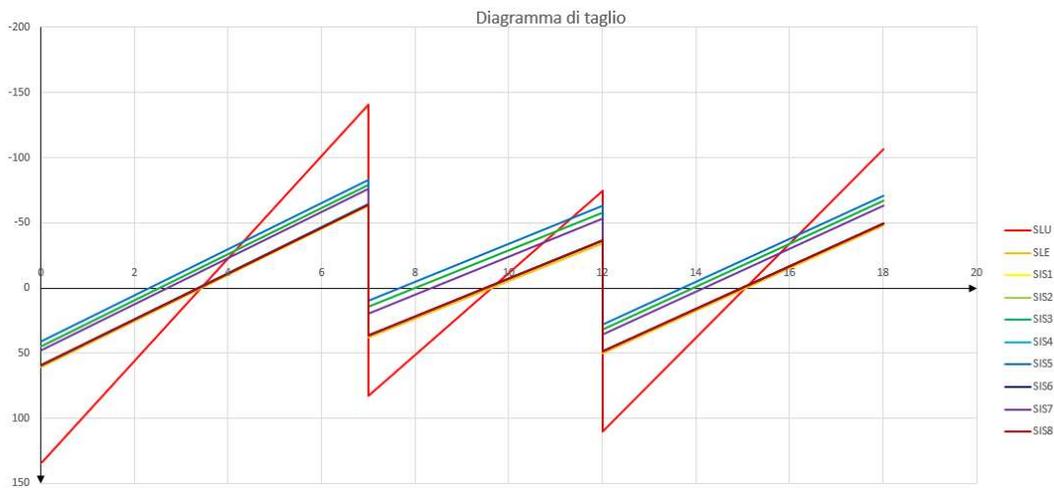


Figura 107 Diagrammi di taglio per le combinazioni considerate

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Per la verifica a taglio delle travi vengono prese in considerazione le sollecitazioni massime, vale a dire quelle in concomitanza degli appoggi.

Per prima cosa vengono valutate le resistenze a taglio della biella compressa in calcestruzzo e della biella tesa in acciaio, per comprendere se l'eventuale rottura della sezione per taglio si possa verificare lato acciaio, lato calcestruzzo o simultaneamente.

Per la trave con sezione 70x30 cm il taglio massimo sollecitante è pari a 140,64 kN. L'azione resistente a taglio è valutata come segue:

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot v \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{\cotg\vartheta}{1 + \cotg^2\vartheta}$$

$$V_{Rcd(\theta=45^\circ)} = 0,9 \cdot 270 \cdot 0,5 \cdot 700 \cdot 1 \cdot 14,16 \cdot \frac{1}{1 + 1} = 538,6 \text{ kN}$$

$$V_{Rcd(\theta=21,81^\circ)} = 0,9 \cdot 270 \cdot 0,5 \cdot 700 \cdot 1 \cdot 14,16 \cdot \frac{2,5}{1 + 2,5^2} = 341,6 \text{ kN}$$

$V_{Rcd(\theta=21,81^\circ)}$ risulta inferiore quindi l'eventuale rottura per taglio si verificherebbe per un meccanismo di taglio trazione. Viene preso in considerazione il taglio agente e su di esso viene definito il passo delle staffe per il taglio col metodo seguente.

$$\frac{A_{sw}}{S} = \frac{V_{ed}}{0,9 \cdot d \cdot f_{yd} \cdot \cotg\theta} = \frac{140640}{0,9 \cdot 270 \cdot 391,3 \cdot 2,5} = 0,591$$

Si sceglie di armare con staffe $\varnothing 10$ a due bracci e pertanto l'area di acciaio A_{sw} è pari a $157,08 \text{ mm}^2$. Il passo teorico risulta quindi pari a 266 mm . Il passo massimo delle staffe nelle travi può essere ricavato a partire dalle imposizioni delle NTC2018, par. 4.1.6.1.1:

$$A_{st,min} = 1,5 \cdot b \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

Da cui è possibile ricavare, una volta definito il diametro delle staffe idoneo, il numero di staffe per metro lineare e di conseguenza il passo:

$$nst = \frac{A_{st,min}}{A_{st}}$$

Da questo rapido calcolo risulta, essendo b pari a 700 mm , un passo delle staffe massimo pari a 150 mm , il quale viene quindi adottato sull'intera trave. Il medesimo calcolo viene effettuato sulle altre due travi, la cui base è pari a 500 mm , con un passo risultante pari a 200 mm . Di seguito viene rappresentata la distinta dei ferri della travata analizzata.

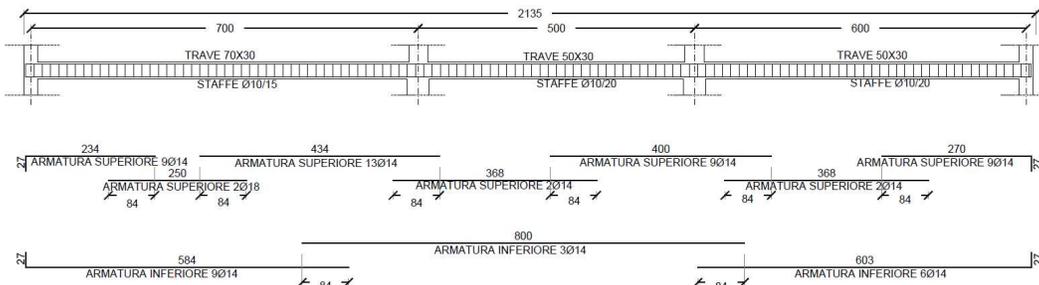


Figura 108 Distinta ferri travata edificio commerciale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk AutoCAD ®

6.1.2. Progetto della pilastrata

La pilastrata presa in considerazione per la verifica strutturale, evidenziata nella figura sottostante, era composta da pilastri tutti di sezione 45x45 cm.

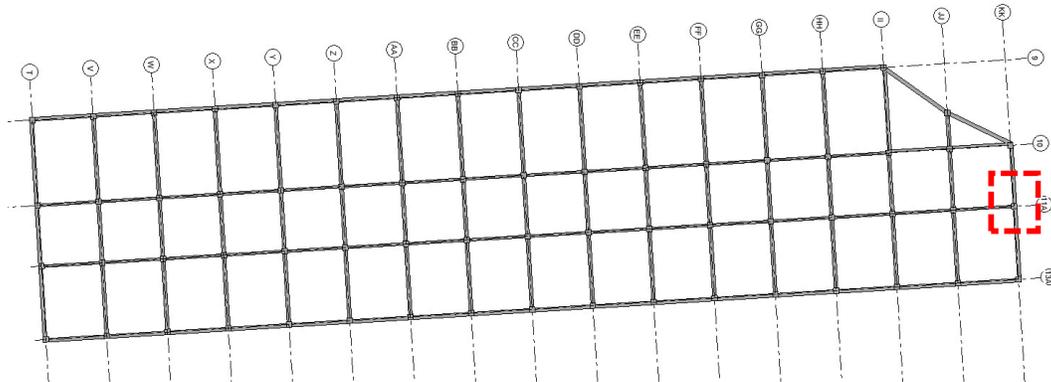


Figura 109 Pilastrata oggetto della verifica strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

A seguito dello script le sezioni si sono ridotte a 35x35 cm.

Di seguito viene presentata la distinta dei ferri della pilastrata in oggetto.

Livello	Interpiano	Ferri di vertice	Ferri posizione A	Ferri posizione B	Staffe
1	3,4 m	2+2Ø18	1+1Ø18	/	Ø6/250
2	4,5 m	2+2Ø18	1+1Ø18	/	Ø6/250
3	4,4 m	2+2Ø18	1+1Ø18	/	Ø6/250

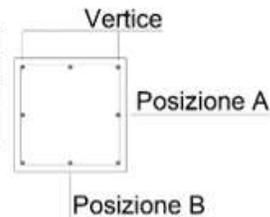


Figura 110 Distinta dei ferri della pilastrata

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk AutoCAD ©

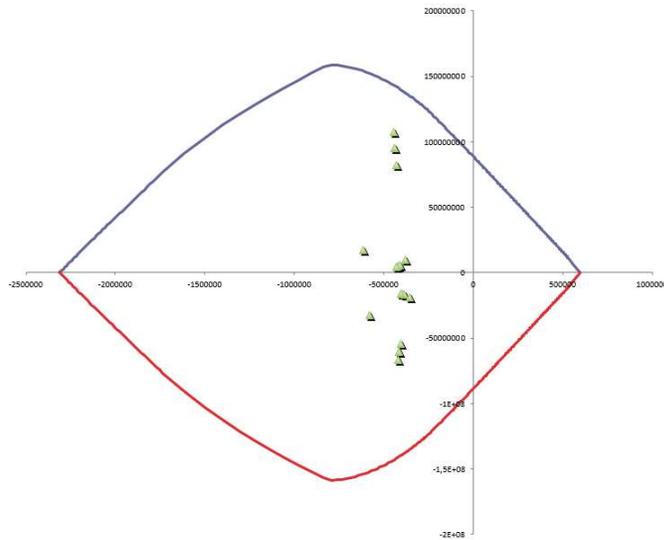
Per la verifica di ogni pilastro della pilastrata presa in considerazione si fa ricorso ad una macro Excel, già utilizzata durante il corso di strutture e fondazioni, che calcola il dominio M-N del pilastro in funzione delle caratteristiche della sezione. Il dominio di M-N rappresenta in forma grafica tutte le combinazioni di sforzo normale e momento flettente che un dato elemento pressoinflesso è in grado di sopportare.

In sintesi, un elemento soggetto a compressione assiale, proprio in virtù dello stato sollecitativo cui è soggetto, è in grado di sopperire più efficacemente ad un contemporaneo sforzo di flessione.

In verde sono rappresentati i valori di sforzo normale e momento flettente massimo cui è soggetto il pilastro, per valutare se la sezione ipotizzata per il pilastro è consona a sopportare l'azione di pressoflessione.

Le coppie di sforzo normale e momento flettente sono due per ogni combinazione di azioni considerata, valutate alla base e all'apice del pilastro.

LIVELLO 1

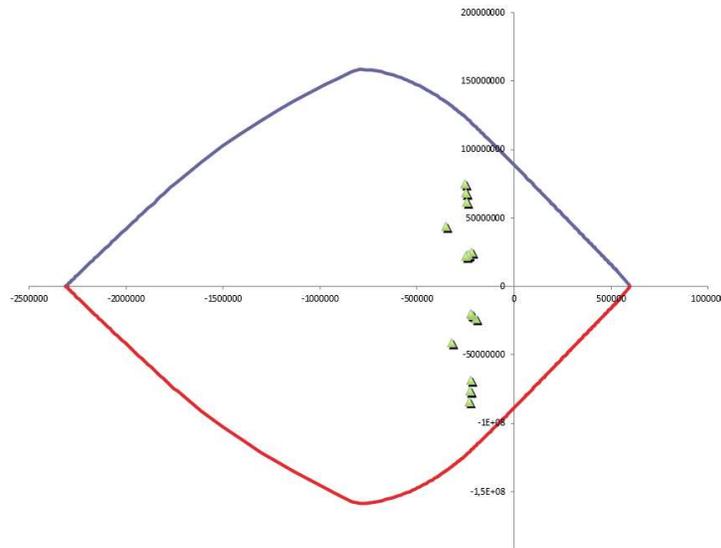


	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	17,21	614,37
	4,30 m	-32,5	582,28
SLE	0,30 m	9,85	379,45
	4,30 m	-18,71	354,76
SIS1	0,30 m	4,84	419,12
	4,30 m	-16,24	394,43
SIS2	0,30 m	82,45	431,3
	4,30 m	-54,27	406,61
SIS3	0,30 m	4,84	419,12
	4,30 m	-16,24	394,43
SIS4	0,30 m	107,48	446
	4,30 m	-66,69	421,31
SIS5	0,30 m	5,59	410,53
	4,30 m	-16,63	385,84
SIS6	0,30 m	94,97	438,65
	4,30 m	-60,48	413,96
SIS7	0,30 m	4,1	427,7
	4,30 m	-15,86	403,02
SIS8	0,30 m	94,97	438,65
	4,30 m	-60,48	413,96

Figura 111 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 1

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 2

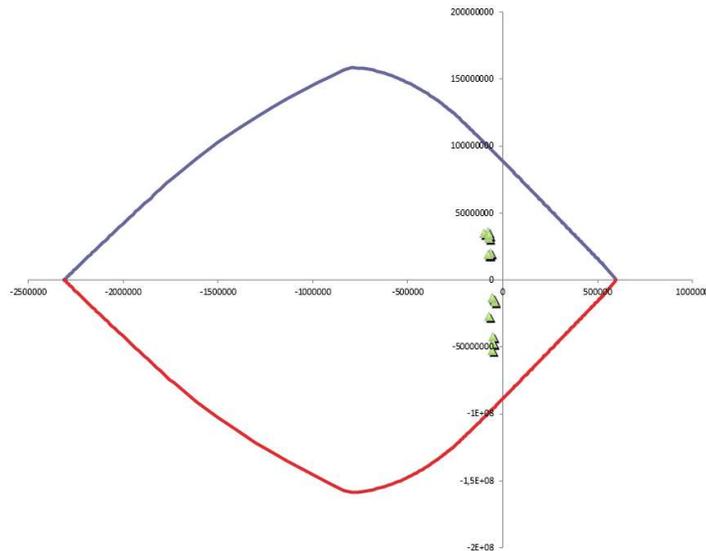


	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	43,81	351,97
	5,20 m	-41,55	321,3
SLE	0,30 m	25,12	219,29
	5,20 m	-23,63	195,7
SIS1	0,30 m	22,59	242,61
	5,20 m	-20,61	219,02
SIS2	0,30 m	61,28	245,77
	5,20 m	-68,5	222,18
SIS3	0,30 m	22,59	242,61
	5,20 m	-20,61	219,02
SIS4	0,30 m	74,76	253,68
	5,20 m	-84,56	230,08
SIS5	0,30 m	22,95	237,43
	5,20 m	-21,06	213,84
SIS6	0,30 m	68,02	249,72
	5,20 m	-76,53	226,13
SIS7	0,30 m	22,23	247,79
	5,20 m	-20,15	224,2
SIS8	0,30 m	68,02	249,72
	5,20 m	-76,53	226,13

Figura 112 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 2

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 3



	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	34,75	100,24
	3,90 m	-27,33	72,22
SLE	0,30 m	19,98	66,45
	3,90 m	-16,32	44,89
SIS1	0,30 m	18,95	73,58
	3,90 m	-13,86	52,02
SIS2	0,30 m	30,84	73,6
	3,90 m	-42,46	52,05
SIS3	0,30 m	18,95	73,58
	3,90 m	-13,86	52,02
SIS4	0,30 m	35,67	76,2
	3,90 m	-52,71	54,64
SIS5	0,30 m	19,06	71,76
	3,90 m	-14,13	50,21
SIS6	0,30 m	33,26	74,9
	3,90 m	-47,58	53,34
SIS7	0,30 m	18,84	75,39
	3,90 m	-13,59	53,83
SIS8	0,30 m	33,26	74,9
	3,90 m	-47,58	53,34

Figura 113 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 3

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

L'armatura longitudinale rispetta i dettami imposti dalle NTC2018 par. 4.1.6.1.2 dato che l'area di armatura ai tre livelli è pari all'1,2% dell'area di calcestruzzo mentre il massimo e minimo imposti da normativa sono rispettivamente il 4% e il 3%.

La seconda verifica effettuata sui pilastri è quella a taglio. Di seguito vengono riportate le sollecitazioni massime per ogni combinazione e quelle utilizzate per il progetto a taglio.

Tabella 2 Sollecitazione di taglio agente sulla pilastrata ai diversi livelli

	Livello 1	Livello 2	Livello 3
	T [kN]	T [kN]	T [kN]
SLU	16,71	27,96	23,34
SLE	9,31	15,44	13,52
SIS1	22,84	32,92	23,68
SIS2	27,51	27,32	16,89
SIS3	22,84	32,92	23,68
SIS4	35,04	33,54	20,36
SIS5	20,11	29,41	21,58
SIS6	31,28	30,43	18,63
SIS7	25,58	36,44	25,78
SIS8	31,28	30,43	18,63
Massima	35,04	36,44	25,78

L'azione resistente a taglio è valutata come segue:

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot v \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{\cot g \vartheta}{1 + \cot g^2 \vartheta}$$

$$V_{Rcd(\theta=45^\circ)} = 0,9 \cdot 320 \cdot 0,5 \cdot 350 \cdot 1 \cdot 14,16 \cdot \frac{1}{1 + 1} = 357 \text{ kN}$$

$$V_{Rcd(\theta=21,81^\circ)} = 0,9 \cdot 320 \cdot 0,5 \cdot 350 \cdot 1 \cdot 14,16 \cdot \frac{2,5}{1 + 2,5^2} = 246,2 \text{ kN}$$

Anche in questo caso il meccanismo che potrebbe portare a rottura la sezione per taglio è lato acciaio, pertanto il passo delle staffe viene calcolato imponendo l'uso di staffe $\varnothing 6$ a due bracci.

$$\frac{A_{sw}}{S} = \frac{V_{ed}}{0,9 \cdot d \cdot f_{yd} \cdot \cot g \theta} = \frac{36440}{0,9 \cdot 320 \cdot 391,3 \cdot 2,5} = 0,124$$

Al livello maggiormente sollecitato il passo necessario con A_{sw} pari a $56,5 \text{ mm}^2$ risulta maggiore di 400 mm , pertanto viene definito il passo secondo il massimo concesso da normativa secondo le NTC2018 par. 4.1.6.1.2, pari a 250 mm .

6.2. Caso studio 2: Edificio residenziale

Nel secondo caso studio era necessario dimensionare gli elementi trave mantenendoli in spessore di solaio. Solitamente le travi in spessore di solaio presentano una maggiore armatura longitudinale dato il ridotto spessore e di conseguenza, come detto per il caso studio precedente, un braccio di leva interna ridotto. Per questo motivo è importante definire un criterio di progetto come quello utilizzato, atto a determinare la quantità di armatura ideale.

Vengono di seguito descritte le verifiche strutturali della travata e della pilastrata prese in esame.

6.2.1. Progetto della travata

La travata oggetto della verifica strutturale, rappresentata in figura, è una trave di bordo posta al primo livello della struttura. La sezione della travata è stata mantenuta uguale a quella identificata preliminarmente dal progetto, pari a 50x30 cm.

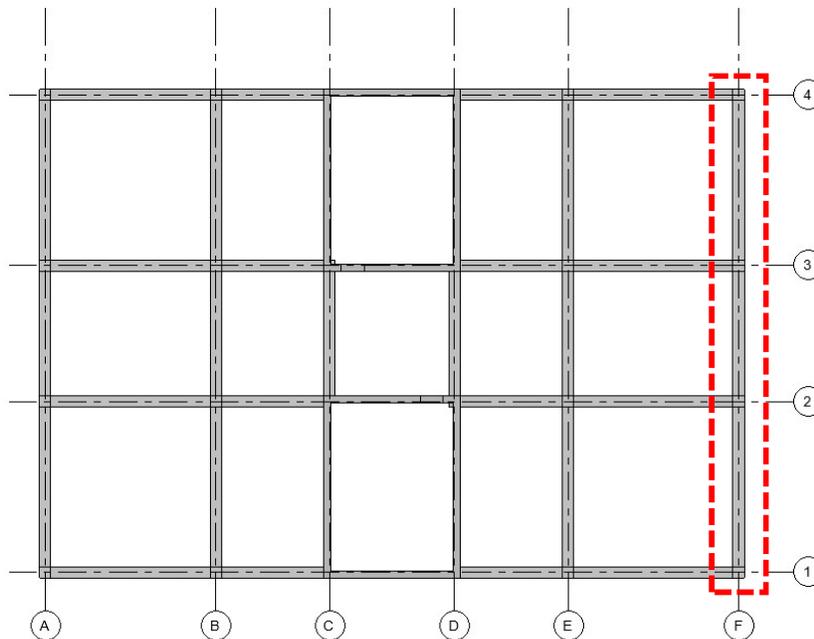


Figura 114 Inquadramento travata oggetto di verifica

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

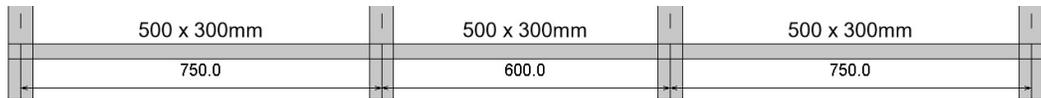


Figura 115 Travata oggetto di verifica

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Mediante lo script è stata verificata l' idoneità della sezione definita in fase di predimensionamento ed è stata calcolata l'armatura minima, e di conseguenza quella reale, in zona tesa.

Tabella 3 Armatura longitudinale teorica e reale nella travata

Sezione	Luce	Armatura teorica	Armatura reale	Numero ferri
50x30 cm	7 m	16,32 cm ²	17,81 cm ²	7ø18
50x30 cm	5 m	8,16 cm ²	10,18 cm ²	4ø18
50x30 cm	6 m	16,32 cm ²	17,81 cm ²	7ø18

Come già descritto nel caso precedente, l'armatura agli appoggi e nelle zone compresse è valutata mediante il diagramma del momento resistente graficato sul diagramma di involucro dei momenti flettenti.

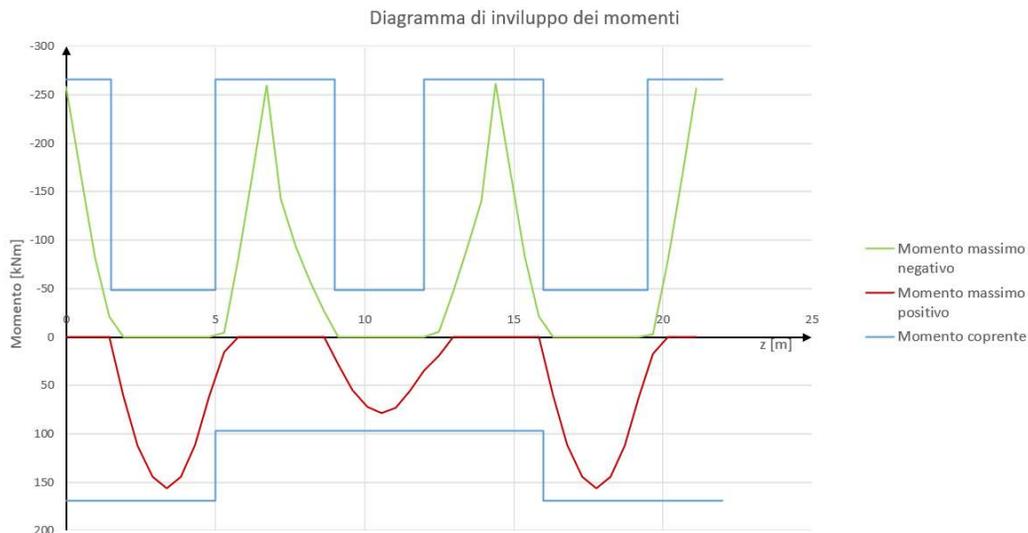


Figura 116 Involuppo dei diagrammi di momento e momento resistente

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Per le armature inserite è necessario verificare che rispondano ai dettami delle NTC2018 in merito ai limiti di armatura e al passo tra i ferri longitudinali.

Nel caso in esame, il caso in cui l'armatura è maggiore è in corrispondenza dell'appoggio centrale, dove il rapporto tra area di acciaio e di calcestruzzo è pari all'1,9%.

Allo stesso modo è necessario verificare i limiti imposti in merito all'interfero delle barre longitudinali, il quale risulta pari a 24,2 mm, ed è quindi maggiore del limite imposto di 20 mm.

Il passo successivo è il progetto dell'armatura a taglio.

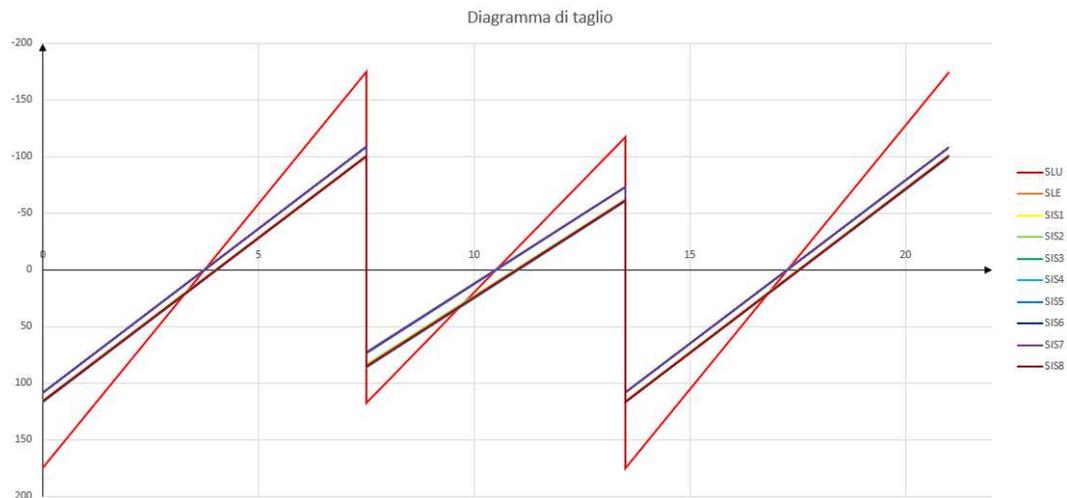


Figura 117 Diagrammi di taglio per le combinazioni considerate

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Il taglio massimo agente preso in considerazione è pari a 174,93 kN e sulla base di esso viene calcolato il passo teorico delle staffe, imponendo l'utilizzo di staffe $\varnothing 8$ a due bracci, la cui area è pari a 100,53 mm².

Vengono valutate le azioni resistenti della sezione, lato acciaio e lato calcestruzzo.

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot v \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$$

$$V_{Rcd(\theta=45^\circ)} = 0,9 \cdot 270 \cdot 0,5 \cdot 500 \cdot 1 \cdot 22,67 \cdot \frac{1}{1 + 1} = 615,5 \text{ kN}$$

$$V_{Rcd(\theta=21,81^\circ)} = 0,9 \cdot 270 \cdot 0,5 \cdot 500 \cdot 1 \cdot 22,67 \cdot \frac{2,5}{1 + 2,5^2} = 244 \text{ kN}$$

Anche in questo caso l'eventuale rottura della sezione per taglio si verificherebbe lato acciaio. Mediante il taglio massimo viene definito il passo teorico delle staffe.

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{ed}}{0,9 \cdot d \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta} = \frac{174930}{0,9 \cdot 270 \cdot 391,3 \cdot 2,5} = 0,736$$

Il passo teorico con le staffe prescelte è pari a 130 mm. Risulta necessario verificare che risponda ai dettami delle NTC2018 par.4.1.6.1.1.

$$A_{st,min} = 1,5 \cdot b \left[\frac{mm^2}{m} \right]$$

Da cui è possibile ricavare, una volta definito il diametro delle staffe idoneo, il numero di staffe per metro lineare e di conseguenza il passo:

$$n_{st} = \frac{A_{st,min}}{A_{st}}$$

Da questo rapido calcolo risulta un passo delle staffe massimo pari a 134 mm, e pertanto viene adottato quello identificato da calcolo.

Di seguito viene rappresentata la distinta dei ferri della trave analizzata.

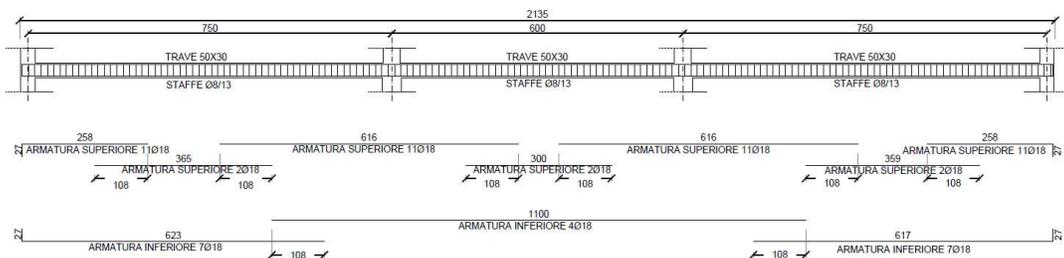


Figura 118 Distinta ferri travata edificio residenziale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk AutoCAD ®

6.2.2. Progetto della pilastrata

Inizialmente tutte le pilastrate avevano dimensione in sezione pari a 50x50 cm. Tramite lo script è stata valutata la configurazione minima e la massima rastremazione possibile da apportare su tutti i pilastri dell'edificio.

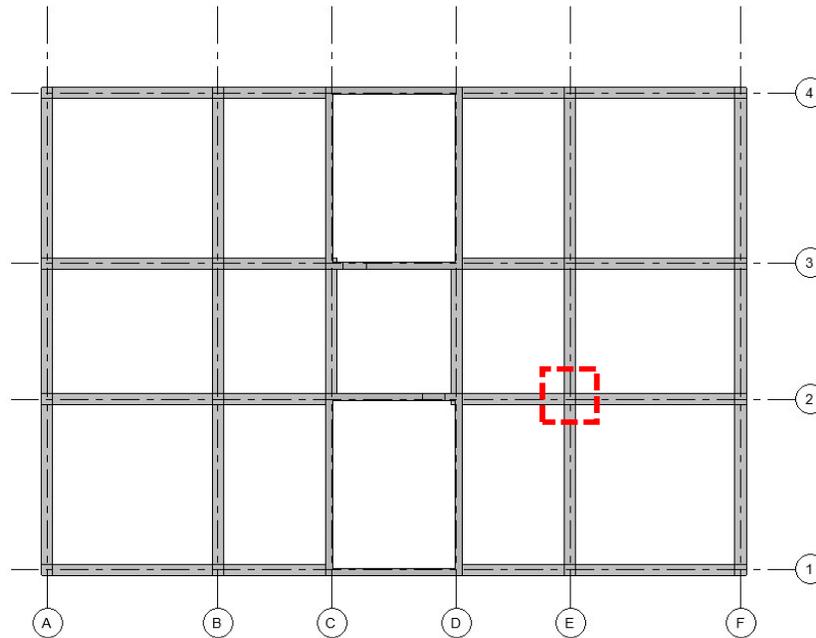


Figura 119 Pilastrata oggetto della verifica strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Di seguito viene presentata la distinta della pilastrata oggetto di verifica, con il dettaglio delle sezioni e i ferri definiti secondo gli output dello script.

Livello	Interpiano	Sezione	Ferri di vertice	Ferri posizione A	Ferri posizione B	Staffe
1	3,2 m	50x50 cm	2+2Ø18	1+1Ø18	2+2Ø18	Ø8/250
2	3,2 m	50x50 cm	2+2Ø18	1+1Ø18	1+1Ø18	Ø6/250
3	3,2 m	45x45 cm	2+2Ø18	1+1Ø18	1+1Ø18	Ø6/250
4	3,2 m	40x40 cm	2+2Ø18	1+1Ø18	1+1Ø18	Ø6/250
5	3,2 m	35x35 cm	2+2Ø18	1+1Ø18	1+1Ø18	Ø6/250
6	3,2 m	30x30 cm	2+2Ø18	1+1Ø18	1+1Ø18	Ø6/250
7	3,2 m	30x30 cm	2+2Ø18	1+1Ø18	/	Ø6/250

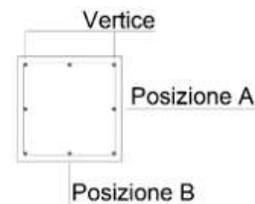
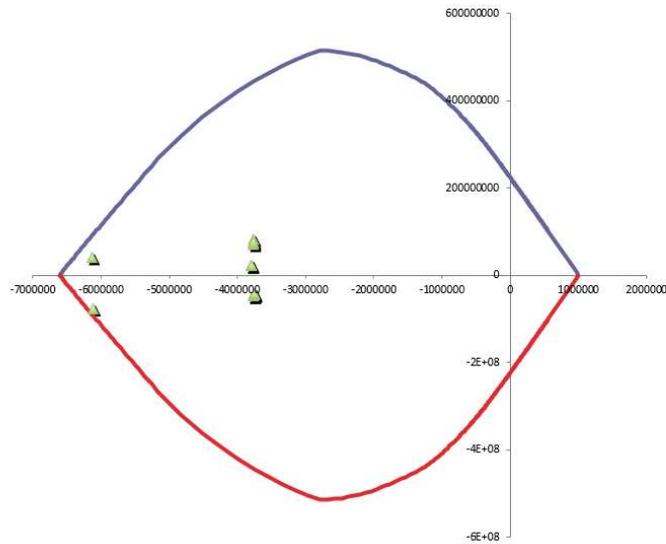


Figura 120 Distinta dei ferri della pilastrata

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk AutoCAD ®

Come già descritto per il caso studio precedente, la verifica della pilastrata viene fatta andando a verificare che le coppie di momento flettente e sforzo normale calcolate siano all'interno del dominio M-N della sezione.

LIVELLO 1

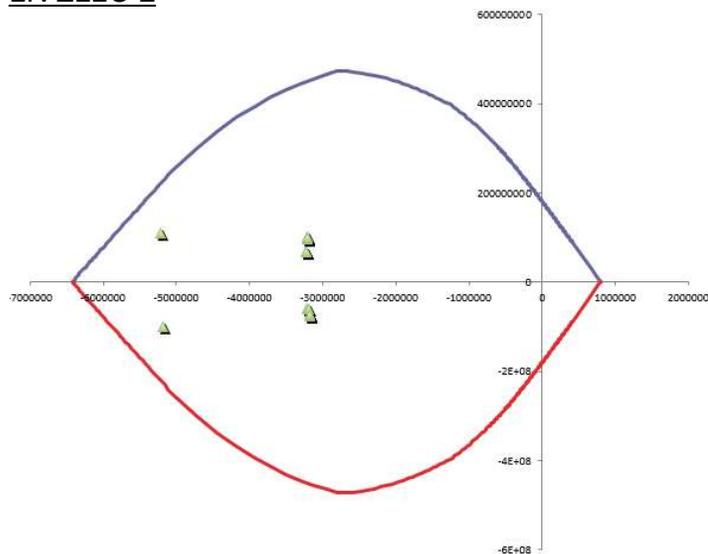


	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	39,49	6135,72
	2,90 m	-78,37	6110,21
SLE	0,30 m	22,5	3788,86
	2,90 m	-47,17	3769,24
SIS1	0,30 m	22,81	3790,19
	2,90 m	-47,21	3770,57
SIS2	0,30 m	70,01	3769,77
	2,90 m	-44,01	3750,15
SIS3	0,30 m	22,81	3790,19
	2,90 m	-47,21	3770,57
SIS4	0,30 m	81,61	3770,46
	2,90 m	-43,29	3750,83
SIS5	0,30 m	23,06	3791,24
	2,90 m	-47,19	3771,61
SIS6	0,30 m	75,81	3770,12
	2,90 m	-43,65	3750,49
SIS7	0,30 m	22,56	3789,14
	2,90 m	-47,24	3769,52
SIS8	0,30 m	75,81	3770,12
	2,90 m	-43,65	3750,49

Figura 121 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 1

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 2

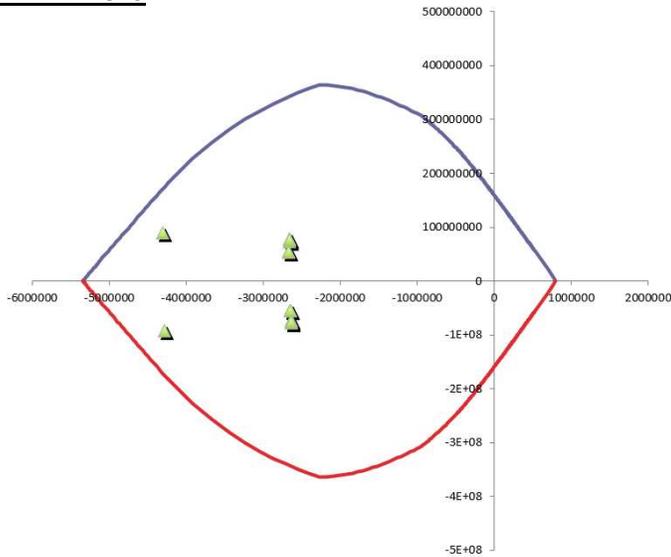


	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	110,31	5210,4
	2,90 m	-99,13	5184,89
SLE	0,30 m	66,05	3222,21
	2,90 m	-59,36	3202,58
SIS1	0,30 m	66,16	3222,64
	2,90 m	-59,45	3203,01
SIS2	0,30 m	95,02	3204,4
	2,90 m	-72,93	3184,77
SIS3	0,30 m	66,16	3222,64
	2,90 m	-59,45	3203,01
SIS4	0,30 m	102,04	3205,21
	2,90 m	-76,27	3185,58
SIS5	0,30 m	66,31	3223,6
	2,90 m	-59,52	3203,98
SIS6	0,30 m	98,53	3204,8
	2,90 m	-74,6	3185,18
SIS7	0,30 m	66	3221,67
	2,90 m	-59,37	3202,05
SIS8	0,30 m	98,53	3204,8
	2,90 m	-74,6	3185,18

Figura 122 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 2

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 3

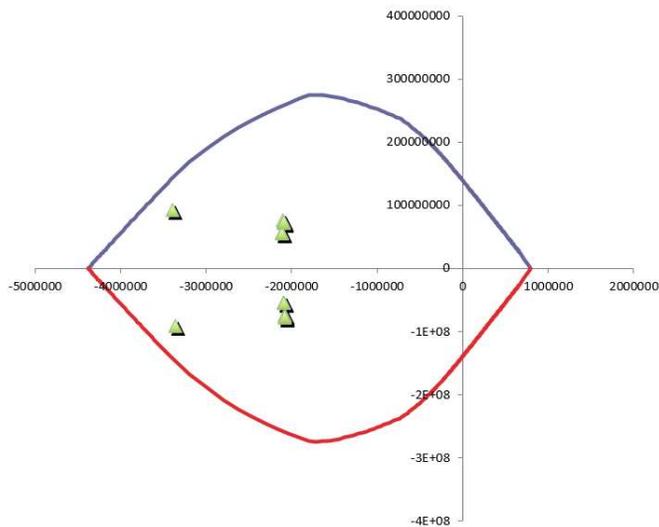


	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	88,98	4292,95
	2,90 m	-92,1	4267,44
SLE	0,30 m	53,51	2660,34
	2,90 m	-55,18	2640,71
SIS1	0,30 m	53,6	2659,45
	2,90 m	-55,25	2639,82
SIS2	0,30 m	73,41	2644,19
	2,90 m	-73,54	2624,57
SIS3	0,30 m	53,6	2659,45
	2,90 m	-55,25	2639,82
SIS4	0,30 m	78,21	2645,11
	2,90 m	-78,07	2625,48
SIS5	0,30 m	53,69	2660,29
	2,90 m	-55,36	2640,67
SIS6	0,30 m	75,81	2644,65
	2,90 m	-75,81	2625,03
SIS7	0,30 m	53,5	2658,61
	2,90 m	-55,14	2638,98
SIS8	0,30 m	75,81	2644,65
	2,90 m	-75,81	2625,03

Figura 123 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 3

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 4



	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	92,94	3380,5
	2,90 m	-91,77	3354,99
SLE	0,30 m	55,99	2101,52
	2,90 m	-54,98	2081,89
SIS1	0,30 m	56,1	2098,99
	2,90 m	-55,09	2079,37
SIS2	0,30 m	71,78	2086,98
	2,90 m	-73,68	2067,36
SIS3	0,30 m	56,1	2098,99
	2,90 m	-55,09	2079,37
SIS4	0,30 m	75,49	2087,9
	2,90 m	-78,39	2068,27
SIS5	0,30 m	56,16	2099,68
	2,90 m	-55,2	2080,06
SIS6	0,30 m	73,64	2087,44
	2,90 m	-76,04	2067,81
SIS7	0,30 m	56,04	2098,3
	2,90 m	-54,98	2078,67
SIS8	0,30 m	73,64	2087,44
	2,90 m	-76,04	2067,81

Figura 124 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 4

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 5

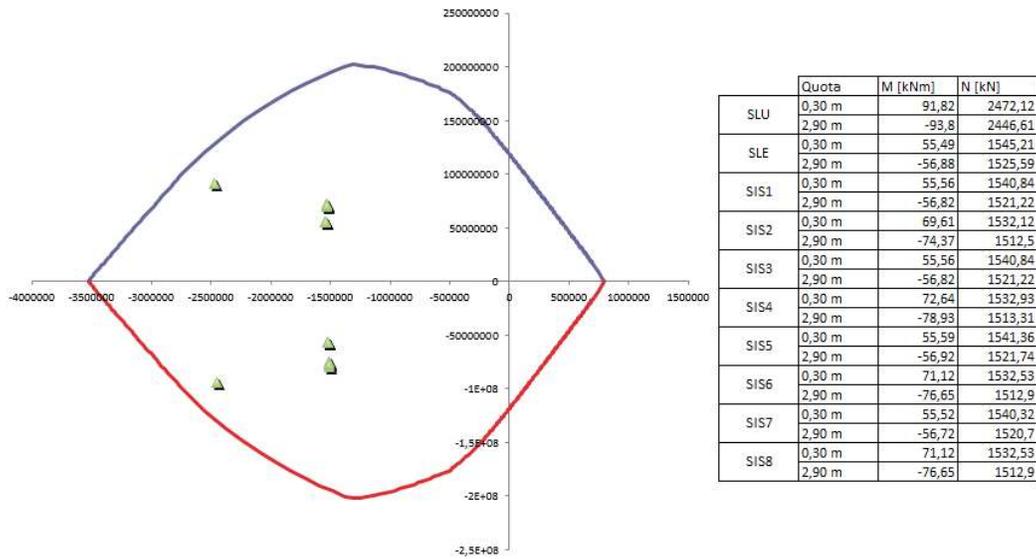


Figura 125 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 5

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 6

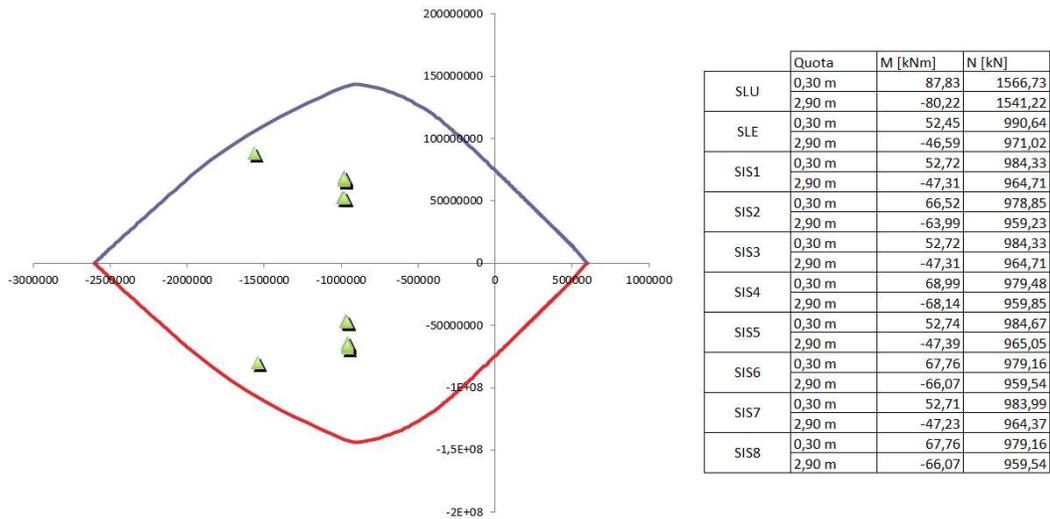


Figura 126 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 6

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 7

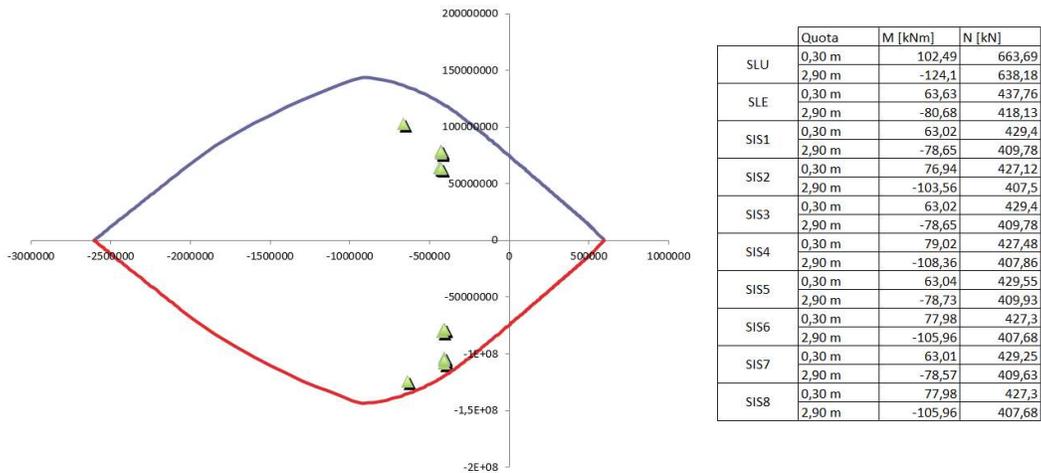


Figura 127 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 7

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

Di seguito vengono sintetizzate le proporzioni di area di calcestruzzo e di acciaio, per dimostrare che rispettano i limiti imposti dalle NTC2018 par. 4.1.6.1.2.

Tabella 4 Percentuali di armatura nei pilastri ai vari livelli

Livello	Sezione	Arm. Complessiva	%Aa/Ac
1	50x50 cm	10Ø18	1,01%
2	50x50 cm	8Ø18	0,81%
3	45x45 cm	8Ø18	1%
4	40x40 cm	8Ø18	1,27%
5	35x35 cm	8Ø18	1,66%
6	30x30 cm	8Ø18	2,26%
7	30x30 cm	6Ø18	1,69%

Terminato il progetto dell'armatura longitudinale è stata dimensionata l'armatura a taglio. Di seguito vengono riportate le sollecitazioni in funzione delle quali è stato espletato il progetto.

Tabella 5 Sollecitazione di taglio agente sulla pilastrata ai diversi livelli

	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5	Livello 6	Livello 7
	T [kN]						
SLU	57,87	107,63	99,01	103,52	106,28	100,61	131,26
SLE	34,9	65,02	59,85	62,56	64,51	59,99	82,93
SIS1	30,62	62,73	56,66	59,09	60,77	57,1	76,68
SIS2	35,63	65,01	59,67	62,35	64,14	60,38	80,56
SIS3	30,62	62,73	56,66	59,09	60,77	57,1	76,68
SIS4	39,03	64,49	58,92	61,42	63,08	59,34	78,74
SIS5	30,17	62,46	56,3	58,7	60,37	56,72	76,19
SIS6	37,33	64,75	59,29	61,88	63,61	59,86	79,65
SIS7	31,08	63,01	57,02	59,48	61,17	57,48	77,18
SIS8	37,33	64,75	59,29	61,88	63,61	59,86	79,65
Massima	57,87	107,63	99,01	103,52	106,28	100,61	131,26

L'azione resistente a taglio è stata valutata con la medesima formula espletata per il caso studio precedente.

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot v \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{\cot g \vartheta}{1 + \cot g^2 \vartheta}$$

In tutti i casi è risultato più sensibile il meccanismo di rottura lato acciaio. Nella tabella seguente sono riportati i valori delle azioni resistenti a taglio e il passo che ne deriva, imponendo l'utilizzo di staffe $\varnothing 8$ per il livello 1 e staffe $\varnothing 6$ per tutti gli altri livelli.

Tabella 6 Azioni resistenti di taglio e passi delle staffe

	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5	Livello 6	Livello 7
V _{Rcd} (45°) [N]	1198500	1198500	963900	693600	517650	367200	367200
V _{Rcd} (21,81°) [N]	826551,7	826551,7	664758,6	478344,8	357000	253241,4	253241,4
A _{sw/s} [mm ² /mm]	0,149385	0,277836	0,288351	0,345822	0,416257	0,476143	0,621196
A _{sw} [mm ²]	100,48	100,48	100,48	100,48	100,48	100,48	100,48
S teorico [mm]	672,6222	361,6524	348,4637	290,5539	241,3895	211,029	161,7524
S effettivo [mm]	250	250	250	250	200	200	150

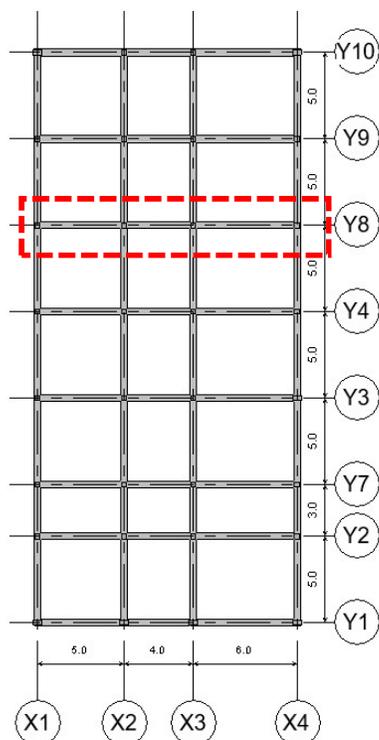
Si noti come in alcuni dei casi in esame, come ad esempio nel livello 1, il passo teorico delle staffe è davvero alto, a causa di un'azione tagliante sollecitante molto bassa. In ogni caso i passi teorici sono stati confrontati e adeguati con quanto prescritto dalle NTC2018 par. 4.1.6.1.2.

6.3. Caso studio 3: Edificio scolastico

Anche nel terzo caso studio le travi sono state progettate in spessore di solaio, e valgono pertanto le considerazioni effettuate per il secondo caso studio. Le verifiche della travata e della pilastrata prese in esame sono descritte di seguito.

6.3.1. Progetto della travata

La travata analizzata è quella mostrata in figura, ubicata al secondo livello



dell'edificio, ed era inizialmente composta da tre travi di luce differente, con sezione 40x30 cm.

L'esecuzione dello script ha rilevato come una delle tre campate potesse essere effettivamente ridotta di sezione, mentre le altre due, richiedevano una sezione maggiore secondo i criteri di progetto adottati, anche in funzione poi del numero di barre di armatura che era necessario inserire.

Per il progetto delle travi è risultato necessario adottare un calcestruzzo di classe C 35/45, ed il ferro utilizzato per armare le travi è il $\varnothing 14$.

Figura 128 Inquadramento travata oggetto di verifica

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

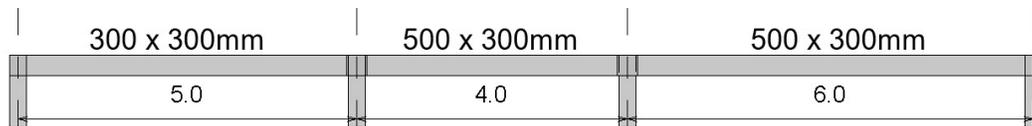


Figura 129 Trave post ottimizzazione strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ©

Come visto per i casi studio precedentemente descritti, è stata presa in considerazione l'armatura teorica e successivamente tradotta nell'armatura effettivamente inserita nelle travi. I dati sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 7 Armatura longitudinale teorica e reale nella travata

Sezione	Luce	Armatura teorica	Armatura reale	Numero ferri
30x30 cm	5 m	7,16 cm ²	7,70 cm ²	5ø14
50x30 cm	4 m	2,04 cm ²	3,08 cm ²	2ø14
50x30 cm	6 m	13,28 cm ²	13,85 cm ²	9ø14

Di seguito viene riportato l'involuppo dei momenti sollecitanti e il diagramma di momento resistente offerto dalle barre di armatura inserite nella sezione.

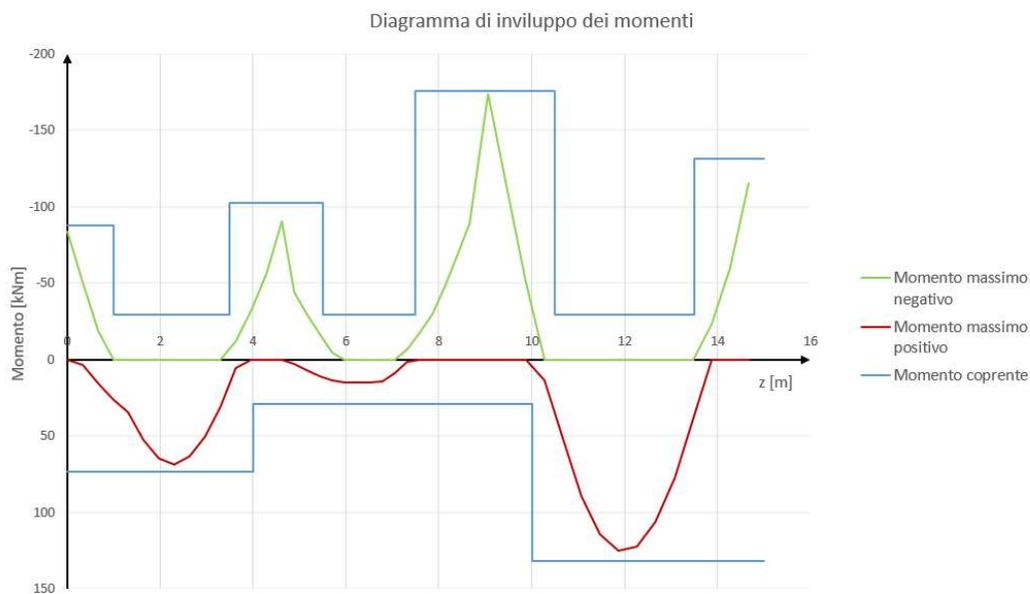


Figura 130 Involuppo dei diagrammi di momento e momento resistente

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Come per gli altri casi è stato in fine verificato che le barre di armatura immerse, oltre che essere sufficienti a resistere alle sollecitazioni calcolate, fossero anche idonee secondo le restrizioni imposte dalle NTC2018 par. 4.1.6.1.1.

Nel caso in esame, la sezione maggiormente armata è quella all'appoggio nella quale sono stati inseriti 12ø14 in una sezione 50x30 cm. La percentuale di area di ferro risulta pari all'1,2% mentre l'interfero che ne risulta è pari a 24,7 mm, pertanto tutte le imposizioni normative sono rispettate.

Il progetto dell'armatura a taglio è stato espletato, esattamente come descritto per i due casi precedenti, valutando il comportamento delle sezioni alla biella tesa e a quella compressa e identificando il passo delle staffe idoneo.

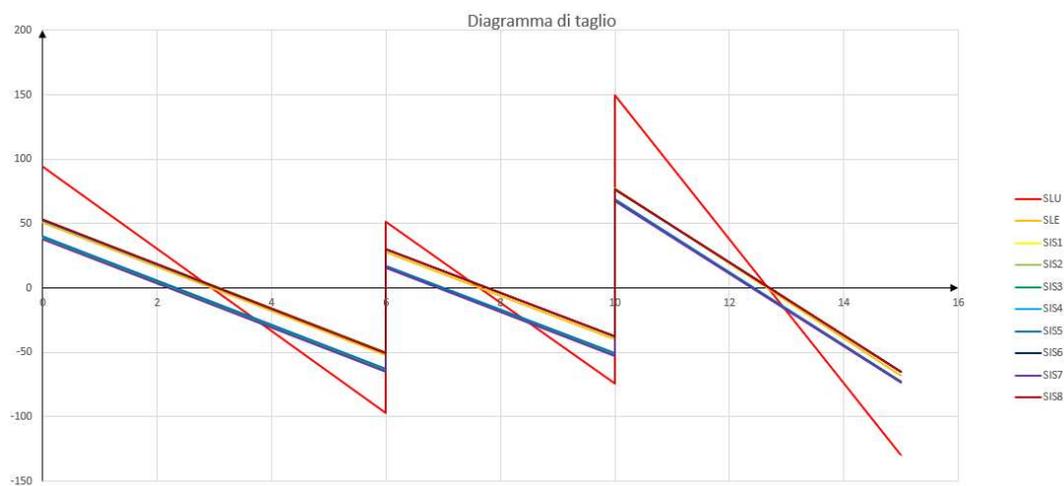


Figura 131 Diagramma di taglio per le combinazioni considerate

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Il passo delle staffe minimo è stato individuato, come per gli altri casi a partire dal taglio massimo sollecitante ognuna delle travi, identificando il meccanismo di rottura a taglio e di conseguenza l'area minima di staffe per metro necessaria, imponendo l'utilizzo di staffe ø8.

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot v \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{\cot g \vartheta}{1 + \cot g^2 \vartheta}$$

$$V_{Rcd(\theta=45^\circ)} = 0,9 \cdot 270 \cdot 0,5 \cdot 500 \cdot 1 \cdot 19,83 \cdot \frac{1}{1 + 1} = 538,6 \text{ kN}$$

$$V_{Rcd(\theta=21,81^\circ)} = 0,9 \cdot 270 \cdot 0,5 \cdot 500 \cdot 1 \cdot 19,83 \cdot \frac{2,5}{1 + 2,5^2} = 213,5 \text{ kN}$$

La trave maggiormente sollecitata presenta uno sforzo tagliante pari a 149,36 kN e sulla base di esso viene calcolato il passo minimo necessario, pari a 159 mm.

Il passo massimo identificato secondo i dettami delle NTC2018, par. 4.1.6.1.1 è pari a 134 mm, e pertanto viene imposto su tutta la travata un passo di 130 mm. Di seguito viene riportata la distinta dei ferri della travata oggetto del progetto.

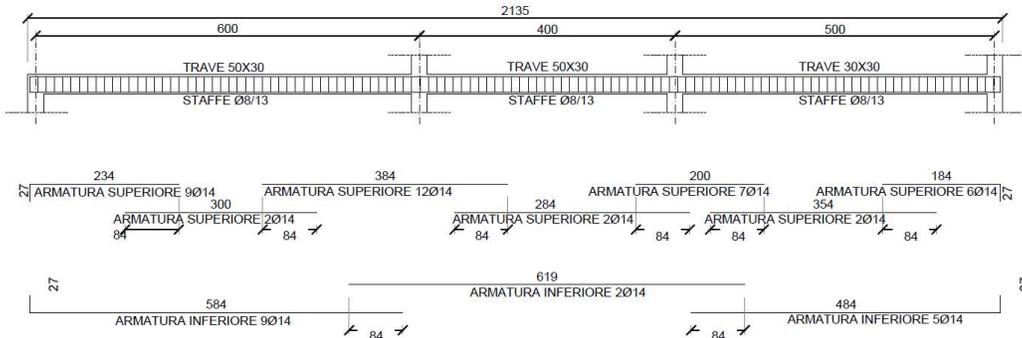
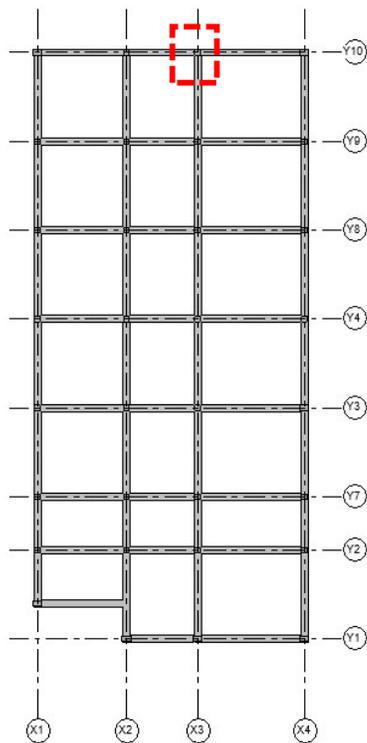


Figura 132 Distinta ferri travata edificio scolastico

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk AutoCAD ®

6.3.2. Progetto della pilastrata



La pilastrata considerata, la cui posizione in pianta è indicata nella figura a fianco, era composta da pilastri di sezione 40x40 cm.

La sezione è stata ridotta a 30x30 cm dallo script ed è stata individuata la classe di calcestruzzo più idonea, vale a dire il C25/30. Sono state valutate le barre di armatura necessarie per il corretto funzionamento dei pilastri a pressoflessione, e il passo delle staffe più idoneo.

Di seguito viene riportata la distinta dei ferri inseriti nei pilastri.

Figura 133 Pilastro oggetto della verifica strutturale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk Revit ®

Livello	Interpiano	Sezione	Ferri di vertice	Ferri posizione A	Ferri posizione B	Staffe
1	4 m	30x30 cm	2+2Ø16	/	/	Ø6/250
2	4 m	30x30 cm	2+2Ø16	/	/	Ø6/250

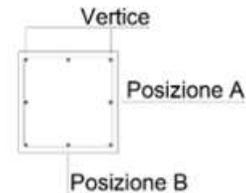
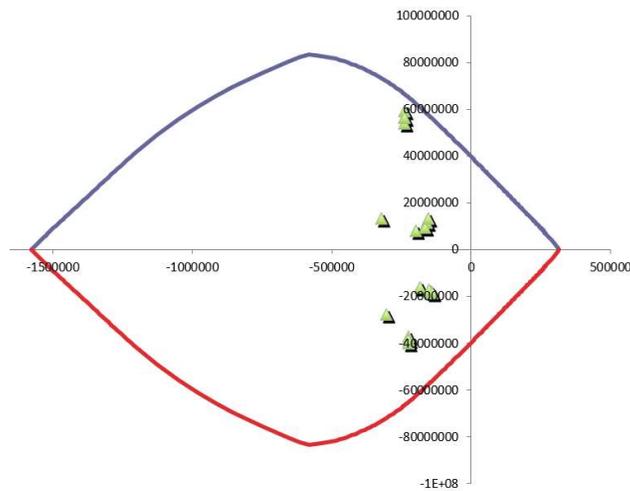


Figura 134 Distinta dei ferri della pilastrata

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Autodesk AutoCAD ®

Come già descritto per i casi precedenti la verifica a pressoflessione dei pilastri viene espletata mediante la rappresentazione del dominio M-N dei pilastri, per verificare che le coppie di momento e sforzo normale identificate come più gravose vi ricadano all'interno.

LIVELLO 1

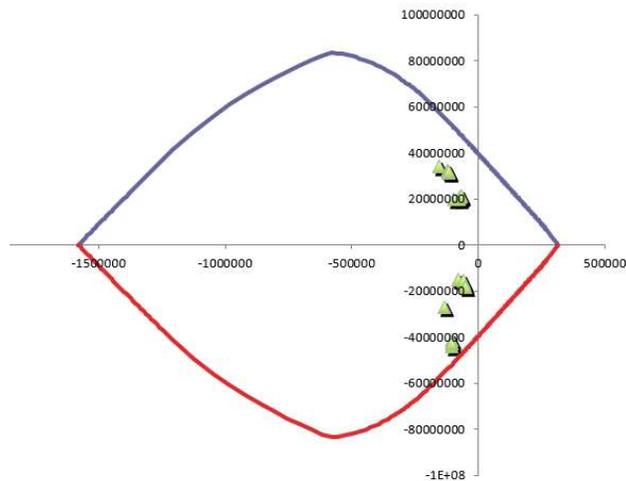


	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	13,42	323,18
	2,90 m	-27,64	304,04
SLE	0,30 m	7,9	198,54
	2,90 m	-16,15	183,82
SIS1	0,30 m	11,44	159,98
	2,90 m	-17,86	145,27
SIS2	0,30 m	59,09	241,19
	2,90 m	-39,89	226,47
SIS3	0,30 m	11,44	159,98
	2,90 m	-17,86	145,27
SIS4	0,30 m	54,07	239,13
	2,90 m	-37,22	224,42
SIS5	0,30 m	9,53	165,93
	2,90 m	-17,03	151,21
SIS6	0,30 m	56,58	240,16
	2,90 m	-38,55	225,44
SIS7	0,30 m	13,36	154,04
	2,90 m	-18,68	139,33
SIS8	0,30 m	56,58	240,16
	2,90 m	-38,55	225,44

Figura 135 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 1

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

LIVELLO 2



	Quota	M [kNm]	N [kN]
SLU	0,30 m	34,22	153,25
	2,90 m	-26,93	134,11
SLE	0,30 m	19,64	95,02
	2,90 m	-15,09	80,3
SIS1	0,30 m	20,6	71,11
	2,90 m	-17,08	56,39
SIS2	0,30 m	32,35	119,51
	2,90 m	-44,05	104,79
SIS3	0,30 m	20,6	71,11
	2,90 m	-17,08	56,39
SIS4	0,30 m	31,57	118,37
	2,90 m	-41,43	103,66
SIS5	0,30 m	19,77	75,03
	2,90 m	-15,76	60,31
SIS6	0,30 m	31,96	118,94
	2,90 m	-42,74	104,22
SIS7	0,30 m	21,42	67,18
	2,90 m	-18,39	52,46
SIS8	0,30 m	31,96	118,94
	2,90 m	-42,74	104,22

Figura 136 Dominio M-N e sollecitazioni del pilastro al livello 2

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel © mediante macro del corso di strutture e fondazioni

La verifica a pressoflessione risulta soddisfatta e i rapporti di area di acciaio e conglomerato cementizio sono verificati secondo le NTC2018 par. 4.1.6.1.2 come riportato nella tabella sottostante.

Tabella 8 Percentuali di armatura nei pilastri ai vari livelli

Livello	Sezione	Arm. Complessiva	%Aa/Ac
1	30x30 cm	4Ø16	0,89%
2	30x30 cm	4Ø16	0,89%

In ultima istanza è stato eseguito il dimensionamento dell'armatura a taglio dei pilastri.

Tabella 9 Sollecitazione di taglio agente sulla pilastrata ai diversi livelli

	Livello 1	Livello 2
	T [kN]	T [kN]
SLU	13,58	20,38
SLE	7,38	10,85
SIS1	25,2	21,04
SIS2	24,74	20,84
SIS3	25,2	21,04
SIS4	22,82	20,46
SIS5	19,87	17,84
SIS6	23,78	20,65
SIS7	30,54	24,24
SIS8	23,78	20,65
massima	30,54	24,24

L'azione resistente è stata valutata, come descritto per i casi studio recedenti, andando a individuare il meccanismo di rottura predominante e in funzione di esso il passo delle staffe, imponendo di utilizzare staffe $\varnothing 6$ a due bracci.

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot v \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{\cotg\vartheta}{1 + \cotg^2\vartheta}$$

L'azione di taglio massima è pari a 30,54 kN e in funzione di essa, il passo teorico delle staffe risulterebbe pari a 700 mm, per via del fatto che l'azione di taglio sollecitante è effettivamente molto bassa.

Per questo motivo il passo delle staffe è stato imposto a quello massimo previsto dalle NTC2018 par. 4.1.6.1.2, pari a 250 mm.

Le verifiche strutturali condotte su tutte e tre i casi studio hanno fornito risultato positivo, in funzione del fatto che i limiti imposti all'interno dello script ideato per il dimensionamento degli elementi trave e pilastro, conteneva già indirettamente le limitazioni imposte dalla normativa. Di conseguenza è stato dimostrato come effettivamente lo script ideato possa rilevarsi un valido strumento di guida per effettuare correttamente il dimensionamento degli elementi strutturali in maniera speditiva ma efficace.

7. Conclusioni

Col presente elaborato di tesi si è cercato di comprendere l'efficacia e il vantaggio dell'affiancare la metodologia BIM e il computational design alla progettazione strutturale volta alla ricerca del minimo strutturale, vale a dire della configurazione strutturale efficace che richieda il minimo utilizzo di materiale.

Prima ancora di discutere dell'efficacia riscontrata sui casi studio, è bene chiarire come l'utilizzo degli strumenti di progettazione visuale, quali Dynamo, si siano rivelati molto utili data la possibilità di svolgere un elevato numero di operazioni, semplici ma ripetitive, in pochi istanti. Il calcolo strutturale non può non essere demandato a software specifici, ma la ricerca dell'output ideale può essere condotta in maniera alternativa o integrata, mediante software BIM, rendendo il progettista padrone del processo decisionale e libero di identificare la configurazione strutturale più confacente agli interessi globali di un progetto.

In aggiunta, l'applicazione della metodologia BIM al campo delle strutture consente di monitorare il processo progettuale, non solo dal punto di vista della funzionalità statica dell'opera, ma anche nel rapporto con le altre discipline e con l'aspetto economico.

Ciò è chiaramente fondamentale nel mondo della progettazione odierno, nel quale la ricerca del massimo risultato con il minimo sforzo, sia economico che temporale, è ormai un dato di fatto assodato, certamente anche grazie al BIM.

In merito ai casi studio analizzati, il risultato complessivamente ottenuto è soddisfacente dal punto di vista strutturale, inquanto è stato dimostrato, mediante verifica strutturale, come il predimensionamento ottenuto speditivamente mediante lo script Dynamo sia effettivamente corretto e rispetti tutti i canoni imposti dalle Norme Tecniche delle Costruzioni.

La riduzione volumetrica della struttura portante ha risvolti pratici indubbiamente positivi sia dal punto di vista della progettazione integrata, dato che consentirà maggiore libertà progettuale alle altre discipline e una più agevole clash detection mediante i metodi di worksharing analizzati nel capitolo introduttivo, sia dal punto di vista economico.

In generale, la componente strutturale riveste solitamente un ruolo fondamentale anche dal punto di vista economico all'interno di un progetto. Statisticamente le strutture incidono per circa il 30% del costo complessivo di un'opera.

Intervenire su una categoria così impattante sull'economia di un progetto, senza per altro adottare tecnologie costruttive diverse, le quali potrebbero incidere negativamente per i costi legati alla manodopera, comporta certamente una strategia preliminare ottimale per la buona riuscita della fase progettuale e per la successiva realizzazione di un'opera.

Nel complesso, si è registrata una riduzione volumetrica media soddisfacente, e l'incidenza della stessa è dipesa fortemente dalla configurazione strutturale oggetto di analisi.



Figura 137 Volumetrie pre e post processo, caso residenziale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Nel caso studio a destinazione residenziale, la riduzione complessiva è stata del 7,6%, ma di tale percentuale ha inciso nettamente la riduzione volumetrica apportata sui pilastri. Questo perché, dato il maggiore sviluppo in altezza è stato possibile operare maggiormente sui pilastri, per i quali lo sforzo normale diminuiva notevolmente da un piano all'altro che non sulle travi, le quali sopportavano carichi molto simili sui vari impalcati di piano, e per le quali infatti il volume complessivo è leggermente aumentato.

Lo stesso non si può dire per gli altri due casi studio, nei quali il rapporto tra riduzione volumetrica nei pilastri e nelle travi è maggiormente comparabile, dato che le due strutture sono sviluppate su due impalcati soltanto.



Figura 138 Volumetrie pre e post processo, caso commerciale

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Nel secondo caso studio sia sulle travi che sui pilastri è stata apportata una riduzione volumetrica significativa, complessivamente pari a quasi il 30% del totale. Il risultato complessivo risulta pertanto soddisfacente, avendo raggiunto il duplice scopo di rimodulare la struttura portante in funzione di una ottimale interazione con le altre discipline progettuali e avendo anche ottenuto un buon risultato in termini di risparmio.

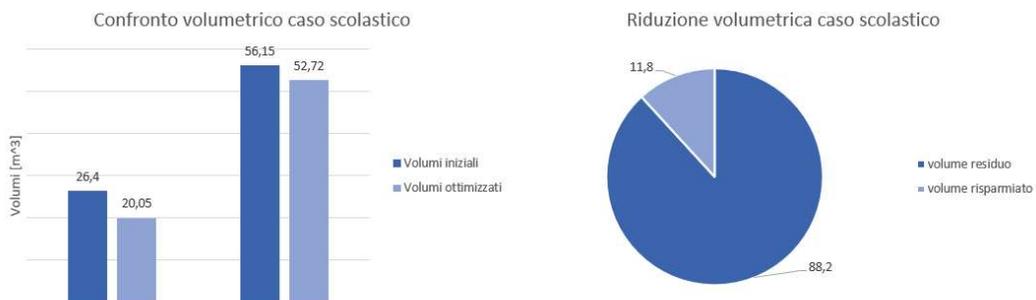


Figura 139 Volumetrie pre e post processo, caso scolastico

FONTE: Elaborazione autore in ambiente Microsoft Excel ©

Nel terzo e ultimo caso la riduzione volumetrica è risultata complessivamente inferiore, pari a circa il 10%. Tale risultato era atteso in quanto già in fase preliminare era chiaro come la struttura fosse già sufficientemente esile. L'aver comunque ottenuto un risparmio, seppur minimo, avendo potuto rimodulare la struttura secondo le ipotesi progettuali imposte, è un risultato soddisfacente.

8. Bibliografia

- [1.] Anna OSELLO, “Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti”, Dario Flaccovio Editore, 2012;
- [2.] Jonathan RENO, Stevens CHEMISE “Rebbi per il BIM: Guida alla progettazione architettonica e strutturale”, Group Eyrolles, 2019;
- [3.] Chuck EASTMAN, Paul TEICHOLZ, Rafael SACKS, Kathleen LISTON, “Il BIM, Guida completa al building information modellini”, Hoepli, 2016;
- [4.] Chiara C. RIZZARDA, Gabriele GALLO “LA SFIDA DEL BIM Un progetto di adozione per progettisti e imprese”, Tecniche Nuove, 2017;
- [5.] Simone POZZOLI, marco BONAZZA, Stefano VILLA, “Rebbi 2020 per l’Architettura Guida completa per la progettazione BIM”, Tecniche Nuove, 2019;
- [6.] Giuseppe Martino DI GIUDA, “Introduzione al BIM: Protocolli di modellazione e gestione informativa”, Società Editrice Esculapio, 2019;
- [7.] Riccardo NELVA, Bruno SIGNORELLI, “Avvento ed evoluzione del calcestruzzo armato in Italia: Il sistema Hennebique”, Edizioni di scienza e tecnica, 1990;
- [8.] “Guida di Autodesk Robot Struttura Analysis Professional 2020”, Autodesk Knowledge Network, 2019;
- [9.] Repubblica Italiana (2018). DM Infrastrutture 17 gennaio 2018, Norme Tecniche per le costruzioni;
- [10.] Repubblica Italiana (2019). Circolare 21 gennaio 2019, n.7/C.S.LL.PP., Circolare esplicativa delle Norme Tecniche per le costruzioni;
- [11.] Norme ACI, American Concrete Institute;
- [12.] UNI EN 1992-1: Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture in calcestruzzo;
- [13.] UNI EN 1998-1: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica;
- [14.] Klajdi TOSKA, Carlo ZANCHETTA, “Computational design per il BIM strutturale”, Ingenio, 2018;
- [15.] Carlo ZANCHETTA, “L’ingegneria digitale tra computational design e open BIM”, Ingenio, 2019;
- [16.] Giulio LUCCIONI, “Il generative design nella progettazione BIM e gli strumenti per metterlo in pratica”, Ingenio, 2020;

- [17.] Domenico SPANO', "Decreto BIM: le Pubbliche amministrazioni sono pronte a gestire progetti per opere > 15 mln euro?", Ingenio, 2021;
- [18.] Arianna LUSCI, "I LOD (livelli di dettaglio) nel BIM. Spiegati bene.", 4m group, 2020;
- [19.] "Fabbisogno informativo nel BIM evoluto: dai LOD ai LOIN", 01building, 2020;

9. Sitografia

https://www.edilportale.com/news/2017/06/informatica/il-bim-potenzialit%C3%A0-e-vantaggi_58564_10.html;

(data ultima consultazione: 28/03/2021)

<https://biblus.acca.it/come-il-bim-cambia-il-nostro-modo-di-lavorare/>;

(data ultima consultazione: 28/03/2021)

<https://www.01building.it/bim/bim-calcolo-strutturale/>;

(data ultima consultazione: 10/04/2021)

<https://www.ingenio-web.it/3129-progettare-strutture-in-calcestruzzo-aci-annuncia-luscita-della-nuova-norma-318>;

(data ultima consultazione: 20/05/2021)

<https://bim.acca.it/progetti-edifici-scolastici/>;

(data ultima consultazione: 06/06/2021)

<https://4mgroupp.it/blog/i-lod-del-bim-spiegati-bene>;

(data ultima consultazione: 13/06/2021)

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la Professoressa Osello, il Professor Bocconcino e il Professor Tondolo per avermi assistito e supportato nella redazione del mio progetto di tesi.

Sono felice di essermi potuto dedicare ad un progetto stimolante e per me di grande interesse.

Non posso non ringraziare tutti i colleghi coi quali ho condiviso questo fantastico percorso, fatto di gioie e fatiche, ma in grado sempre di darmi grandi soddisfazioni.

Vorrei inoltre ringraziare il Politecnico di Torino. Poter dire di aver portato a compimento gli studi presso un così prestigioso ateneo è per me motivo di immenso orgoglio. Ma ciò di cui sono più grato a questo percorso è l'arricchimento, non solo professionale e culturale, ma anche e soprattutto personale che questo percorso mi ha fornito.

Non dimenticherò mai questi anni passati tra i corridoi, le aule e i laboratori di un luogo nel quale, sinceramente, lascio il cuore.

Desidero ringraziare la mia famiglia e i miei amici, per il supporto datomi nei momenti più difficili, e per aver sempre creduto in me.