

INDICE

Indice delle figure.....	5
Abstract	14
Introduzione.....	15
Indice degli acronimi.....	16
1. Aspetti chiave della metodologia BIM.....	17
1.1. Definizioni.....	17
1.2. Iter storico	20
1.3. Stato di sviluppo nel mondo e situazione italiana	22
1.4. Il concetto di LOD	25
1.5. Interoperabilità.....	27
2. Obiettivi e caso studio: la scuola per l'infanzia G. Parini.....	29
2.1. Reperimento del materiale disponibile.....	33
2.2. Metodologia applicata al caso studio	36
3. Rilievo architettonico e modellazione	37
3.1. Metodologia applicata al caso studio	37
3.2. creazione modello architettonico pre-rilievo	39
3.3. Rilievo in situ	41
4. I vantaggi del BIM per la modellazione strutturale	45
4.1. Proprietà oggetto fisico.....	47
4.1.1. Travi.....	47
4.1.2. Pilastri.....	54
4.1.3. Solaio.....	58
4.1.4. Muri.....	60
4.1.5. Fondazioni.....	62
4.2. Visualizzazione Livello di Conoscenza elementi strutturali.....	65

4.3.	Proprietà oggetto analitico	67
4.3.1.	Travi.....	67
4.3.2.	Pilastrini.....	74
4.3.3.	Solai.....	75
4.3.4.	Muri.....	77
4.3.5.	Fondazioni.....	79
4.4.	Carichi e combinazioni	81
5.	Rilievo strutturale	84
5.1.	Pianificazione.....	84
5.1.1.	Utilizzo masse concettuali per il trattamento dei dati	85
5.1.2.	Parametri impiegati per la prova pacometrica.....	86
5.1.3.	Prova sclerometrica	88
5.1.4.	definizione pilastro associato	89
5.2.	Normativa di riferimento	93
5.3.	Descrizione indagini	95
5.3.1	Prova pacometrica	95
5.3.1.1	Descrizione dello strumento.....	95
5.3.1.2	Principio fisico sfruttato.....	96
5.3.1.1.	Descrizione della prova e risultati ottenuti	96
5.3.2	Prova sclerometrica	100
5.3.2.1	Descrizione della strumentazione.....	100
5.3.2.2	Principio fisico sfruttato	101
5.3.2.3	Descrizione della prova e risultati ottenuti.....	102
5.4.	Piano delle indagini	106
6.	Interoperabilità tra i software	107
6.1	Scelta del software di calcolo	107

6.2	Individuazione punti di attenzione per l'esportazione	110
6.2.1	Eccentricità trave-pilastro.....	110
6.2.1.1.	Soluzione impiegata.....	111
6.2.1.2.	Soluzione alternativa	112
6.2.1.3.	Analisi in Robot Structural Analysis	114
6.2.1.4.	Verifica peso proprio struttura	115
6.2.1.5.	verifica del momento flettente	119
6.2.1.6.	struttura senza eccentricità.....	122
6.2.2.	Sovrapposizione trave-solaio	124
6.2.2.1.	definizione del peso specifico del solaio	125
6.2.2.2.	Calcolo del peso volumico del solaio ridotto.....	127
6.2.3.	Ripartizione dei carichi tamponatura-trave.....	132
7.	Modellazione e analisi strutturale sul software di calcolo	137
7.1.	Controllo del modello ed esportazione sul software di calcolo.....	137
7.1.1	Controllo analitico	138
7.1.2.	Controllo peso proprio della struttura	138
7.2.	Operazioni post esportazione	140
7.2.1.	Impostazione del modello di calcolo per solai.....	140
7.2.2.	Generazione intersezioni sistemi di travi del tetto.....	145
7.2.3.	Modifica sezione travetti del solaio	147
7.2.4.	Applicazione dei carichi.....	148
7.3.	Analisi dei carichi.....	149
7.3.1.	Cenni teorici	149
7.3.2.	Azioni permanenti.....	151
7.3.2.1.	Peso proprio elementi strutturali (G)	151
7.3.2.2.	Peso proprio elementi tamponature (G ₁).....	152

7.3.2.3. Peso proprio copertura (G_2)	152
7.3.3. sovraccarichi.....	153
7.3.3.1. Sovraccarichi Categoria C (Q_1)	153
7.3.3.2. Sovraccarichi Categoria H (Q_2).....	154
7.3.4. Azione del vento (Q_3)	155
7.3.5. Azione della neve (Q_4).....	162
7.3.6. Combinazione delle azioni	164
7.3.7. Combinazione dei carichi in Robot	167
7.3.8. Diagrammi.....	168
7.4. Verifica di alcuni elementi strutturali.....	169
7.4.1. Cenni teorici.....	169
7.4.1.1. Verifica a pressoflessione	169
7.4.1.2. Verifica a taglio	170
7.4.2. Elementi indagati.....	172
8. Risultati	189
8.1. Modellazione strutturale con metodologia BIM.....	189
8.2. Prove strutturali in situ.....	190
8.3 interoperabilità con il software di calcolo.....	191
9. Conclusioni e sviluppi futuri	193
Allegato: Relazione tecnica del piano di indagini e prove in situ	194
Bibliografia	200
Sitografia	201

Indice delle figure

Figura 1: Sette dimensioni del BIM.....	17
Figura 2: Processo di condivisione tra i vari professionisti consentito dalla metodologia BIM.	18
Figura 3: MacLeamy curve.	19
Figura 4: Confronto tra i due livelli di condivisione delle informazioni, quello monodirezionale e quello circolare.....	20
Figura 5: Immagine metaforica del confronto tra la progettazione tradizionale e quella con il BIM.	21
Figura 6: Sviluppo della metodologia BIM nel mondo.....	23
Figura 7: Timeline per l'obbligatorietà negli appalti pubblici.	24
Figura 8: Esempio di applicazione di diversi LOD al medesimo elemento trave.....	25
Figura 9: Esempio dei diversi casi di LOD applicati ad un muro.	26
Figura 10: Metodologia A.....	27
Figura 11: Metodologia B.....	28
Figura 12: Metodologia C.....	28
Figura 13: Inquadramento territoriale della scuola.....	29
Figura 14: Particolare della vista dall'alto.....	29
Figura 15: Pianta del piano interrato.	30
Figura 16: Vista frontale dell'ingresso.	30
Figura 17: Tipologia costruttiva SAP per i solai.....	31
Figura 18: Particolare di corrosione delle barre d'armatura e conseguente rottura del laterizio. ...	31
Figura 19: Struttura portante del tetto.....	32
Figura 20: Esempio prospetto fornitoci dal Comune di Torino, stato di fatto.	33
Figura 21: Esempio prospetto fornitoci dal Comune di Torino, stato di progetto.	33
Figura 22: Particolare intervento prevenzione incendio.	34
Figura 23: Riassunto documentazione Ufficio scolastica di Torino.	34
Figura 24: Particolare tavola solaio piano terra.....	35
Figura 25: Documentazione di partenza.....	35
Figura 26: Metodologia applicata al caso studio.	38
Figura 27: Allineamento muro con riferimento griglia.	39
Figura 28: Pianta piano primo impiegata nel rilievo.....	41
Figura 29: Riassunto nomenclatura locali.....	42

Figura 30: Particolare di output del rilievo geometrico per il primo piano.....	42
Figura 31: Strumenti impiegati per la campagna di misurazioni in situ.	43
Figura 32: Vista dell'ingresso della scuola.	43
Figura 33: Vista all'ingresso del sottotetto.	44
Figura 34: Aree accessibili del sottotetto.	44
Figura 35: Famiglia pilastri di default in ambiente Revit.	45
Figura 36: Metodologia per creazione parametri di progetto.....	45
Figura 37: Modelli e proprietà.	46
Figura 38: Proprietà fisiche trave.....	47
Figura 39: Posizionamento trave rispetto all'asse z.....	48
Figura 40: Duplica materiale.	48
Figura 41: Sezioni modificabili del materiale.	49
Figura 42: Proprietà fisiche A_calcestruzzo.	49
Figura 43: Densità cemento armato.	50
Figura 44: Tipo di trave.	51
Figura 45: Sezione dimensioni trave.....	51
Figura 46: Sezione <i>Altro</i> per le travi.....	51
Figura 47: Parametro condiviso Immagine elemento.	52
Figura 48: Immagine, https://www.flickr.com/photos/157746045@N08/42638602961/in/album-72157697730678945/	53
Figura 49: Importazione parametro Densità nel progetto.	53
Figura 50: Proprietà pilastro.	54
Figura 51: Stile pilastro.	54
Figura 52: Materiale strutturale.....	55
Figura 53: Sezione strutturale.....	55
Figura 54: Dimensioni geometriche pilastro.....	55
Figura 55: Sezione <i>Altro</i> per le travi.....	56
Figura 56: Proprietà parametro Identificativo.....	57
Figura 57: Immagine https://www.flickr.com/photos/157746045@N08/42587873082/in/album-72157697730678945/	57
Figura 58: Proprietà solaio.....	58
Figura 59: definizione dei parametri relativi al solaio in latero cemento.....	58

Figura 60: Sezione struttura del solaio.	59
Figura 61: Parametri in altro per i solai.	59
Figura 62: Proprietà muro.....	60
Figura 63: Stratigrafia muro di fondazione.	61
Figura 64: Parametri contenuti nella sezione Altro.	61
Figura 65: Proprietà plinti.	62
Figura 66: Parametri in Altro, plinto.	63
Figura 67: Proprietà cordolo.	63
Figura 68: Parametri contenuti nella sezione Altro.	64
Figura 69: Proprietà oggetti geometrici.....	64
Figura 70: Parametri nella sezione Altro degli elementi.....	64
Figura 71: Inserimento parametro livello di dettaglio.	65
Figura 72: livello di dettaglio strutturale.	66
Figura 73: Modello analitico della struttura.	67
Figura 74: Parametri trave modello analitico.	67
Figura 75: Possibilità di gestione del collegamento analitico.....	68
Figura 76: Visualizzazione in ambiente Revit del collegamento analitico trave-pilastro.	68
Figura 77: Creazione collegamento analitico sistema di travi-muro di appoggio.	69
Figura 78: Possibilità per la gestione dell'elemento analitico in ambiente Revit.....	69
Figura 79: Proprietà analitiche.....	69
Figura 80: Allineamento analitico.	70
Figura 81: Impostazioni strutturali.....	70
Figura 82: Tolleranze modello analitico.....	70
Figura 83: Rilevamento automatico linea analitica trave: estradosso.	71
Figura 84: Allineamento analitico.	71
Figura 85: Possibilità allineamento analitico.	71
Figura 86: Tipologia di vincolo agli estremi dell'elemento analitico.	72
Figura 87: Rilasci/Forze dell'elemento.....	72
Figura 88: Possibilità di gestione vincoli iniziali e finali dell'elemento.	72
Figura 89: Forze all'estremità dell'elemento.	73
Figura 90: Proprietà pilastri analitici.....	74
Figura 91: Pilastri analitici nella vista architettonica di una porzione di solaio.....	75

Figura 92: Assenza materiale fisico al pavimento analitico creato con il plug-in STA DATA.	76
Figura 93: Modello analitico del solaio non poggiate sulle travi principali.	76
Figura 94: Modica area analitica del solaio.	77
Figura 95: Proprietà relative al muro analitico.	77
Figura 96: Sfalsamento modelli analitici.	78
Figura 97: Allineamento analitico sulla superficie esterna dell'elemento.	78
Figura 98: Regolazione analitica per i muri.	79
Figura 99: Parametri plinto analitico.	79
Figura 100: Proprietà oggetto analitico.	80
Figura 101: Condizioni di carico in Revit.	81
Figura 102: Definizione dei carichi in Revit.	81
Figura 103: Carico V3 in Robot.	82
Figura 104: Combinazione dei carichi in Revit.	83
Figura 105: Prove in situ realizzate al piano interrato.	84
Figura 106: Parametrizzazione dimensioni massa concettuale.	85
Figura 107: Parametri misurazioni pacometro.	86
Figura 108: Importazione parametri condivisi in quelli di progetto.	87
Figura 109: Compilazione parametri.	87
Figura 110: Compilazione massa sclerometro.	88
Figura 111: Script dynamo per il collegamento identificativo-pilastro associato.	89
Figura 112: Parametro per la visualizzazione degli elementi indagati.	89
Figura 113: Importazione parametro condiviso.	90
Figura 114: Filtro visualizzazione elementi con prova pacometrica.	90
Figura 115: Impostazione visiva del filtro: prova pacometrica.	91
Figura 116: Elementi indagati con prova pacometrica.	91
Figura 117: Impostazione visiva del filtro: prova sclerometrica.	92
Figura 118: Elementi indagati con prova sclerometrica.	92
Figura 119: Tabella 11.1 definizione dei livelli di conoscenza.	93
Figura 120: Tabella 11.2a: Descrizione verifiche.	94
Figura 121: Unità di emissione e lettura del campo magnetico/sonda emittente e ricevente il campo magnetico.	95
Figura 122: Esempio di prova pacometrica su pilastro.	97

Figura 123: Confronto armatura da carpenteria e rilievo piano interrato	98
Figura 124: Plug-in Revit-Robot.	107
Figura 125: Possibilità di esportazione Revit-Robot.	108
Figura 126: Impostazioni di trasferimento Revit-Robot.	108
Figura 127: Famiglie esportate da Revit a Robot.....	109
Figura 128: Telaio spaziale con eccentricità.	110
Figura 129: Restituzione analitica in Revit.	111
Figura 130: Impiego collegamento analitico.....	111
Figura 131: Collegamento analitico trave.....	112
Figura 132: Impostazione gradi di libertà elastic link.....	112
Figura 133: Vista 3D pilastro-muro eccentrici.....	113
Figura 134: Posizionamento analitico elementi strutturali.	113
Figura 135: Vista 3D della struttura in Robot.	114
Figura 136: Diagramma momento flettente dovuto al solo peso proprio.	114
Figura 137: Creazione parametro condiviso densità.	115
Figura 138: Creazione parametro di progetto densità.	115
Figura 139: Creazione abaco peso travi.	116
Figura 140: Definizione dei campi dell'abaco.	116
Figura 141: Parametro definito con funzione.....	117
Figura 142: Impostazione calcola totali per un parametro.	117
Figura 143: Ordinamento/raggruppamento solo totali.....	118
Figura 144: Abaco peso travi.....	118
Figura 145: Abaco peso pilastri.....	118
Figura 146: Reazioni vincolari sulla struttura.	119
Figura 147: Differenza calcolo peso proprio Revit-Robot.....	119
Figura 148: Telaio in cui si è verificato il momento flettente.	119
Figura 149: Formulario sollecitazioni.....	120
Figura 150: Vista momento flettente portale tramite Robot.	120
Figura 151: Differenza calcolo analitico e tramite Robot del momento in campata.	121
Figura 152: Differenza calcolo analitico e tramite Robot del momento all'incastro.....	121
Figura 153: Impostazione ignore self-weight esportazione Revit-Robot.	121
Figura 154: Momento flettente con peso proprio aggiunto come carico.	122

Figura 155: Modello senza eccentricità: vista in Revit e momento flettente dovuto al peso proprio in Robot.....	122
Figura 156: Differenza percentuale momento all'estremo finale del pilastro.	123
Figura 157: Differenza percentuale momento massimo in campata trave.....	123
Figura 158: Modellazione solaio a partire dal filo esterno delle travi e relativa restituzione analitica.	124
Figura 159: Tentativo 1, inserimento elastic link con relativo errore di Robot.....	124
Figura 160: Tentativo 2, solaio fittizio con peso specifico nullo e applicazione del carico del solaio sulla sua effettiva area.	125
Figura 161: Tipologia 1 solaio, blocco centrale.....	126
Figura 162: Tipologia 2 solaio, blocchi adiacenti a quello centrale.	126
Figura 163: Caso 1, momento flettente solaio alleggerito e solaio non alleggerito.....	128
Figura 164: Differenza momento massimo in campata.....	129
Figura 165: Differenza momento all'incastro.	129
Figura 166: Solaio lungo linea media travi, $A= 19 \text{ m}^2$ e solaio da bordo trave, $A= 15.39\text{m}^2$	129
Figura 167: Caso 2, momento flettente solaio alleggerito e solaio non alleggerito.....	130
Figura 168: Differenza momento massimo in campata.....	130
Figura 169: Differenza momento all'incastro.	130
Figura 170: Solaio lungo linea media travi, $A= 27\text{m}^2$ solaio da bordo trave, $A=23.49\text{m}^2$	131
Figura 171: Caso 3, momento flettente solaio alleggerito e solaio non alleggerito.....	131
Figura 172: Differenza momento massimo in campata.....	132
Figura 173: Differenza momento all'incastro.	132
Figura 174: Riassunto differenze percentuali.	132
Figura 175: Struttura elementare indagata con materiale impiegato da NTC 2008.	133
Figura 176: Impostazione strutturale della parete.	133
Figura 177: Caso senza pannello: visualizzazione 3D in Revit e momento flettente ottenuto in Robot.....	134
Figura 178: Differenza percentuale massimo momento in campata analitico-Robot.	134
Figura 179: Differenza percentuale momento all'incastro analitico-Robot.	134
Figura 180: Vista analitica del portale in Revit.	135
Figura 181: Differenza momento massimo in campata, calcolo analitico-Robot.....	136
Figura 182: Differenza momento all'incastro, calcolo analitico-Robot.	136

Figura 183: Verifica appoggi sistema di travi del tetto.....	138
Figura 184: Andamento reazioni vincolari blocco centrale.	139
Figura 185: Verifica peso proprio blocco centrale Revit-Robot.....	139
Figura 186: Modello di calcolo dei pannelli di default guscio.	140
Figura 187: Differenza momento flettente in campata tra modello e guscio e calcolo analitico. ..	141
Figura 188: Modello di calcolo del pannello.....	141
Figura 189: Impostazione caratteristiche solaio bidirezionale.	141
Figura 190: Caso 1, caso 2 e caso 3.....	142
Figura 191: Ripartizione dei carichi solaio-trave caso 1.....	142
Figura 192: Ripartizione dei carichi solaio-trave caso 2.....	143
Figura 193: Ripartizione dei carichi solaio-trave caso 3.....	143
Figura 194: Momento flettente caso 1.	143
Figura 195: Momento flettente caso 2.	144
Figura 196: Momento flettente caso 3.	144
Figura 197: Differenza momento flettente calcolo analitico e con il modello bidirezionale.	144
Figura 198: Definizione geometrica dell'area di influenza delle travi.	145
Figura 199: Creazione intersezione delle barre.	145
Figura 200: Travi inflesse in maniera separata.	146
Figura 201: Visualizzazione deformata sistema di travi del tetto.....	146
Figura 202: Sezione travetto solaio ultimo piano.	147
Figura 203: Applicazione carico superficiale al pannello 226.	148
Figura 204: Riassunto carichi applicati.....	149
Figura 205: Condizione di carico del peso proprio degli elementi strutturali di default in Revit....	151
Figura 206: Condizione di carico contenente peso proprio.....	151
Figura 207: Carichi permanenti non strutturali, peso proprio elementi divisorii interni.....	152
Figura 208: Sovraccarico per la categoria C.	153
Figura 209: sovraccarico per la categoria H.....	154
Tabella 210: Coefficienti v_b , 0 , k_a , a_s secondo la NTC 2008.	155
Figura 211: impostazione carico del vento sulla struttura.	156
Figura 212: vista della simulazione.	156
Figura 213: Figura C3.3.2 Valori assunti da cpe al variare di α , C3.3.10.1, pag.23 Circolare 2 febbraio 2009, n. 617.....	157

Figura 214: Categoria di esposizione del sito.	158
Figura 215: Classe di rugosità del terreno.	158
Figura 216: Mappe zone territorio italiano.....	159
Figura 217: Categoria sito caso studio.	159
Figura 218: Andamento coefficiente esposizione.	160
Figura 219: Vista viti per il vincolo tetto-travi.	161
Figura 220: Zona I per la suddivisione su base nazionale rispetto ai valori caratteristici minimi del carico della neve al suolo.	163
Figura 221: coefficienti di forma in funzione dell'inclinazione della falda.	163
Figura 222: Tabella 3.4.I – Valori di C_E per diverse classi di topografia.	163
Figura 223: Coefficienti parziali per le azioni.	164
Figura 224: Coefficienti parziali per le azioni variabili.	165
Figura 225: Combinazioni allo SLU con coefficienti parziali azioni.	166
Figura 226: Combinazioni manuali in Robot.	167
Figura 227: Coefficienti combinazione V1 dominante.....	167
Figura 228: Diagramma di momento M_y per la combinazione di carico 1: sovraccarico categoria C dominante.....	168
Figura 229: Deformata della struttura per la combinazione di carico 1: sovraccarico categoria C dominante.....	168
Figura 230: Comportamento a traliccio dell'elemento strutturale armato a taglio.....	170
Figura 231: Dati ottenuti tramite rilievo strutturale in situ per il pilastro 43.....	172
Figura 232: Armatura pilastro 43 da carpenteria.	172
Figura 233: Dati ottenuti tramite rilievo strutturale in situ per il pilastro 43.....	173
Figura 234: Armatura pilastro 43 da carpenteria.	173
Figura 235: Posizionamento trave 85 Piano Terra.....	173
Figura 236: Armatura longitudinale trave 85.	174
Figura 237: Armatura trasversale da carpenteria trave 85 Piano Terra.	174
Figura 238: Posizionamento trave 90 Piano Terra.....	175
Figura 239: Armatura longitudinale trave 90.	175
Figura 240: Armatura trasversale trave 90.	176
Figura 241: Selezione pilastro e inserimento armatura.....	176
Figura 242: Combinazioni di carico considerate per la verifica.	177

Figura 243: Inserimento barre longitudinali pilastro 43.....	177
Figura 244: Inserimento staffe pilastro 43.....	178
Figura 245: Diagramma di interazione P43.....	178
Figura 246: Inserimento armatura longitudinale.....	183
Figura 247: Inserimento armatura trasversale.	183
Figura 248: Diagramma interazione P15.....	184
Figura 249: Inserimento armatura trasversale.	184
Figura 250: Impostazione ripartizione delle staffe.	185
Figura 251: Definizione delle barre longitudinali di armatura principali.....	185
Figura 252: Inserimento barre longitudinali aggiuntive superiori.	186
Figura 253: Inserimento barre longitudinali secondarie inferiori.	186
Figura 254: Dominio di resistenza a flessione della trave 85.....	187
Figura 255: Dominio di resistenza a taglio della trave 85.....	187
Figura 256: Dominio di resistenza a flessione della trave 90.....	188
Figura 257: Dominio di resistenza a taglio della trave 90.....	188
Figura 258: Modello strutturale Caso studio G. Parini.	189
Figura 259: Riassunto gestione punti di attenzione interoperabilità.	191

Abstract

L'obiettivo della tesi è indagare l'interoperabilità tra software di modellazione parametrica e software di calcolo strutturale nell'ambito di un processo di indagine basato sulla metodologia BIM. Il caso studio è un istituto scolastico e rientra nel progetto TOBIM, che ha l'obiettivo di ripristinare la conoscenza ed organizzare le informazioni in modo digitale degli edifici pubblici della Città di Torino. In questo scenario sono esplorate le potenzialità offerte dall'impostazione di un database informativo rappresentativo della componente strutturale e sono ricercate modalità per ottimizzare il trasferimento delle informazioni.

Introduzione

Oggi il BIM rappresenta una grande possibilità per il rilancio del mondo dell'edilizia e delle infrastrutture. Esso infatti è sinonimo di freschezza, innovazione e condivisione delle informazioni tra le varie figure che collaborano nella realizzazione di un progetto e può trasferire al nostro settore un controllo preliminare e in fase di realizzazione dell'opera irraggiungibile con l'approccio tradizionale.

In questo sfondo il mio percorso di ricerca nasce dalla curiosità per le possibilità offerte dal Building Information Modelling per l'analisi strutturale. In particolare è stata focalizzata l'attenzione sul flusso di lavoro che, a partire dal modello architettonico, consente di esportarne il modello analitico sul software di calcolo per la verifica degli elementi strutturali. In ottica BIM, i risultati ottenuti sono stati implementati sul progetto di partenza. L'interoperabilità è stata studiata a partire da modelli elementari in cui è stato più facile imparare a governare criticità come le eccentricità trave-pilastro o la ripartizione dei carichi del solaio sulle travi.

Si è potuto toccare con mano, inoltre, la potenzialità offerta dalla nuova metodologia per la pianificazione e realizzazione del rilievo strutturale in situ, momento in cui, il BIM può assistere il progettista nella visualizzazione dell'elemento da indagare e nella trascrizione del risultato ottenuto dalla prova sui materiali in situ.

Il percorso si è concluso con la verifica allo Stato Limite Ultimo di due travi e due pilastri tra i più sollecitati in modo da cimentarsi, in maniera didattica, nell'attività dell'ingegnere strutturista.

Indice degli acronimi

- 3D: terza dimensione
- BIM: Building Information Modelling
- MIT: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
- IFC: Industry Foundation Classes
- AIA: American Institute of Architects
- UNI: Ente Nazionale di Unificazione
- LDD: Livello Di Dettaglio

1. Aspetti chiave della metodologia BIM

1.1. Definizioni

Il termine BIM indica l'acronimo di Building Information Modelling e rappresenta una *procedura ottimizzata per la pianificazione, realizzazione e gestione di costruzioni tramite l'ausilio di software dedicati alla modellazione digitale tridimensionale* (A. Osello, *il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti*, 2012).

Protagonista di tutta la metodologia BIM è proprio l'informazione, che si traduce in conoscenza per tutta la vita utile del progetto: dalle fasi preliminari alla realizzazione, passando per la gestione della costruzione e manutenzione infine demolizione.

Si passa quindi da una concezione di progettazione classica, al più tridimensionale, ad una multidimensionale a cui si aggiungono alle tre spaziali le seguenti dimensioni:

- Tempi;
- Costi;
- Management;
- Sostenibilità.



Figura 1: Sette dimensioni del BIM.

Fonte: <http://biblus.acca.it/focus/le-7-dimensioni-del-bim/>.

Il modello, quindi, diventa un vero e proprio database dinamico dell'opera in cui, attraverso l'impiego di parametri e famiglie, il professionista è in grado di avere un grado di controllo elevato

rispetto allo stato di avanzamento del lavoro. Il BIM infatti, è anche sinonimo di condivisione e collegamento tra le varie figure che prendono parte al progetto attraverso un unico modello in cui i vari settori di competenza possono essere modificati soltanto dal professionista di riferimento.

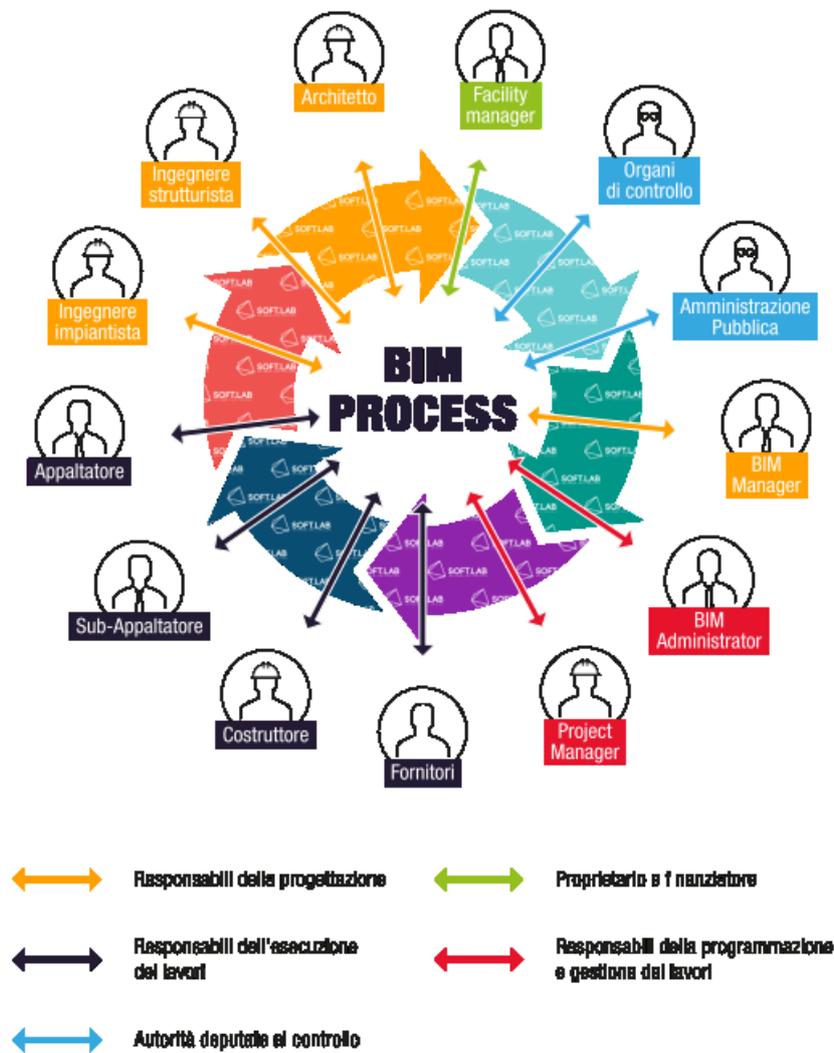


Figura 2: Processo di condivisione tra i vari professionisti consentito dalla metodologia BIM.

Fonte:http://www.google.it/search?q=le+figure+professionali+nel+processo+bim&rlz=1C1GCEA_enIT779IT779&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj9zI745vTeAhWlhaYKHZawATkQ_AUIECgD&biw=1229&bih=578#imgrc=lzWx06sl_xBz_M:

Dalla letteratura riscontriamo che la maggior quantità e precisione delle informazioni richieste nella fase preliminare e iniziale nella realizzazione di un'opera sia più dispendiosa in termini di tempo e risorse rispetto alla progettazione classica.

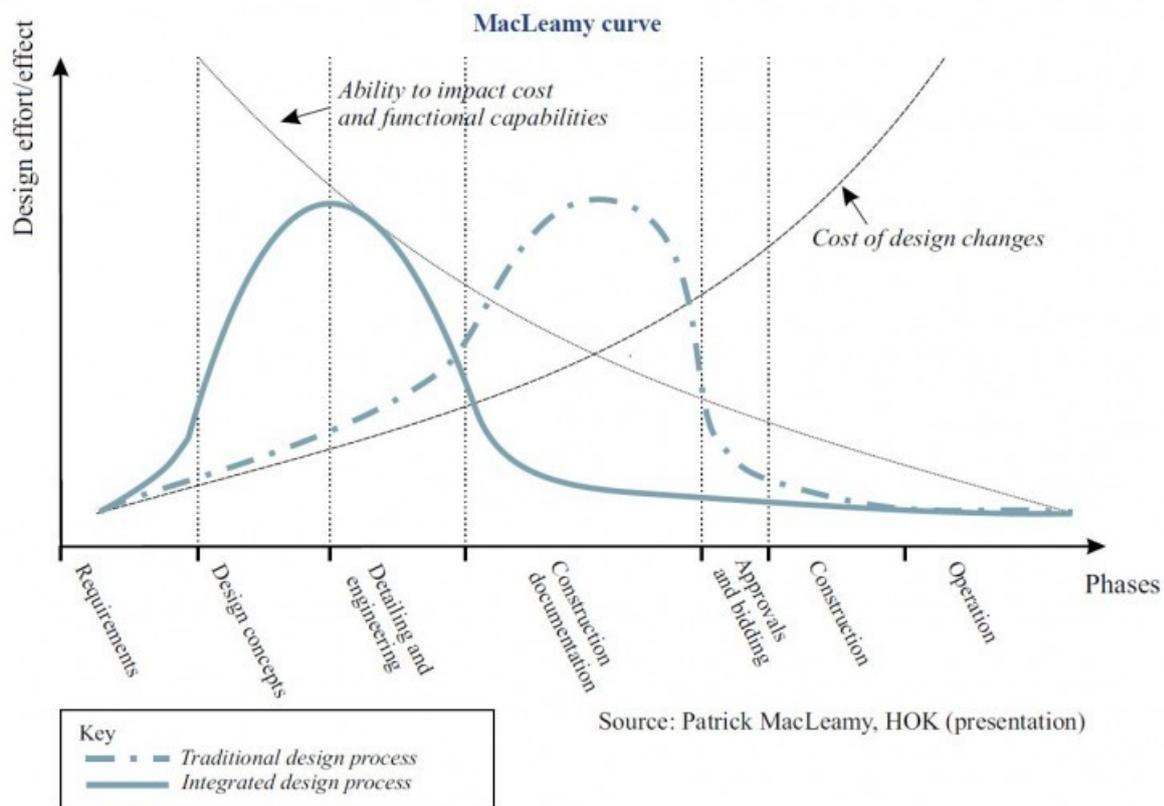


Figura 3: MacLeamy curve.

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

Come possiamo osservare nel grafico concepito dall'architetto statunitense Patrick MacLeamy, la possibilità di rendere in modo significativo sui costi e sulla gestione intelligente di una certa attività è molto alta nella fase preliminare della realizzazione di un'opera: l'impiego del BIM consente di avere un grado di dettaglio alto sull'opera fin dall'inizio e quindi di optare per la scelta progettuale migliore.

Con la metodologia classica invece, risulta più veloce iniziare la cantierizzazione ma la bassa quantità e qualità di informazioni che lo rende possibile, provoca poi delle interferenze e problemi di gestione in uno stato di avanzamento del progetto successivo in cui variare la scelta progettuale non è più possibile e minimizzare gli effetti del problema comporta costi maggiori.

1.2. Iter storico

Tra la fine del ventesimo secolo e l'inizio del ventunesimo secolo alcuni professionisti americani tra cui ricordiamo l'architetto e manager Jerry Laiserin hanno ricercato un processo atto alla digitalizzazione dell'informazione relativa al processo edilizio prendendo spunto dalla produzione meccanica. Nei processi industriali, infatti, sono stati implementati software tridimensionali che consentono di inserire fin dalle fasi primordiali della progettazione le informazioni del prototipo come il materiale, le caratteristiche meccaniche ecc. in modo tale da sottoporli a simulazioni di carico per conoscerne il comportamento reale di utilizzo.

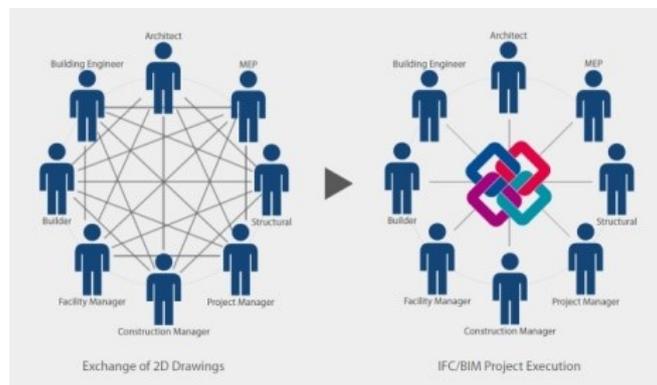


Figura 4: Confronto tra i due livelli di condivisione delle informazioni, quello monodirezionale e quello circolare.

Fonte: https://www.google.it/search?q=formato+ifc+bim&rlz=1C1GCEA_enIT779IT779&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiOqrbJ6PTEAhVLDiwKHUkbD6QQ_AUIDigB&biw=1229&bih=539&dpr=1.56#imgrc=QTqZyFRFdaD4FM

Il mondo dell'edilizia storicamente è sempre stato più legato al disegno bidimensionale, prima a mano attraverso l'uso del tecnigrafo per poi passare ad una prima digitalizzazione attraverso programmi di rappresentazione automatica di cui la piattaforma americana Autodesk è stata apri fila con il software Autocad.

Nella rappresentazione tradizionale, per esempio, un muro viene rappresentato semplicemente con due righe parallele con l'aggiunta di una campitura per rendere il materiale all'interno; con l'implementazione del BIM invece, il muro è un oggetto tridimensionale contenente al suo interno tutte le informazioni utili: il volume, il materiale, la posizione, le dimensioni, ecc.

Tale possibilità consente di considerare l'oggetto muro già in un'ottica successiva: un elemento che delimita un locale di cui si vuol fare un'analisi energetica o una tamponatura per quella strutturale. Un crescente numero di software, quindi, stanno nascendo per svolgere applicazioni

precise a partire dal modello tridimensionale, che consentono il calcolo della grandezza da indagare con una precisione impensabile con i metodi di progettazione classici.

Oggi giorno ci troviamo in un momento storico simile a quello in cui trenta anni fa i progettisti hanno dovuto scegliere se continuare con il disegno manuale o se passare a quello automatico, sta a noi il compito di capitalizzare le potenzialità della nuova metodologia in modo tale da garantire un mondo delle costruzioni che sia sempre più efficiente.



Figura 5: Immagine metaforica del confronto tra la progettazione tradizionale e quella con il BIM.

Fonte: Corso di modellazione digitale, titolare Anna Osello.

1.3. Stato di sviluppo nel mondo e situazione italiana

Come si è accennato nel paragrafo precedente, la metodologia BIM nasce nel mondo anglosassone, nello specifico negli Stati Uniti. Già nel 2003 infatti l'organo del governo centrale statunitense a capo della gestione dei servizi il *General Services Administration (GSA)* emanava il *National 3D-4D-BIM Program* con cui rendeva obbligatorio l'utilizzo del BIM per i lavori pubblici.

Con la Direttiva 2014/24/EU la comunità europea introduce ai membri appartenenti alcune linee per l'assimilazione della tecnologia per la realizzazione delle opere pubbliche in quanto mezzo per accrescere l'efficacia e la trasparenza delle procedure di appalto. Nello stesso testo, viene fissato un limite temporale di 30 mesi per il recepimento di tali direttive da parte degli Stati membri.

Nei paesi scandinavi come Finlandia, Norvegia e Svezia, storicamente aperti all'innovazione tecnologica, la metodologia è stata assimilata con estrema prontezza ed entusiasmo. Basti pensare che nel primo è stata fissata l'obbligatorietà dell'applicazione del BIM nel 2001 mentre nel secondo ne è sancito l'utilizzo per tutti i progetti promossi dall'ente che gestisce il patrimonio immobiliare dello stato. Nel terzo infine, nonostante non sia stata definita una vera e propria legge per il suo impiego al di fuori della normativa europea del 2014, il processo di digitalizzazione ha preso piede in maniera "spontanea" a riprova della sua grande applicabilità.

Nel mondo anglosassone il BIM ha trovato un puntuale recepimento, in particolare in Gran Bretagna il suo impiego è diventato obbligatorio a partire dal 2016 mentre in Australia, Canada e Singapore è in crescente diffusione.

Francia e Germania ugualmente, si stanno adoperando per l'attuazione della direttiva europea. In particolare la prima ha messo a punto la disposizione "Mission Numérique Batiment" per promuovere l'evoluzione digitale nel settore delle costruzioni. Il Ministero federale tedesco dei Trasporti e delle infrastrutture, ha indicato invece gli specialisti in costruzioni digitali e BIM di Hochtief Vicon come guida all'interno della road map che porterà la Germania all'obbligo dell'uso del BIM negli appalti pubblici. L'obiettivo di questo progetto è quello di implementare il BIM in infrastrutture di trasporto federale entro il 2020. L'uso del BIM sarà introdotto in tre fasi, a partire da una preparatoria che si svolgerà fino al 2017 e una fase pilo fino al 2020. La tabella di marcia ha lo scopo di rendere il processo di progettazione e costruzione più efficiente, trasparente e verificabile, in particolare su grandi progetti infrastrutturali pubblici.

In Spagna il Ministero delle Infrastrutture spagnolo ha lanciato una nuova strategia nazionale del BIM , che dovrebbe tradursi nel portarlo ad essere obbligatorio per progetti del settore pubblico attraverso un mandato graduale con punto di partenza nel 2018.

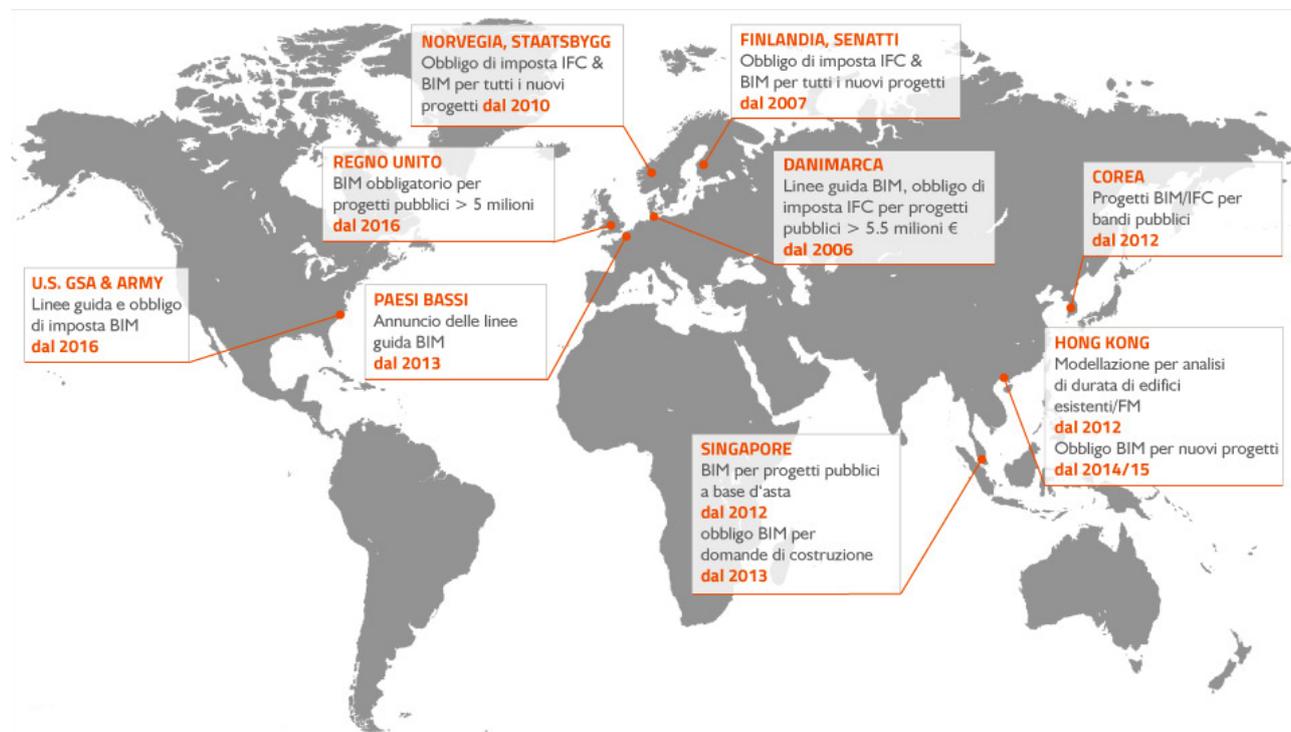


Figura 6: Sviluppo della metodologia BIM nel mondo.

Fonte: <https://www.cadenas.de/news/it/reader/items/bim-approvata-la-nuova-norma-uni-l-11337>.

L'Italia è in leggero ritardo rispetto agli altri stati membri dell'unione europea, tuttavia ha intrapreso il percorso di recepimento della direttiva europea 2014/24 con il Dgls.50 del 2016: anno che può essere considerato il vero punto di partenza per l'implementazione del BIM. Il decreto consta di 220 articoli e norma: *"l'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua , dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture"*¹. In particolare all'articolo 23 (comma 13) si fa riferimento all'impiego di *"metodi e strumenti elettronici specifici"* che utilizzano *"piattaforme interoperabili a mezzo di formati aperti non proprietari"*¹.

¹ Estratto del nuovo codice degli appalti pubblici, Dgls. 50/2016.

Nella stessa comma è inoltre presente un decreto attuativo del MIT (**DM 560/2017** dell'1/12/17 entrato in vigore il 12/01/2018) per la definizione delle modalità e i tempi di progressiva introduzione dell'obbligatorietà di metodi e strumenti elettronici specifici per la razionalizzazione delle attività di progettazione per l'edilizia e le infrastrutture. L'articolo 6 del DM 560/2017 definisce l'obbligatorietà del BIM impostandone la gradualità per gli appalti con base di gara:

- a) Pari o superiore a 100 milioni a partire dal 1 gennaio 2019;
- b) Pari o superiore a 50 milioni a partire dal 1 gennaio 2020;
- c) Pari o superiore a 15 milioni a partire dal 1 gennaio 2021;
- d) Pari o superiore a importi: vedasi art.35² Dlgs 50/2016 a partire dal 1 gennaio 2022;
- e) Pari o superiore a 1 milione a partire dal 1 gennaio 2025.

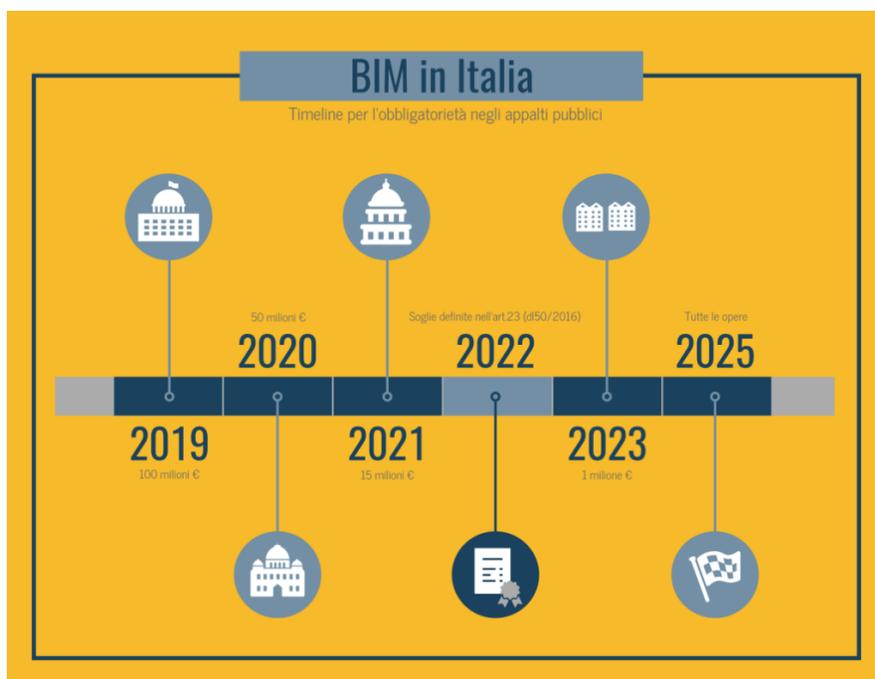


Figura 7: Timeline per l'obbligatorietà negli appalti pubblici.

Fonte: <http://www.shelidon.it/?p=5797>.

² Importi classificati in funzione delle tipologie di lavorazione: appalti pubblici di lavori e concessioni, forniture di servizi, concorsi di progettazione risultano compresi tra un intervallo di euro 135.000 e 5.225.000.

1.4. Il concetto di LOD

Il LOD per l'American Institute of Architects (AIA) indica il livello di dettaglio o quantità di contenuti caratterizzanti gli elementi del modello ma anche il Level of Development ovvero il livello di sviluppo degli stessi. La scala LOD più utilizzata al mondo è senza dubbio quella americana impostata su cinque livelli progressivi di dettaglio da 100 a 500 in funzione della finalità d'uso e dello stato di avanzamento dell'opera.

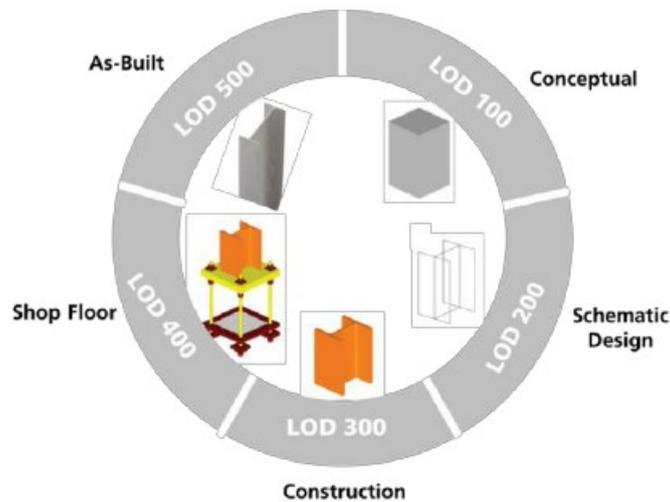


Figura 8: Esempio di applicazione di diversi LOD al medesimo elemento trave.

Fonte: AIA G202TM-2013 Project Building Information Modelling Protocol Form.

Come si può leggere nell'immagine i diversi gradi di dettaglio hanno il seguente significato:

- LOD 100: Concetto.
- LOD 200: Geometria approssimativa.
- LOD 300: Geometria precisa.
- LOD 400: Adeguato alla realizzazione.
- LOD 500: Come realizzato, As built.

Per il caso studio che si è trattato, come viene illustrato nel dettaglio al capitolo tre, è stato raggiunto un livello di dettaglio tra il LOD 200 e LOD 300 per i singoli componenti e le particolarità presenti.

Nel caso italiano la normativa che ne definisce gli standard è la **UNI11337** nella parte 9 in cui si definiscono due aspetti: il LOG inteso come livello di sviluppo dei contenuti geometrici e del LOD

che rappresenta il livello di sviluppo raggiunto nell'oggetto in termini di attributi. La suddetta classificazione è così costituita:

- LOD A: Oggetto simbolico.
- LOD B: Oggetto generico.
- LOD C: Oggetto definito.
- LOD D: Oggetto dettagliato.
- LOD E: Oggetto specifico.
- LOD F: Oggetto eseguito.
- LOD G: Oggetto aggiornato.

prospetto C.1 Esempio di LOD parete

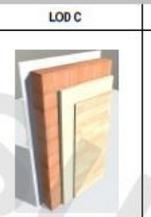
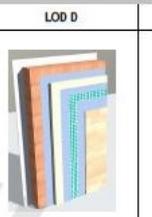
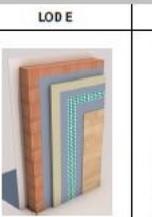
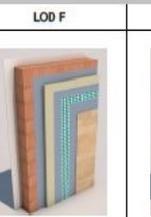
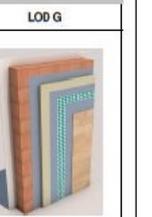
LOD A	LOD B	LOD C	LOD D	LOD E	LOD F	LOD G
						
Geometria Elemento architettonico verticale o pseudoverticale rappresentato mediante un simbolo 2D.	Geometria Solido generico per rappresentazione elemento architettonico verticale o pseudoverticale con forma, spessore e posizione approssimata.	Geometria Elemento architettonico (sistema e sottosistema) verticale o pseudoverticale rappresentato con ingombri calcolati secondo la normativa tecnica.	Geometria Elemento architettonico verticale o pseudoverticale rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono modellate tutte le stratigrafie.	Geometria Elemento architettonico verticale o pseudoverticale rappresentabile mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono incluse tutte le stratigrafie, i dati spaziali del trionfo dei materiali e le finiture.	Geometria Oggetto parete. Come LOD E (rilievo di quanto eseguito).	Geometria Oggetto parete. Nuovi interventi: come LOD F (con aggiornamenti) Manutenzione e gestione su elementi esistenti: come LOD Co D (a partire da).
Oggetto Grafica 2D (linee e campiture 2D)	Oggetto Solido 3D	Oggetto Solido 3D strutturato	Oggetto Solidi 3D complesso	Oggetto Solidi 3D complesso	Oggetto Solidi parete completa	Oggetto Solidi parete
Caratteristiche - Posizionamento di massima	Caratteristiche - Semplici geometrie di ingombro	Caratteristiche - Spessore - Lunghezza - Larghezza - Volume - Definizione dei materiali - Definizione stratigrafie principali - Definizione del sistema architettonico	Caratteristiche - Definizione stratigrafie del taglio - Spessori componenti - Struttura - Isolamento - Camera d'aria - Sottofondo supporto - Finitura - Dettaglio costruttivi per gruppi e senza riferimenti a singoli prodotti	Caratteristiche - Tipo finitura interna - Superficie finitura interna - Tipo finitura esterna - Superficie finitura esterna - Composizione Materiale/Componente - Presenza certificazioni - Capacità strutturale - Finitura - Trasmissione vapore - Valore R - Valore U - Valore assorbimento - Trasmissione acustica - Dettaglio dei componenti con singolo prodotto - Informazioni di montaggio - Materiale di supporto - Schede tecniche singoli prodotti	Caratteristiche - Manuale di manutenzione - Classificazione (UNI 8290, CSI, etc.) - Certificazioni di prodotto - Certificato di omologazione - Sistema parete finito	Caratteristiche - Data di manutenzione

Figura 9: Esempio dei diversi casi di LOD applicati ad un muro.

Fonte: <https://www.ingegneriamilano.com/2017/01/30/bim-diventa-norma-uni-113372017/>.

1.5. Interoperabilità

L'interoperabilità è una delle parole chiave del processo BIM in quanto, nel flusso di lavoro in cui diversi interpreti collaborano per la realizzazione del progetto, è necessario far in modo che le informazioni vengano trasferite correttamente tra i diversi attori. A tal proposito, generalmente, le software house provvedono a implementare dei formati di scambio interno o plug-in per consentire lo scambio dei dati tra i vari ambienti di progettazione: architettonico, impiantistico, strutturale, computo metrico ecc.. Queste possibilità di scambio consentono un livello di interoperabilità molto alta e, nello specifico il collegamento interno, consente di esportare il modello senza compiere un salvataggio intermedio che potrebbe portare ad una perdita delle informazioni. Spesso poi il collegamento è bidirezionale permettendo di aggiornare il modello architettonico con le i risultati ottenuti del software specifico.

Si possono individuare diversi flussi di lavoro per il calcolo strutturale. Per esempio si può partire dal modello architettonico (1) da cui si ricava il modello geometrico strutturale (2) necessario per la costruzione del modello di calcolo (3). Con successive elaborazioni è possibile implementare, ad esempio, le armature per le strutture in cemento armato direttamente inserite negli oggetti strutturali come travi e pilastri (4).

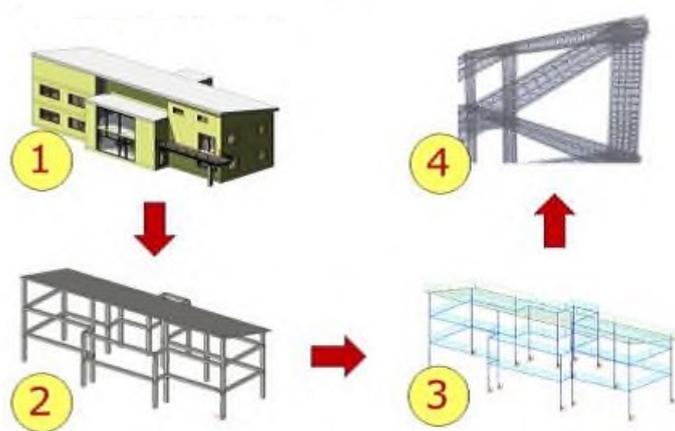


Figura 10: Metodologia A.

BIM e calcolo strutturale: teoria e pratica, S.T.A Data, pag. 19.

L'ipotesi seguente illustra il caso in cui il modello iniziale sia il modello geometrico strutturale (1), ad esempio per strutture industriali in cui questa componente è prevalente, da cui si trasmettono le informazioni per la redazione del progetto architettonico (4), per il modello di calcolo (2) e per i particolari costruttivi (3).

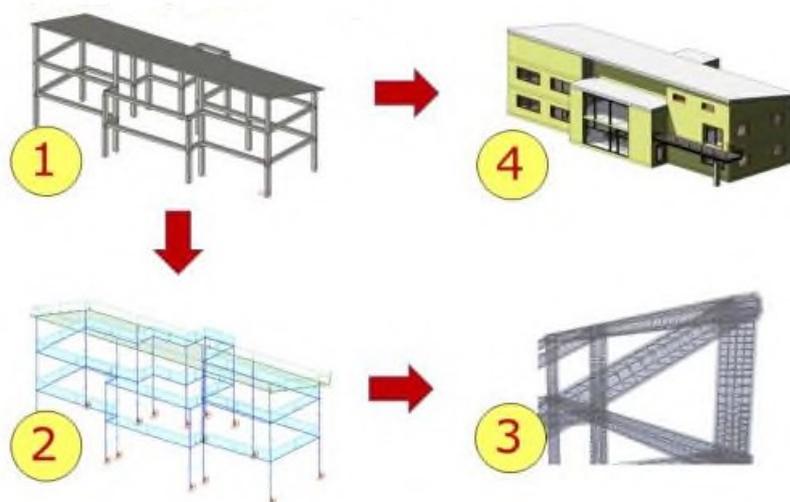


Figura 11: Metodologia B.

BIM e calcolo strutturale: teoria e pratica, S.T.A Data, pag. 20.

L'ultima possibilità è utile nel caso in cui l'incertezza strutturale sia molto elevata, per cui la prima fase è costituita dallo studio del modello di calcolo (1) a cui segue il modello geometrico strutturale (2) e il modello architettonico (3).

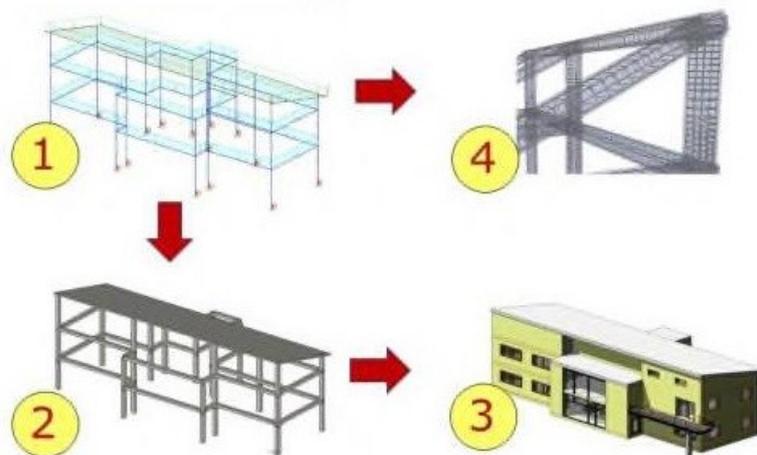


Figura 12: Metodologia C.

BIM e calcolo strutturale: teoria e pratica, S.T.A Data, pag. 21.

Qualora si lavorasse con software non della stesso produttore ci si può servire del formato IFC. La sigla è l'acronimo di Industry Foundation Classes ed è il tipo di file neutrale ed aperto che consente il passaggio del file tra le diverse discipline del progetto. L'IFC non consente modifiche ad alcun tipo di sistema creato ma permette soltanto di visualizzare le informazioni contenute all'interno.

2. Obiettivi e caso studio: la scuola per l'infanzia G. Parini.

L'obiettivo del seguente capitolo è quello di descrivere brevemente le caratteristiche principali del fabbricato preso in esame come la geometria, la tipologia costruttiva e l'inquadramento territoriale. Viene inoltre descritta la documentazione di partenza e la metodologia che è stata applicata per studiare l'interoperabilità tra Revit e Robot Structural Analysis.

La scuola per l'infanzia G. Parini è uno stabile di degli anni '70 che sorge in prossimità della stazione ferroviaria Dora in Barriera di Milano al civico 34 di via Beinasco.

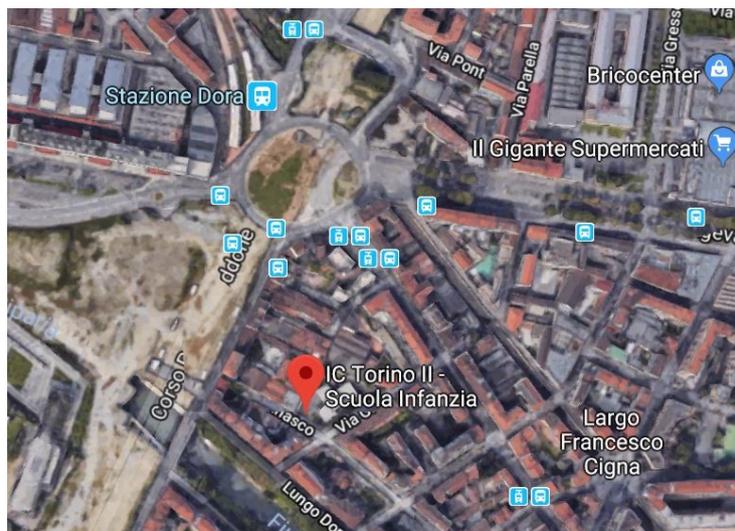


Figura 13: Inquadramento territoriale della scuola.

Fonte: Google Maps.

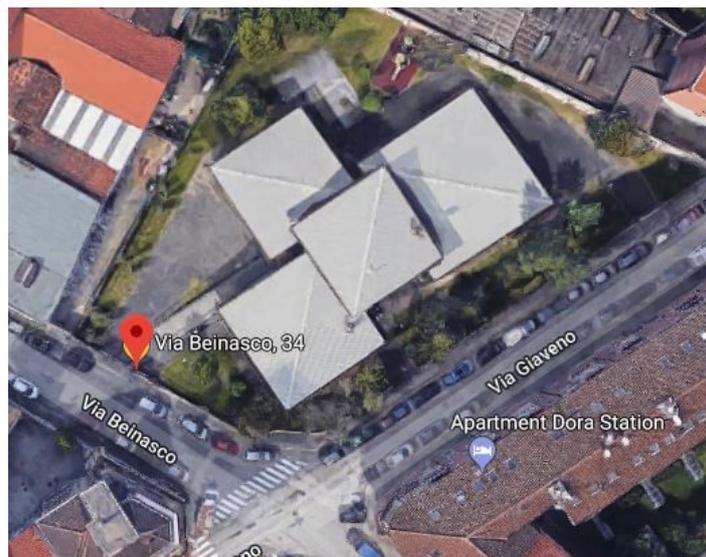


Figura 14: Particolare della vista dall'alto.

Fonte: Google Maps.

L'edificio è costituito da quattro blocchi di cui tre sono adiacenti e collegati a quello centrale che funge da distribuzione: i primi sono sviluppati su due livelli mentre l'ultimo si erge di un piano successivo per un'altezza complessiva di 10 m dal piano campagna. Il piano interrato presenta i blocchi laterali adibiti a vespaio mentre quello centrale a magazzino, il piano terra ospita la cucina e le classi per i bambini mentre il piano primo è interamente riservato all'abitazione del custode.

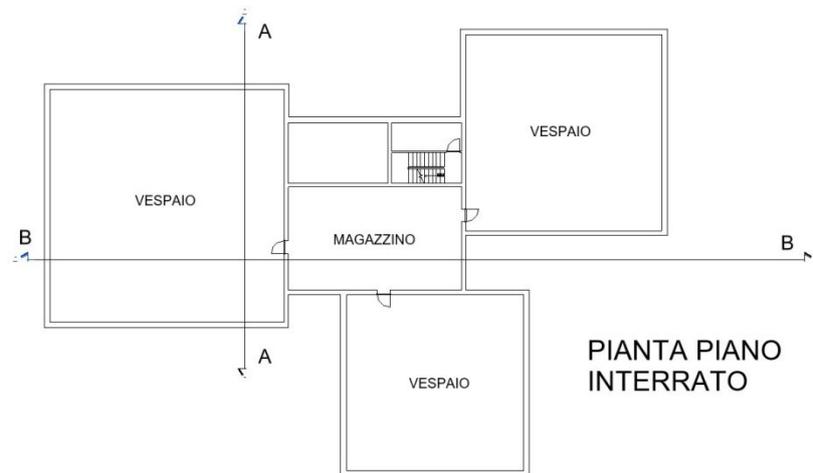


Figura 15: Pianta del piano interrato.



Figura 16: Vista frontale dell'ingresso.

La struttura portante dell'edificio è affidata ad un telaio di travi e pilastri in cemento armato che poggia su un sistema di fondazioni costituito da plinti isolati e un muro contro terra lungo tutto il perimetro del piano parzialmente interrato. I solai sono in latero-cemento gettato in opera con

una tipologia costruttiva tipica di quegli anni: il SAP. Il metodo consiste nel sostituire ai classici travetti di separazione tra le pignatte un cordolo realizzato infilando i mattoni direttamente nelle barre d'armatura che vengono poi appoggiate sul cassero ed in un secondo momento legate al resto della struttura tramite la gettata di completamento.



Figura 17: Tipologia costruttiva SAP per i solai.

La problematica più importante del SAP è la quasi totale assenza di matrice cementizia all'interno del mattone che comporta problemi di corrosione e aumento di volume della sezione che portano alla rottura del laterizio stesso.



Figura 18: Particolare di corrosione delle barre d'armatura e conseguente rottura del laterizio.

Come è stato possibile verificare tramite sopralluogo la struttura portante del tetto è affidata ad un doppio sistema di travi in legno che poggiano su dei muretti in muratura disposti sul perimetro

del locale, al di sotto della linea di colmo del tetto e a metà tra i primi due formando in tal modo uno schema statico di trave continua su tre appoggi. La copertura è stata realizzata con un lamierino di materiale polimerico impermeabile al cui esterno sono state applicate le tegole per lo scolo dell' acqua di precipitazione.



Figura 19: Struttura portante del tetto.

2.1.Reperimento del materiale disponibile

Prima della fase di rilievo architettonico in situ, si è proceduto a reperire tutta la documentazione disponibile del manufatto grazie agli uffici tecnici del comune e all'archivio della scolastica. Il primo ci ha fornito le tavole relative allo stato di pre e post intervento di manutenzione per l'ottenimento del certificato di prevenzione incendio che prevedeva l'inserimento di pannelli in calcio silicato certificato REI 120 sui muri che circondano il corpo scala. Nello specifico abbiamo potuto accedere ai dwg del:

- Prospetto Nord-est;
- Prospetto Sud-Ovest;
- Prospetto Nord-Ovest;
- Prospetto Sud-est;
- Pianta piano interrato;
- Pianta piano terra;
- Pianta piano primo;
- Vista dall'alto complesso scolastico.



Figura 20: Esempio prospetto fornitoci dal Comune di Torino, stato di fatto.



Figura 21: Esempio prospetto fornitoci dal Comune di Torino, stato di progetto.

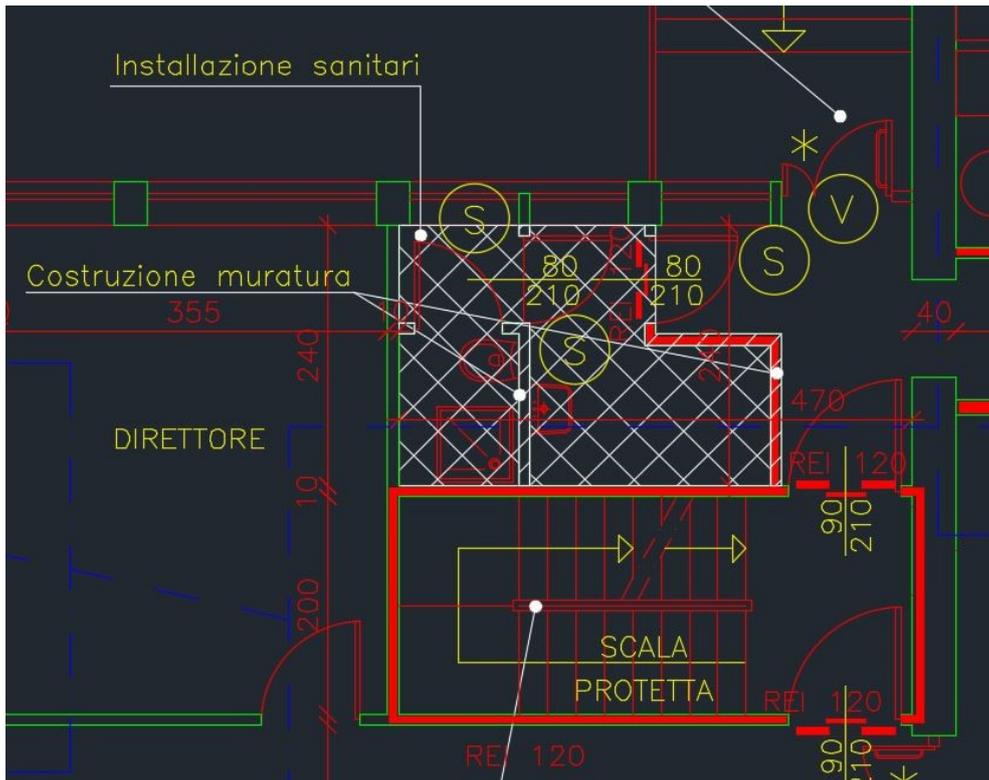


Figura 22: Particolare intervento prevenzione incendio.

In una fase successiva, si è aggiunta a tale documentazione tramite l'ufficio per la scolastica del Comune di Torino, le piante dei solai del piano terra e del primo piano: quella del piano interrato è risultata mancante. In queste tavole si possono leggere: il numero e le dimensioni di travi e pilastri, le aree dei solai e l'orditura dei travetti. Inoltre si sono rinvenute le tavole di carpenteria strutturali del progetto: queste informazioni relative agli elementi portanti dell'edificio sono state impiegate nella fase successiva di modellazione degli elementi portanti.

Piante Ufficio Scolastica di Torino	Check
TAVOLA FONDAZIONI	✓
TAVOLA CARPENTERIA SOLAIO PIANO TERRA	✗
TAVOLA CARPENTERIA SOLAIO PRIMO PIANO	✓
TAVOLA CARPENTERIA SOLAIO SECONDO PIANO	✓
CARPENTERIE TRAVI	✓
CARPENTERIE PILASTRI	✓

Figura 23: Riassunto documentazione Ufficio scolastica di Torino.

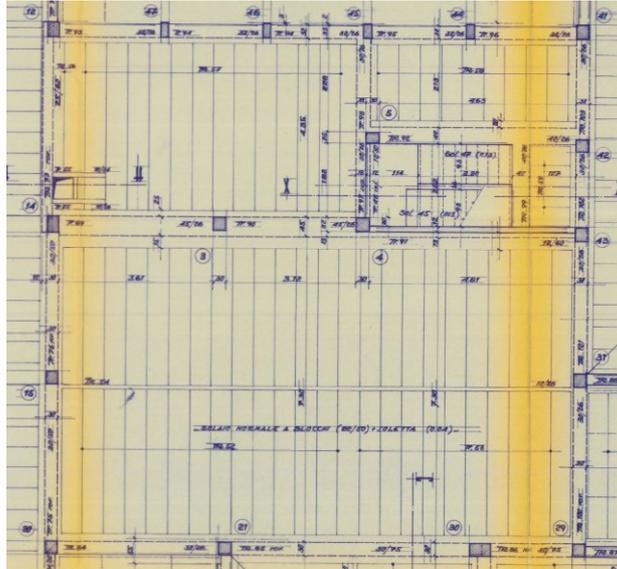


Figura 24: Particolare tavola solai piano terra.

L'archivio della scolastica, inoltre, ci ha fatto consultare il contratto d'appalto in cui vengono specificate le resistenze dei materiali impiegati nella costruzione.

- f_{cm} calcestruzzo a 28 giorni: 28 MPa.
- f_{yd} acciaio: 220 MPa.

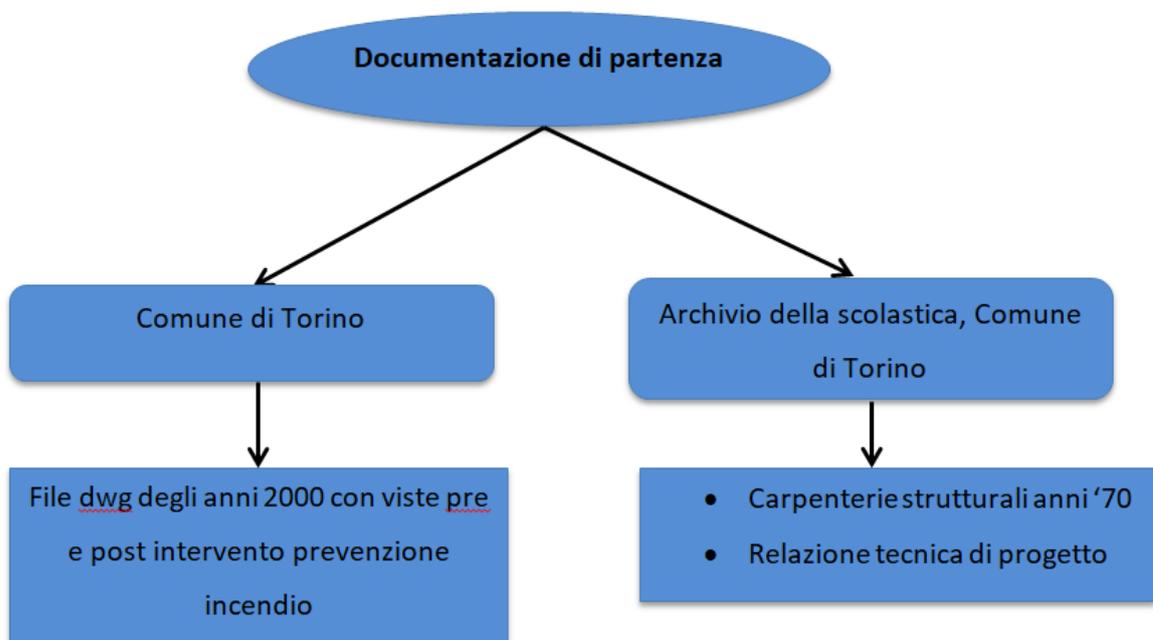


Figura 25: Documentazione di partenza.

2.2. Metodologia applicata al caso studio

L'oggetto della tesi è l'interoperabilità tra i software di modellazione BIM con programmi adibiti al calcolo strutturale. Ciò che si è realizzato sono la restituzione architettonica e strutturale del caso studio in modo tale da restituirne una rappresentazione as built. Per entrambe si è proceduto, come descritto al precedente capitolo, col reperire le informazioni necessarie per ricostruire il bagaglio di conoscenza dell'opera.

E' stato quindi predisposto un primo rilievo in situ per verificare l'effettiva corrispondenza tra la geometria definita nei dwg e quella dello stato di fatto. L'attività, come viene descritto al prossimo capitolo, è stata effettuata tenendo conto delle impostazioni definite per il progetto TOBIM.

In un secondo momento si è tornati presso la scuola per condurre le indagini non invasive sui materiali per stimare la resistenza media del calcestruzzo e verificare la disposizione dell'armatura. L'intero processo è stato pianificato e realizzato ex novo in chiave BIM in particolare per:

- Identificare con chiarezza gli elementi da indagare e quali prove realizzare su di essi.
- Associare le informazioni raccolte direttamente all'elemento indagato.

Per quest'ultimo passaggio ci si è avvalsi dell'applicativo di Revit *Dynamo* per svolgere alcune operazioni sui parametri delle famiglie coinvolte come ho descritto nel capitolo 6. Una volta completata la modellazione strutturale si è passati allo studio dell'interoperabilità tra Revit e Robot Structural Analysis. A tal fine si sono realizzate strutture elementari, più semplici di quella in esame, per governare in modo più dettagliato e preciso le diverse criticità. Per i diversi punti di interesse si sono ricercate soluzioni che massimizzino il numero di informazioni esportate tra i due software. Le soluzioni scelte sono state adottate per l'intera struttura oggetto d'analisi.

Dopo aver trasferito correttamente il modello in Robot si è proceduto al calcolo delle sollecitazioni e alla verifica di alcuni tra gli elementi strutturali più sollecitati.

3. Rilievo architettonico e modellazione

La realizzazione del modello architettonico è stata effettuata seguendo le impostazioni di modellazione definite nel progetto TOBIM (da "BIM verso il catasto del futuro" di Osello A. e Ugliotti F.M.). Tale programma si poneva come obiettivo il "ripristino del bagaglio di conoscenza e documentazione relativa agli edifici più rappresentativi della Città di Torino al fine di impostare un sistema gestionale per l'ottimizzazione degli spazi e per la valutazione degli aspetti energetici"³. L'obiettivo è stato quello di realizzare il modello architettonico dello stabile *as built*, ovvero che rappresentasse al 100% l'edificio in essere attraverso l'intersezione tra i dati acquisiti tramite documentazione e quelli ottenuti nel sopralluogo.

3.1. Metodologia applicata al caso studio

Per la realizzazione del modello architettonico BIM della scuola si è partiti con lo studio della documentazione descritta al precedente capitolo. Sono state utilizzate le planimetrie e le sezioni in formato dwg dateci dall' Ufficio della Scolastica come traccia per il rilievo geometrico e per segnare i dispositivi di illuminazione con il numero ed il tipo. Inoltre si sono misurati gli infissi in tutti i locali trascrivendo le loro dimensioni e posizione.

La definizione dei locali è stata compiuta precedentemente al rilievo e ciò ci ha consentito di aver chiaro già il loro numero complessivo e destinazione d'uso. Per la spiegazione della codifica impiegata rimando all'ultimo punto di questo stesso capitolo. Allego nel seguito il diagramma di flusso che riassume il processo di lavoro appena descritto.

³ Estratto da "BIM verso il catasto del futuro" di Osello A. e Ugliotti F.M.

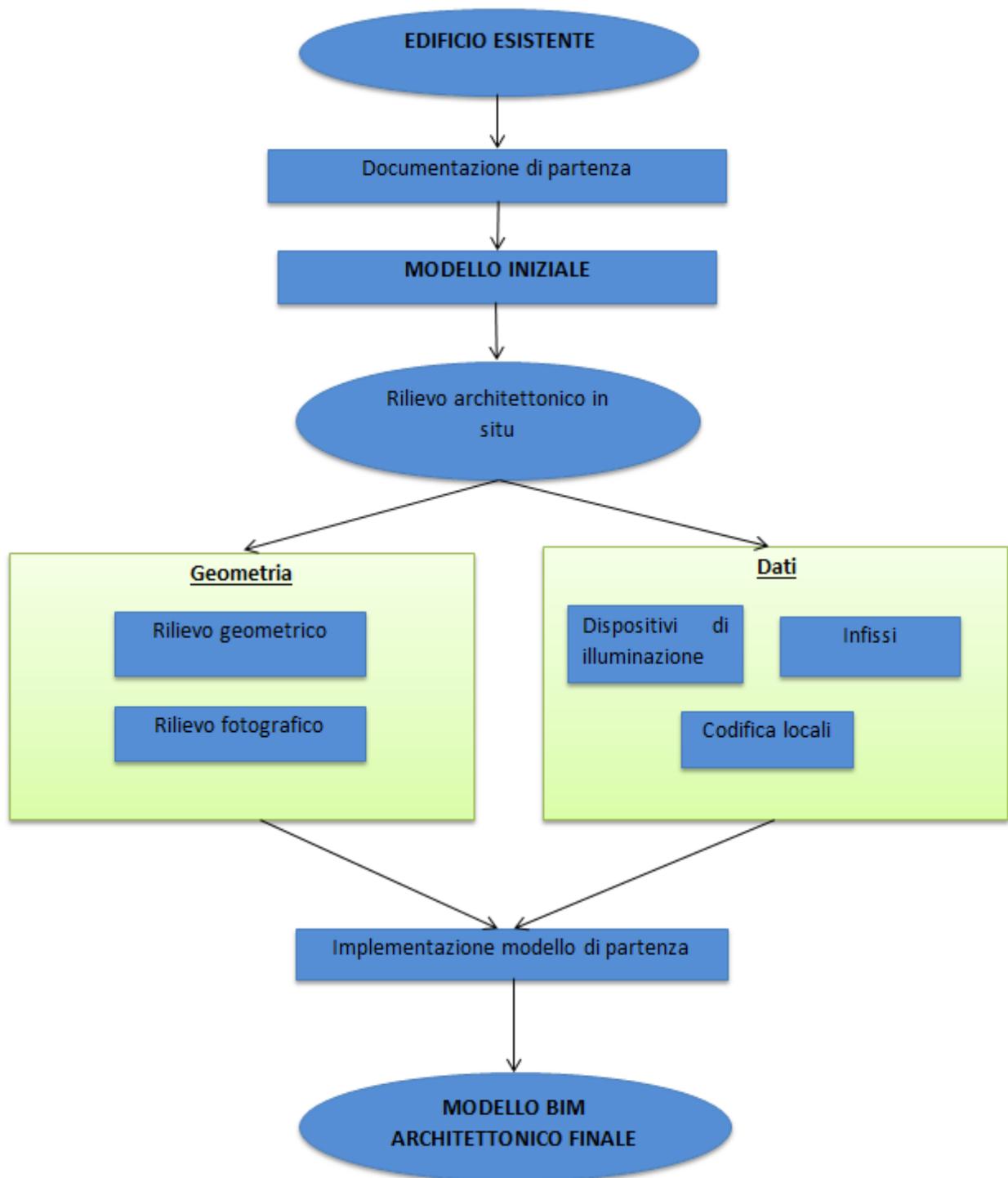


Figura 26: Metodologia applicata al caso studio.

3.2. creazione modello architettonico pre-rilievo

A partire dalla suddetta documentazione degli anni 2000 si è generato il modello in Revit 2018. Il template su cui si è lavorato è stato definito per il progetto TO BIM (da "BIM verso il catasto del futuro" di Osello A. e Ugliotti F.) e contiene al suo interno tutte le impostazioni comuni agli edifici analizzati come gli abachi per i locali e per gli infissi.

Per procedere con la modellazione bisogna innanzitutto definire il sistema di griglie e livelli per l'inserimento degli elementi che formano la scuola. A tal proposito si è osservato come lo stabile fosse sviluppato su quattro livelli: quello delle fondazioni a -2 m dal piano campagna, quello del solaio del piano terra a 1.2 m, quello a 4.66 m dell'orizzontamento del primo piano ed infine quello a 7.92 m in corrispondenza del colmo del tetto.

Per la realizzazione dei muri, si è fatto in modo che questi venissero collegati al riferimento delle griglie di modo da consentire un possibile cambiamento di configurazione nella fase post-rilievo: in questa maniera infatti lo spostamento imposto alla griglia viene trasferito anche al muro a cui è legata.

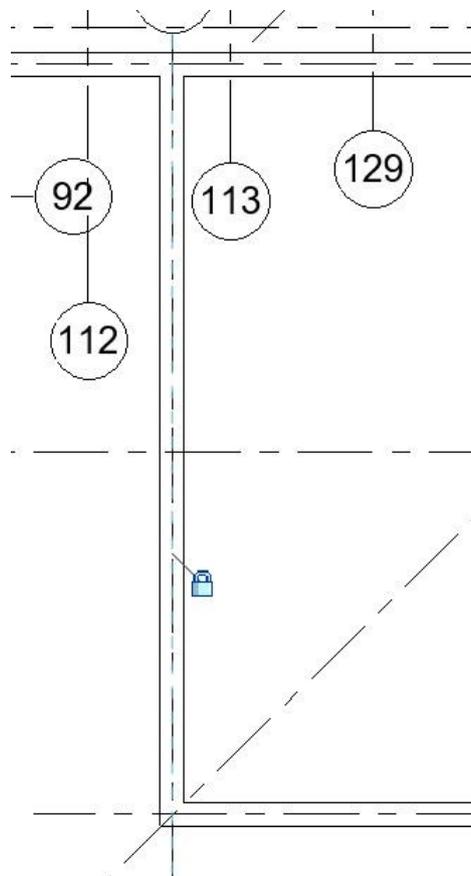


Figura 27: Allineamento muro con riferimento griglia.

In questa fase preliminare non si avevano informazioni riguardanti la copertura della scuola, pertanto si è modellato soltanto il solaio dell'ultimo piano e si è posticipato al sopralluogo l'inserimento del tetto. Lo stesso problema si è evidenziato per i corpi scala per i quali Revit consente una modellazione molto dettagliata che consente di definire alzate e pedate con precisione millimetrica.

Le dimensioni delle piante, la disposizione e lo spessore dei muri interni che delimitano i locali sono state definite a partire da quelle presenti nei file dwg di cui sopra.

E' chiaro che in questo primo avvicinamento al caso studio non è stato possibile inserire tutte le informazioni che poi siamo arrivati ad inserire alla fine del percorso di ricerca ma il vantaggio di utilizzare il BIM è stato subito chiaro. Infatti, l'utente ha bisogno fin dalla fase preliminare di un livello di dettaglio molto elevato, pertanto ci si rende immediatamente conto dei dati mancanti che dovranno essere assimilati in fase di rilievo. Questa fase preliminare, quindi, è stata fondamentale per entrare a contatto con il caso studio e rendersi conto delle criticità che si sarebbero poi volute analizzare nel dettaglio durante il sopralluogo. Con il termine criticità mi riferisco alla giusta impostazione dei livelli per i solai, alla gestione di muri con spessore diverso posti uno sopra l'altro o la dimensione effettiva di un locale. Se si pensa all'approccio tradizionale bidimensionale sarebbe più difficile rendersi conto per esempio di uno sfalsamento dei muri perimetrali in quanto se ne vedrebbero solo due sezioni distinte e non il corpo unico unito.

3.3. Rilievo in situ

In data giovedì 15 marzo 2018 si è potuto iniziare l'attività di rilievo che, con l'aiuto di altri due colleghi, è durata per i successivi due giorni. A partire dalle planimetrie ricavate come descritto al paragrafo due, si è proceduto in maniera spedita ma allo stesso tempo precisa all'acquisizione delle informazioni necessarie. Allego nel seguito un'immagine esplicativa della traccia impiegata durante sopralluogo.

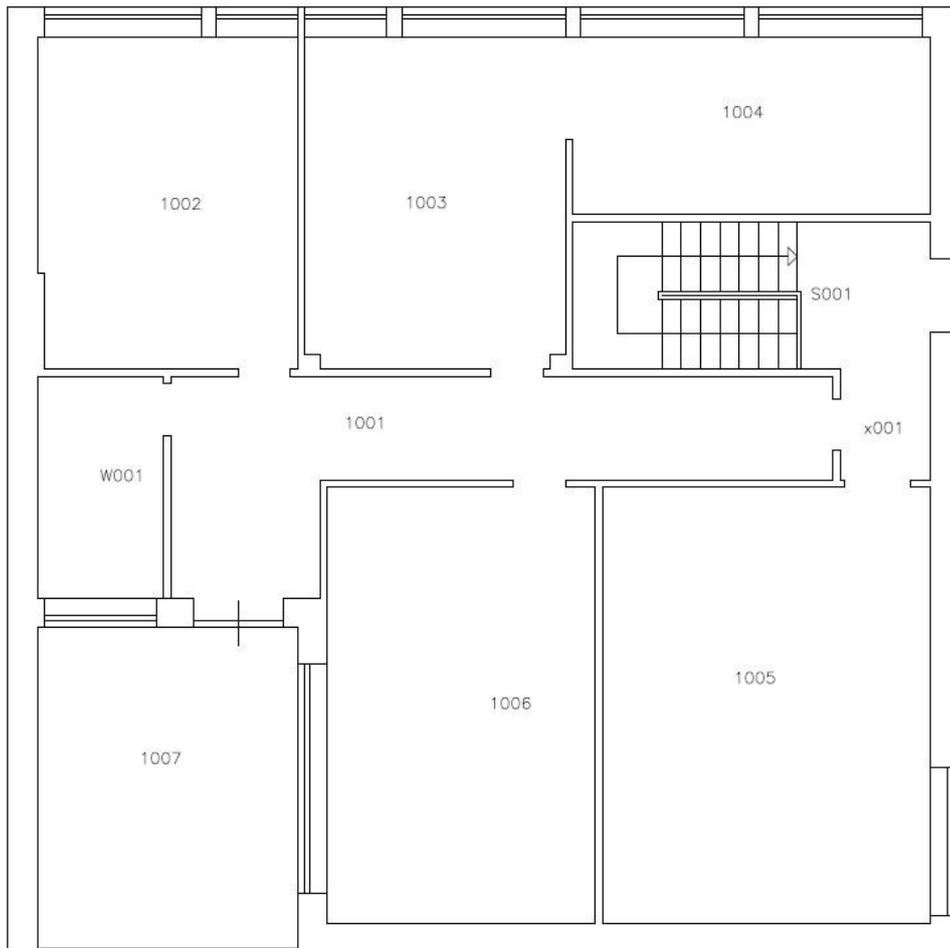


Figura 28: Pianta piano primo impiegata nel rilievo.

Come si può osservare, sono presenti i nomi dei vari locali. La metodologia di nomenclatura deriva ancora una volta da quella studiata per il progetto pilota TOBIM. La codifica del locale è la seguente: il primo numero del codice rappresenta il piano che si sta analizzando, in questo caso il numero 1. Per il piano interrato e piano terra si è utilizzato rispettivamente il numero -1 e 0. Le altre cifre rappresentano la quantità progressiva del locale; in questo caso il numero complessivo è

sei. Con la lettera w si intendono i locali adibiti ai servizi , quelli con la s rappresentano il vano scale mentre con la x gli ingressi. Allego in seguito una tabella riepilogativa della nomenclatura.

NOMENCLATURA LOCALI		
Denominazione	Codifica	Esempio
Locale	0	001
Spazio di distribuzione	X	X001
Servizi igienici	W	W001
scala	S	S001

Figura 29: Riassunto nomenclatura locali.

Nello specifico si sono rilevati:

- L'effettiva disposizione dei muri interni per la definizione dei locali;
- Le dimensioni dei locali;
- La geometria e posizione degli infissi;
- L'altezza dei locali;
- Il numero e dimensione di alzate e pedate dei corpi scala;
- Il posizionamento ed il tipo di dispositivo di illuminazione.

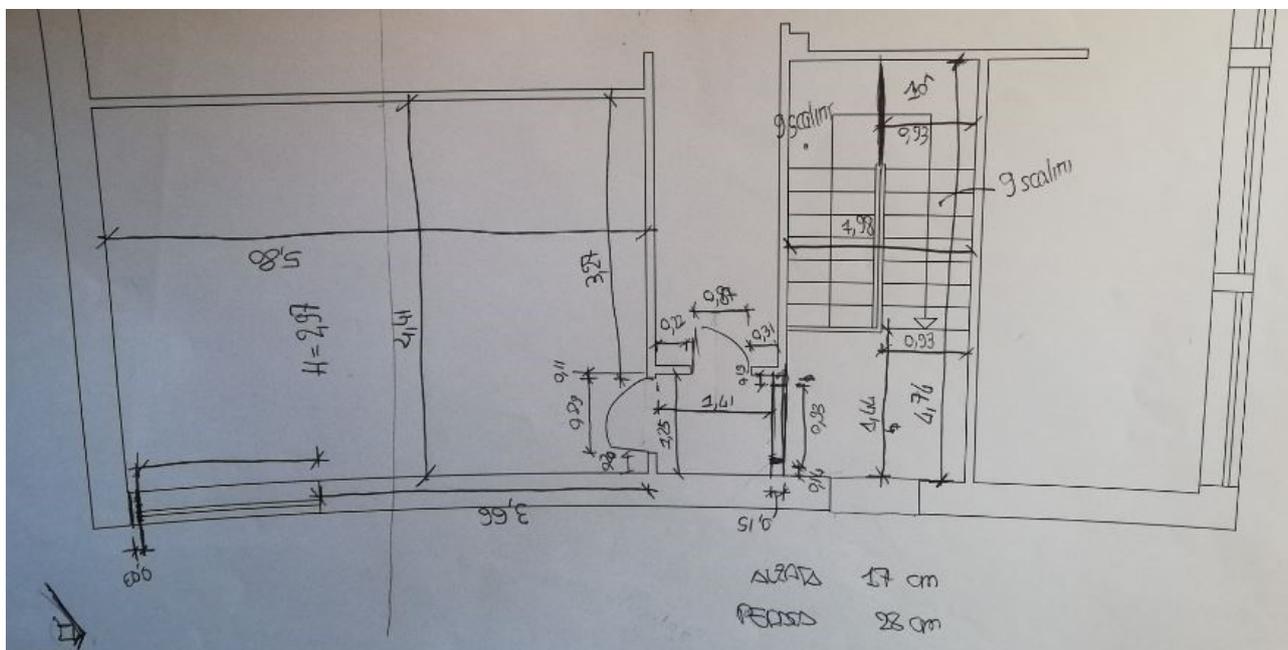


Figura 30: Particolare di output del rilievo geometrico per il primo piano.

Per l'acquisizione delle misure ci si è serviti di distometro e metro a nastro: in entrambi i casi si è la precisione acquisita è quella del centimetro.



Figura 31: Strumenti impiegati per la campagna di misurazioni in situ.

Durante la fase di rilievo inoltre, si è svolta una massiccia campagna fotografica di tutto lo stabile di modo da poter poi gestire alcuni dettagli nella modellazione. Allego in seguito alcune immagini relative all'edificio.



Figura 32: Vista dell'ingresso della scuola.



Figura 33: Vista all'ingresso del sottotetto.

Come si può osservare nell'immagine precedente, durante il sopralluogo, è stato possibile accedere al sottotetto tramite una botola accessibile dal primo piano. Durante questa fase si è proceduto con la misura delle sezioni del sistema portante costituito da un doppio sistema di travi poggianti sui muri perimetrali e su quello di spina lungo la diagonale del solaio. Le aree a cui si è avuto accesso per via dell'inclinazione delle falde sono quelle visibili nella seguente figura.

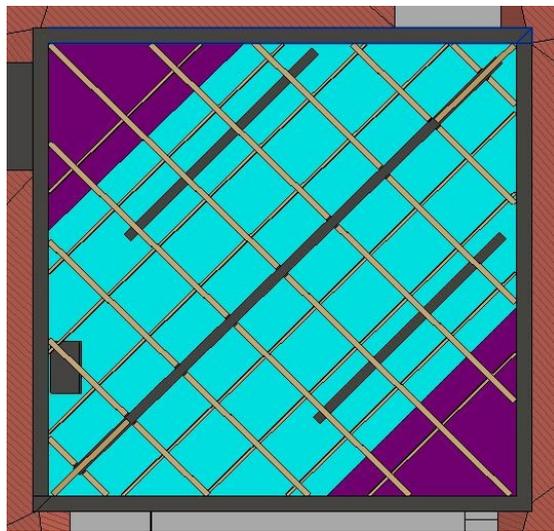


Figura 34: Aree accessibili del sottotetto.

Con il colore azzurro acqua si è evidenziata l'area a cui si è potuto accedere durante il sopralluogo viceversa quelle segnate in viola.

4. I vantaggi del BIM per la modellazione strutturale

Durante il mio percorso di ricerca ho potuto sperimentare i numerosi vantaggi della metodologia BIM per la modellazione degli elementi strutturali.

In ambiente Revit sono presenti numerose famiglie di sistema parametriche di Default per la realizzazione degli oggetti ordinari come travi, pilastri, solai e fondazioni.

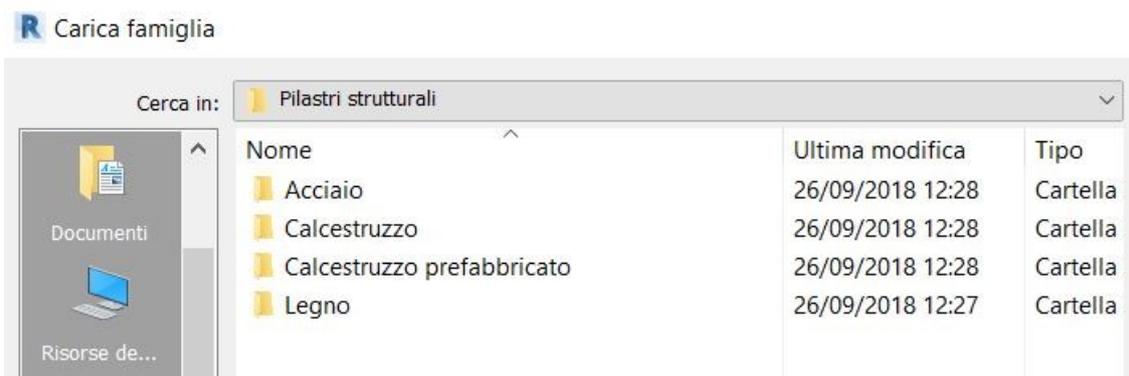


Figura 35: Famiglia pilastri di default in ambiente Revit.

Gli elementi così aggiunti al progetto hanno dei parametri atti a descriverne le caratteristiche come il livello di inizio e quello di fine, il volume e il materiale strutturale: alcuni tra questi vengono detti di *tipo* altri di *istanza*. Per esempio per la trave a sezione rettangolare le dimensioni di base e altezza fanno parte della prima categoria mentre l'identificativo dell'elemento strutturale o il suo volume della seconda.

Revit consente di aggiungere tutti i parametri di cui si ha bisogno per aumentare il livello di informazione contenuto nel modello. Nel mio progetto si è scelto di utilizzare un metodo di lavoro che consiste in creare i parametri come *condivisi* per poi essere aggiunti al caso studio come parametro di *progetto*: in questo modo possono essere impiegati anche in altri casi studio.

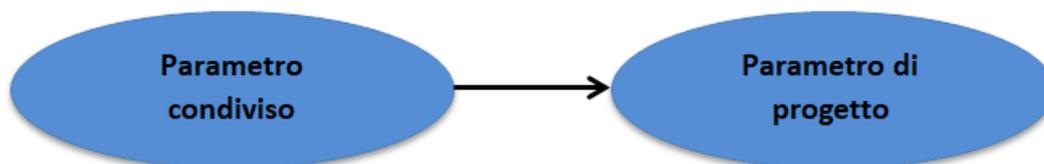


Figura 36: Metodologia per creazione parametri di progetto.

Considerata la struttura in esame, i principali elementi necessari per la modellazione sono:

- Travi;
- Pilastri;
- Solai;
- Muri;
- Fondazioni.

Per ciascuno di essi è possibile attivare il modello analitico che è la rappresentazione che viene esportata sul software di calcolo. Di ciascun oggetto, quindi, il programma definisce la restituzione geometrica e quella per il calcolo: ognuna presenta delle caratteristiche specifiche.

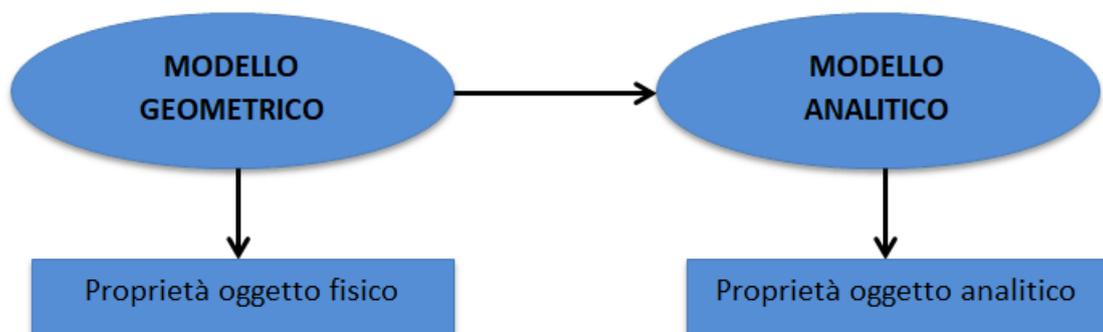


Figura 37: Modelli e proprietà.

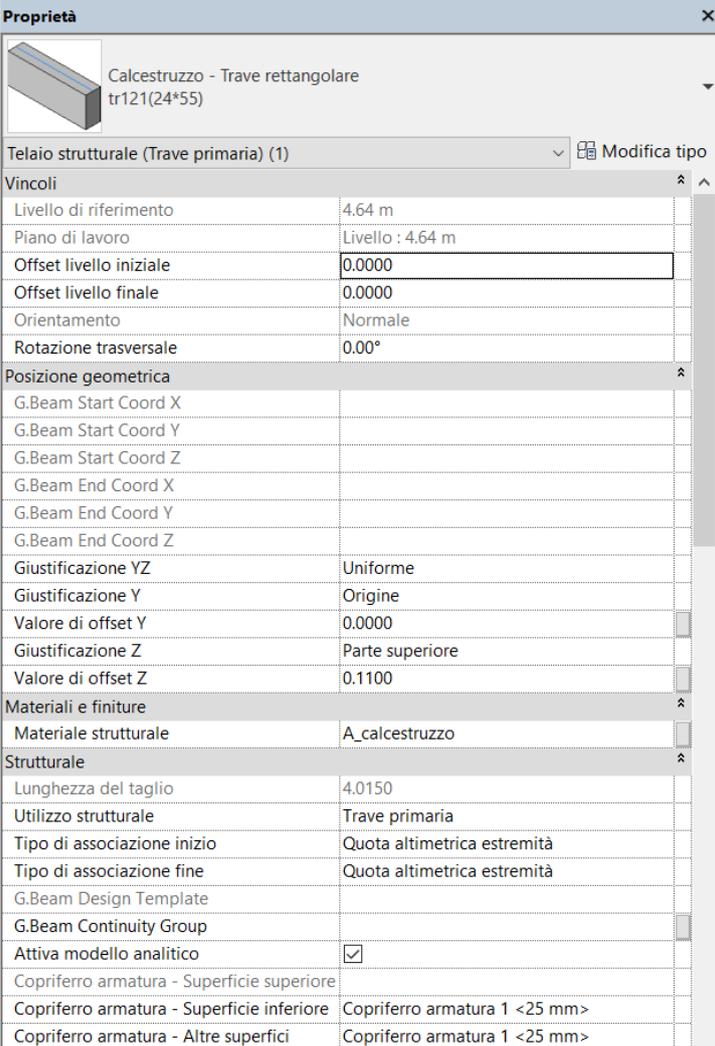
4.1. Proprietà oggetto fisico

Le principali caratteristiche degli elementi geometrici sono:

- Vincoli;
- Posizione geometrica;
- Materiale;
- Strutturale;
- Dimensioni;
- Fasi;
- Altro.

Vediamo ora come si distribuiscono tra i vari elementi.

4.1.1. Travi



Proprietà

Calcestruzzo - Trave rettangolare
tr121(24*55)

Telaio strutturale (Trave primaria) (1) Modifica tipo

Vincoli

Livello di riferimento	4.64 m
Piano di lavoro	Livello : 4.64 m
Offset livello iniziale	0.0000
Offset livello finale	0.0000
Orientamento	Normale
Rotazione trasversale	0.00°

Posizione geometrica

G.Beam Start Coord X	
G.Beam Start Coord Y	
G.Beam Start Coord Z	
G.Beam End Coord X	
G.Beam End Coord Y	
G.Beam End Coord Z	
Giustificazione YZ	Uniforme
Giustificazione Y	Origine
Valore di offset Y	0.0000
Giustificazione Z	Parte superiore
Valore di offset Z	0.1100

Materiali e finiture

Materiale strutturale	A_calcestruzzo
-----------------------	----------------

Strutturale

Lunghezza del taglio	4.0150
Utilizzo strutturale	Trave primaria
Tipo di associazione inizio	Quota altimetrica estremità
Tipo di associazione fine	Quota altimetrica estremità
G.Beam Design Template	
G.Beam Continuity Group	
Attiva modello analitico	<input checked="" type="checkbox"/>
Copriferro armatura - Superficie superiore	
Copriferro armatura - Superficie inferiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Altre superfici	Copriferro armatura 1 <25 mm>

Figura 38: Proprietà fisiche trave.

- Vincoli.

L'elemento trave, come si vede nella prossima figura, alla voce vincoli presenta il livello di riferimento in cui è stata inserito. In questa sezione, inoltre, è possibile impostare degli offset per il punto iniziale e finale dell'elemento strutturale.

- Posizione geometrica.

Nella parte relativa alla posizione geometrica, poi, si possono impostare le giustificazioni rispetto all'asse z verticale e all'asse trasversale rispetto alla sezione della trave y. Per esempio per quel che riguarda il primo si può impostare se al livello di riferimento si deve trovare la base inferiore o superiore.



Figura 39: Posizionamento trave rispetto all'asse z.

Per il mio progetto è stata utilizzata l'impostazione *parte superiore* in modo da avere al livello di riferimento l'estradosso della trave.

- Materiale.

Il materiale strutturale è contenuto alla voce Materiali e finiture: per il progetto è stato definito un materiale ad hoc, A_calcestruzzo, in cui sono state definite esattamente le caratteristiche di cui si aveva bisogno. Per questo passaggio è necessario duplicare un materiale già presente in libreria per poi modificarne le caratteristiche oppure crearne uno da zero.

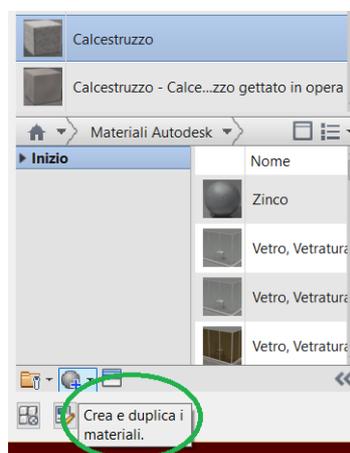


Figura 40: Duplica materiale.

Per ciascun materiale, come si vede nella prossima immagine, Revit implementa cinque voci:

- Identità;
- Grafica;
- Aspetto;
- Fisico;
- Termico.

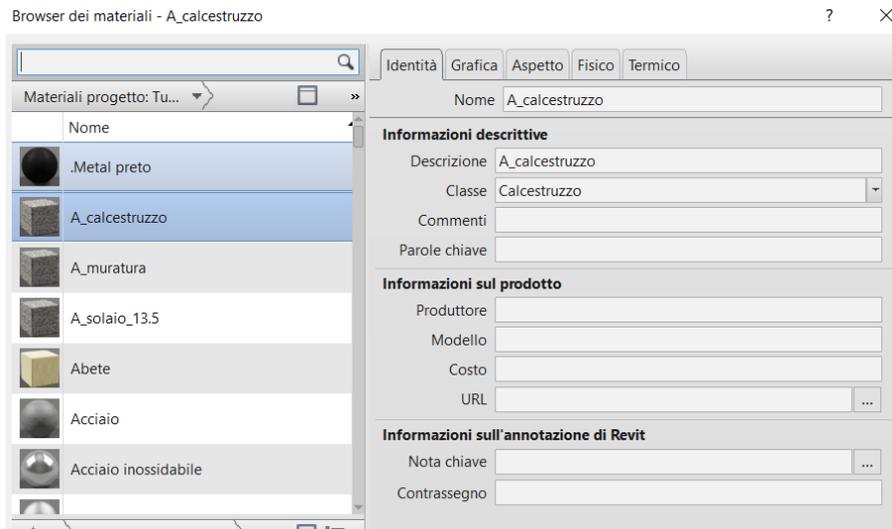


Figura 41: Sezioni modificabili del materiale.

L'aspetto di maggior interesse per la ricerca è il Fisico in cui si trovano le caratteristiche meccaniche del materiale e la densità.

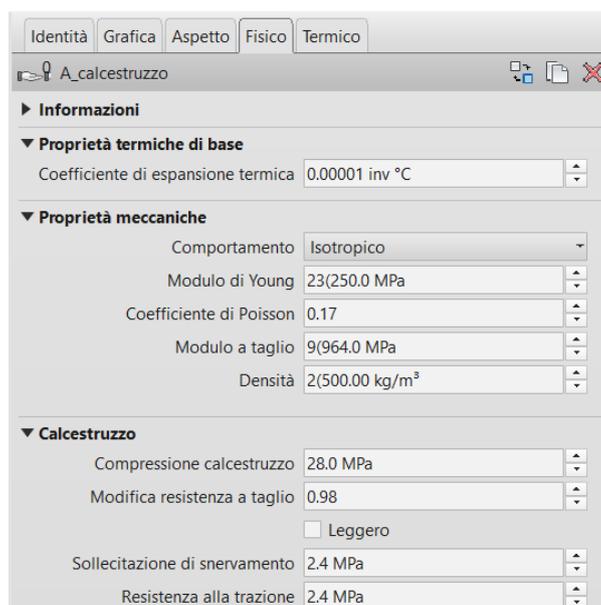


Figura 42: Proprietà fisiche A_calcestruzzo.

Le grandezze di maggior interesse sono:

- Modulo di Young;
- Densità;
- Resistenza a compressione cilindrica.

Per la massa su unità di volume è stata consultata la tabella 3.1.I. della Norma tecnica delle Costruzioni del 2008.

MATERIALI	PESO UNITÀ DI VOLUME [kN/m ³]
Calcestruzzi cementizi e malte	
Calcestruzzo ordinario	24,0
Calcestruzzo armato (e/o precompresso)	25,0
Calcestruzzi “leggeri”: da determinarsi caso per caso	14,0 ÷ 20,0
Calcestruzzi “pesanti”: da determinarsi caso per caso	28,0 ÷ 50,0
Malta di calce	18,0
Malta di cemento	21,0
Calce in polvere	10,0
Cemento in polvere	14,0
Sabbia	17,0

Figura 43: Densità cemento armato.

Fonte: NTC 2008, capitolo 3.1.3.1., Tabella 3.1.I., pag.12.

Per la resistenza cubica a compressione si è impostata quella definita dal progettista: 28 MPa.

Il valore del modulo di Young è stato ottenuto da letteratura ed è stato posto uguale a 23250 MPa.

- Strutturale.

In questa sezione è possibile impostare le caratteristiche utili per l’analisi strutturale, nello specifico:

- Utilizzo strutturale;
- Attivazione modello analitico.

La prima voce rappresenta l’ordine di importanza delle travi: se si tratta di un elemento primario o di un travetto per esempio.

Utilizzo strutturale	Trave primaria
Tipo di associazione inizio	Trave primaria
Tipo di associazione fine	Controvento orizzontale
G.Beam Design Template	Travetto
G.Beam Continuity Group	Altro
Attiva modello analitico	Arcareccio

Figura 44: Tipo di trave.

L'attivazione del modello analitico consente di attivare la vista di calcolo per l'elemento: se un elemento è strutturale viene attivata di default.

- Dimensioni.

Dimensioni	
Lunghezza	2.7700
Volume	0.258 m ³
Quota altimetrica parte superiore	5.0500
Quota altimetrica base	4.2000

Figura 45: Sezione dimensioni trave.

In questa sezione si possono leggere le caratteristiche geometriche dell'elemento.

- Altro.

In questa sezione, come si può osservare nella prossima figura, sono stati inseriti i parametri di progetto utili ad alcune funzioni del modello:

- Livello di dettaglio;
- Immagine elemento;
- Densità.

Altro	
Livello di dettaglio	3
Immagine elemento	https://www.flickr.com/photos/157746...
Densità	548.000000 kg/m ³

Figura 46: Sezione *Altro* per le travi.

L'immagine precedente si riferisce ad una delle travi che formano il sostegno del tetto.

- Livello di dettaglio.

Il livello di dettaglio indica il grado di conoscenza relativo agli elementi strutturali, come descriverò al capitolo *Progettazione rilievo strutturale* la metodologia BIM è stata impiegata per aggiungere alle parti strutturali l'informazione relativa al livello di conoscenza.

→ Immagine elemento.

Immagine elemento è un parametro in cui è stato inserito l'indirizzo URL per collegare le immagini del rilievo in situ con il progetto. Come si osserva nella seguente immagine, il parametro è stato prima creato come condiviso per essere poi importato nel progetto.

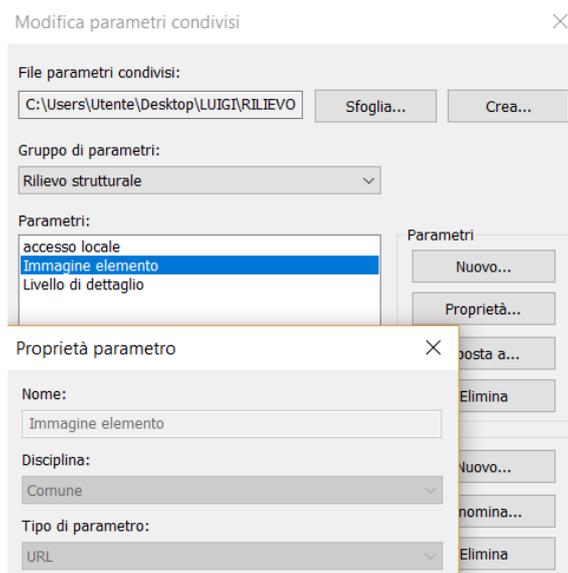


Figura 47: Parametro condiviso Immagine elemento.

Gli elementi a cui è stato applicato sono tutti quelli di cui si è ritenuto importante allegare delle immagini per una maggiore comprensione dello stato di fatto ovvero: Fondazioni strutturali, Muri, Pilastri strutturali, Pavimenti, Sistemi di travi strutturali e Telaio strutturale.

La piattaforma Flickr è uno spazio gratuito di 1 TB per il caricamento di foto e contenuti multimediali a disposizione di tutti. Sono state caricate le immagini scattate durante il rilievo in situ di modo da poterne collegare l'indirizzo URL. Perché vi si connetta è necessario avere a disposizione la connessione Internet. Nella seguente immagine si può osservare la vista relativa alla misura geometrica dell'altezza della trave in legno.



Figura 48: Immagine, <https://www.flickr.com/photos/157746045@N08/42638602961/in/album-72157697730678945/>.

→ Densità.

Il parametro densità è stato creato per effettuare il calcolo dei pesi degli elementi strutturali, come spiegato al capitolo 5. A partire dalla sua definizione come condiviso è poi stato aggiunto al progetto.

Figura 49: Importazione parametro Densità nel progetto.

Come si può vedere nella figura precedente, è stato inserito come parametro di istanza in quanto cambia per ogni tipo di elemento.

4.1.2. Pilastri

Proprietà	
	Pilastro in calcestruzzo - Rettangolare P5
Pilastri strutturali (1) Modifica tipo	
Vincoli	
Contrassegno di posizione pilastro	85-110
Livello di base	1.2 m
Offset base	0.0000
Livello superiore	4.64 m
Offset superiore	0.0000
Stile pilastro	Verticale
Sposta con griglie	<input checked="" type="checkbox"/>
Delimita il locale	<input checked="" type="checkbox"/>
Posizione geometrica	
G.Column Coord X	
G.Column Coord Y	
G.Column Coord Z	
Materiali e finiture	
Strutturale	
G.Column Design Template	
G.Column Design Group	
Attiva modello analitico	<input checked="" type="checkbox"/>
Copriferro armatura - Superficie superiore	
Copriferro armatura - Superficie inferiore	
Copriferro armatura - Altre superfici	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Dimensioni	
Volume	0.310 m ³

Figura 50: Proprietà pilastro.

- Vincoli.

Per i pilastri, come si vede nella figura di sopra, si possono impostare il livello di base e quello superiore. In questa sezione, inoltre, è possibile impostare anche gli offset per il punto iniziale e finale. Alla voce stile pilastro è possibile anche definire un asse obliquo per il suo tracciamento.

Stile pilastro	Verticale
Sposta con griglie	Verticale
Delimita il locale	Obliquo - basato su angolo
	Obliquo - basato su punto finale

Figura 51: Stile pilastro.

Per il caso studio non è stata utilizzata questa possibilità.

- Posizione geometrica.

Non vi sono informazioni relative alla posizione geometrica.

- Materiale.

Il materiale strutturale è contenuto alla voce Materiali e finiture: come descritto in precedenza, si è utilizzato il materiale A_calcestruzzo.

Materiali e finiture	
Materiale strutturale	A_calcestruzzo

Figura 52: Materiale strutturale.

- Strutturale.

Strutturale	
G.Column Design Template	
G.Column Design Group	
Attiva modello analitico	<input checked="" type="checkbox"/>
Copriferro armatura - Superficie superiore	
Copriferro armatura - Superficie inferiore	
Copriferro armatura - Altre superfici	Copriferro armatura 1 <25 mm>

Figura 53: Sezione strutturale.

In questa sezione è possibile attivare il modello analitico per l'elemento: in quanto strutturale viene attivato di default.

- Dimensioni geometriche.

L'unica informazione contenuta alla voce dimensioni geometriche è quella relativa al volume dell'elemento.

Dimensioni	
Volume	0.270 m ³

Figura 54: Dimensioni geometriche pilastro.

- Altro.

I parametri di progetto contenuti in questa sezione sono:

- Livello di dettaglio;
- Pacometro;
- Sclerometro;
- Identificativo;

→ Immagine elemento;

→ Densità.

Altro	
Livello di dettaglio	4
Pacometro	Si
Sclerometro	Si
Identificativo	63
Immagine elemento	https://www.flickr.com/photos/157746...
Densità	2500.000000 kg/m ³

Figura 55: Sezione *Altro* per le travi.

L'immagine precedente si riferisce ad un pilastro al piano interrato.

→ Livello di dettaglio.

Il livello di dettaglio indica il grado di conoscenza relativo agli elementi strutturali, come descriverò al capitolo *Progettazione rilievo strutturale* la metodologia BIM è stata impiegata per aggiungere alle parti strutturali l'informazione relativa al livello di conoscenza.

→ Pacometro.

Pacometro è un parametro di testo definito per inserire agli elementi strutturali l'informazione relativa al tipo di prova non invasiva effettuata. E' stato definito a partire dall'omonimo parametro condiviso come testo, nello specifico sì o no. In caso affermativo significa che su quel pilastro è stata compiuta la prova pacometrica. Per La visualizzazione dei pilastri indagati rimando al capitolo 5.

→ Sclerometro

Il parametro sclerometro ha le stesse proprietà di quello illustrato in precedenza ma per la prova sclerometrica. Allo stesso modo si è compilato con valori sì o no.

→ Identificativo

Identificativo è il numero del pilastro definito nella tavole degli anni '70 consegnatici dal Comune di Torino. E' stato inserito come parametro di progetto di tipo testo ed è il valore che, attraverso lo script di Dynamo che si illustrerà al prossimo capitolo, è stato associato alla modello generico per le prove sclerometriche e pacometriche per cui rimando al capitolo cinque.

Proprietà parametro

Tipo di parametro

Parametro di progetto
(Può comparire negli abachi ma non nelle etichette)

Parametro condiviso
(Può essere condiviso da più progetti e famiglie, comparire negli abachi e nelle etichette ed essere esportato via ODBC)

Seleziona... Esporta...

Dati parametro

Nome: Tipo

Disciplina: Istanza

Tipo di parametro: I valori vengono allineati per tipo di gruppo

Raggruppa parametro in: I valori possono variare in base all'istanza del gruppo

Descrizione comandi:
<Nessuna descrizione comando. Modificare il parametro per creare una descrizione co...>

Aggiungi a tutti gli elementi nelle categorie selezionate

Categorie

Elenco dei filtri:

Nascondi categorie deselezionate

- Fondazioni strutturali
- Pilastrini strutturali
- Telaio strutturale

Seleziona tutti Deseleziona tutti

OK Annulla ?

Figura 56: Proprietà parametro Identificativo.

→ Immagine elemento

Per questo parametro valgono le stesse impostazioni esplicate per la trave. Allego, a titolo di esempio, l'immagine associata al pilastro considerato.



Figura 57: Immagine <https://www.flickr.com/photos/157746045@N08/42587873082/in/album-72157697730678945/>.

4.1.3. Solaio

Proprietà	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Pavimento Laterocemento - 20.0 cm </div>	
Pavimenti (1) Modifica tipo	
Vincoli	
Livello	1.2 m
Offset di altezza da livello	0.0000
Delimita il locale	<input checked="" type="checkbox"/>
Relativo a massa	<input type="checkbox"/>
Strutturale	
Strutturale	<input checked="" type="checkbox"/>
Attiva modello analitico	<input checked="" type="checkbox"/>
Copriferro armatura - Superficie superiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Superficie inferiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Altre superfici	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Dimensioni	
Inclinazione	
Perimetro	36.5400
Area	48.461 m ²
Volume	9.692 m ³
Quota altimetrica parte superiore	1.2000
Quota altimetrica base	1.0000
Spessore	0.2000

Figura 58: Proprietà solaio.

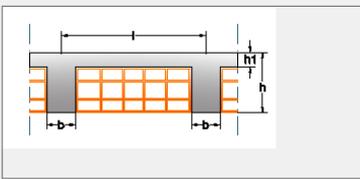
Per quel che riguarda i solai sono stati realizzati in Revit e poi si sono aggiunti i particolari delle pignatte e dei travetti con l'ausilio del plug-in gentilmente messi a disposizione dalla software house STA DATA. A partire dalla definizione del contorno del solaio, si possono inserire i parametri relativi al solaio latero cementizio.

Solaio laterocemento

Materiali

Strutturale: A_calcestruzzo ...

Alleggerimento: Laterizio (1) ...



Altezza solaio: h [cm]

Soletta: h1 [cm]

Travetto: b [cm]

Interasse: i [cm]

Fascia piena: f [cm]

Rompitratta

n. br [cm]

OK Annulla

Figura 59: definizione dei parametri relativi al solaio in latero cemento.

Nello specifico bisogna inserire il materiale strutturale e quello di alleggerimento, l'altezza del solaio, lo spessore del getto di ricoprimento, la base del travetto con il relativo interasse ed infine la fascia piena. Quest'ultimo è un parametro che è stata inserito dalla casa madre nell'ultimo aggiornamento e rappresenta un offset dal contorno del pavimento rispetto al quale fare iniziare i travetti e le pignatte: nel mio caso specifico non è stato utilizzato. Si può osservare anche la possibilità di inserire uno o più rompi tratta definendone la lo spessore della base.

- Vincoli.

Nella sezione vincoli è presente il livello di riferimento dell'orizzontamento e lo spessore di offset che vi si vuole applicare.

- Strutturale.

In questa parte si possono spuntare l'impostazione strutturale del solaio e l'attivazione del modello analitico. Le informazioni relative al copriferro vengono aggiunte di default ma non sono state utilizzate in quanto il suo spessore è poi stato aggiunto in fase di verifica.

Strutturale	
Strutturale	<input checked="" type="checkbox"/>
Attiva modello analitico	<input checked="" type="checkbox"/>
Copriferro armatura - Superficie superiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Superficie inferiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Altre superfici	Copriferro armatura 1 <25 mm>

Figura 60: Sezione struttura del solaio.

- Dimensioni.

Nelle dimensioni ci sono le caratteristiche geometriche del solaio come area, perimetro, spessore ecc.,.

- Altro.

Altro	
Livello di dettaglio	2
Immagine elemento	https://www.flickr.com/photos/157746...
Densità	1350.000000 kg/m ³

Figura 61: Parametri in altro per i solai.

Per i tre parametri nella figura precedente valgono le assunzioni fatte in precedenza.

4.1.4. Muri

Proprietà	
	Muro di base Generico - 40 cm
Muri (1) 	 Modifica tip
Vincoli	
Linea di ubicazione	Linea d'asse del muro
Vincolo di base	-2.00 m
Offset base	0.0000
La base è associata	<input type="checkbox"/>
Distanza estensione base	0.0000
Vincolo parte superiore	Fino al livello: 1.2 m
Altezza non collegata	3.2000
Offset superiore	0.0000
La parte superiore è associata	<input type="checkbox"/>
Distanza estensione superiore	0.0000
Delimita il locale	<input checked="" type="checkbox"/>
Relativo a massa	<input type="checkbox"/>
Strutturale	
Strutturale	<input checked="" type="checkbox"/>
Attiva modello analitico	<input checked="" type="checkbox"/>
Utilizzo strutturale	Portante
Copriferro armatura - Superficie esterna	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Superficie interna	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Altre superfici	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Dimensioni	
Lunghezza	14.0053
Area	44.817 m ²
Volume	17.927 m ³

Figura 62: Proprietà muro.

Sono da evidenziare i numerosi parametri che descrivono l'elemento: dalla geometria al materiale costituente. In particolare consente l'inserimento di informazioni riguardanti la stratigrafia e la trasmittanza termica consentendo al progettista di impostare un'analisi energetica realistica e precisa.

Modifica assieme

Famiglia: Muro di base
 Tipo: Generico - 40 cm
 Spessore totale: 0.4000
 Resistenza (R): 0.3824 (m²·K)/W
 Massa termica: 56.15 kJ/K

Altezza esempio:

Strati

LATO ESTERNO					
	Funzione	Materiale	Spessore	Ripiegature	Materiale strutturale
1	Contorno del nucleo	Strati sopra ripiegatura	0.0000		
2	Struttura [1]	A_calcestruzzo	0.4000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Contorno del nucleo	Strati sotto ripiegatura	0.0000		

LATO INTERNO

Inserisci Elimina Su Giù

Ripiegatura di default
 Agli inserti: Esterno
 Alle estremità: Nessuno

Modifica struttura verticale (strumenti attivi solo in anteprima sezione)

Modifica Unisci regioni Estrusione
 Assegna strato Dividi regione Scanalature

<< Anteprima OK Annulla ?

Figura 63: Stratigrafia muro di fondazione.

→ Vincoli.

Per questa sezione valgono le valutazioni fatte per i pilastri con l'unica differenza della spunta Delimita il locale con il quale si fa in modo che il muro sia il limite per la definizione del locale.

→ Strutturale.

In questa parte si può impostare se il muro è strutturale o meno e se attivare il modello analitico. Per i muri di fondazione e per quelli a sostegno del sistema di travi del tetto questa opzione è stata spuntata. Si può inoltre definire se il muro è portante o meno.

→ Dimensioni.

In questa parte ci sono i dati geometrici del muro come lunghezza, area e volume.

→ Altro.

Altro	
Esposizione	
Livello di dettaglio	2
Immagine elemento	
Densità	2500.000000 kg/m³

Figura 64: Parametri contenuti nella sezione Altro.

4.1.5. Fondazioni

Plinti

Proprietà	
 Plinto A5	
Fondazioni strutturali (1) Modifica tipo	
Vincoli	
Livello	-2.00 m
Host	Livello : -2.00 m
Offset di altezza da livello	0.0000
Sposta con griglie	<input checked="" type="checkbox"/>
Posizione geometrica	
G.Footing Coord X	
G.Footing Coord Y	
G.Footing Coord Z	
Materiali e finiture	
Materiale - Plinto	A_calcestruzzo
Strutturale	
G.Footing Design Template	
G.Footing Design Group	
Attiva modello analitico	<input checked="" type="checkbox"/>
Copriferro armatura - Superficie superiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Superficie inferiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Altre superfici	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Dimensioni	
Quota altimetrica parte superiore	-2.0000
Quota altimetrica base	-2.4500

Figura 65: Proprietà plinti.

→ Vincoli.

In vincoli vi sono le informazioni relative al livello di riferimento e alla possibilità di spostare l'elemento con le griglie.

→ Posizione geometrica.

Non vi sono informazioni in riguardo.

→ Strutturale.

In questa parte si può attivare o meno il modello analitico.

→ Materiale e finiture

Materiale strutturale impiegato, anche in questo caso A_calcestruzzo

→ Altro.

Altro	
Livello di dettaglio	2
Pacometro	No
Sclerometro	No
Identificativo	/
Immagine elemento	https://www.flickr.com/photos/157746...
Densità	2500.000000 kg/m ³

Figura 66: Parametri in Altro, plinto.

Cordolo muro di fondazione

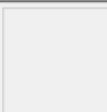
Proprietà	
 Cordolo Centrato - La65xS40 cm	
Fondazioni strutturali (1) Modifica tip	
Vincoli	
Eccentricità	0.1250
Posizione geometrica	
G.Footing Coord X	
G.Footing Coord Y	
G.Footing Coord Z	
Strutturale	
G.Footing Design Template	
G.Footing Design Group	
Attiva modello analitico	<input checked="" type="checkbox"/>
Copriferro armatura - Superficie superiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Superficie inferiore	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Copriferro armatura - Altre superfici	Copriferro armatura 1 <25 mm>
Dimensioni	
Lunghezza	14.0053
Larghezza	0.6500
Quota altimetrica parte superiore	-2.0000
Quota altimetrica base	-2.4000
Volume	3.641 m ³

Figura 67: Proprietà cordolo.

→ Vincoli.

per l'elemento cordolo è possibile impostare un'eccentricità rispetto alla sua linea d'asse. Di fatto l'effetto raggiunto è simile a quello dell'offset: una traslazione rigida dell'elemento.

→ Posizione geometrica.

Non ci sono informazione utili.

→ Strutturale.

In questa parte si può attivare o meno il modello analitico.

→ Altro.

Altro	
Livello di dettaglio	2

Figura 68: Parametri contenuti nella sezione Altro.

Nella prossime due tabelle ho riassunto le proprietà e i parametri contenuti nella sezione altro per i diversi elementi.

Modello geometrico						
Proprietà oggetto	Trave	Pilastro	Muro	Solaio	Plinto	Cordolo
Vincoli	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Posizione geometrica	✓	✗	✗	✗	✓	✓
Materiale	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Strutturale	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dimensioni	✓	✓	✓	✓	✓	✗

Figura 69: Proprietà oggetti geometrici.

Modello geometrico						
Parametri in Altro	Trave	Pilastro	Muro	Solaio	Plinto	Cordolo
Livello di dettaglio	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pacometro	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Sclerometro	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Identificativo	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Immagine Elemento	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Densità	✓	✓	✓	✓	✗	✗

Figura 70: Parametri nella sezione Altro degli elementi.

4.2. Visualizzazione Livello di Conoscenza elementi strutturali

Un'ulteriore vantaggio dell'utilizzo del BIM per le strutture è stato quello di poter creare un parametro per descrivere il livello di conoscenza con il quale si conoscono gli elementi portanti. Con Livello di Dettaglio si è descritto il grado di conoscenza riguardo a posizione e dettagli costruttivi relativi a ciascun elemento. Tale risultato è stato creato definendo un parametro istanza di tipo testo.

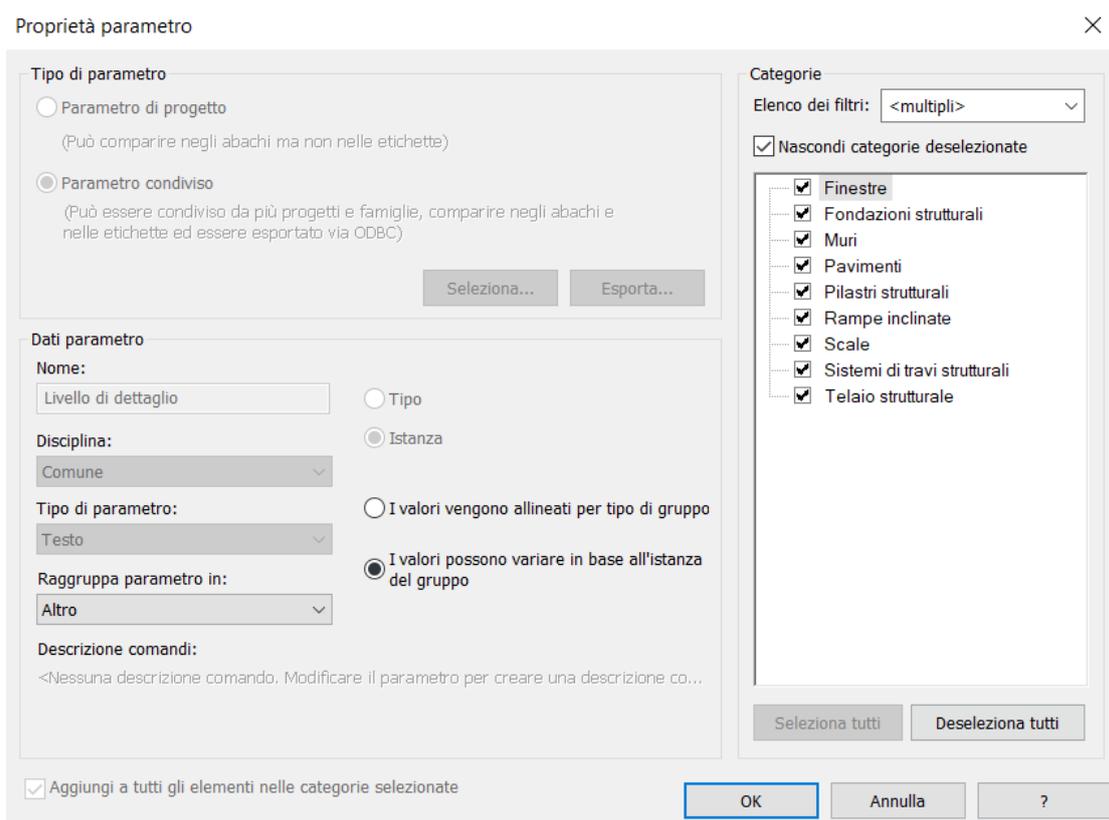


Figura 71: Inserimento parametro livello di dettaglio.

Nello specifico posizione e dettagli costruttivi. Sono stati definiti, per descrivere il livello di conoscenza relativo agli elementi, quattro livelli a cui è stato associato un valore da uno a quattro.

- **Livello Di Dettaglio (LDD) = 1 → colore verde:** elementi per i quali erano note la posizione precisa nella struttura e la relativa carpenteria.
- **LDD = 2 → colore rosso:** elementi per i quali non si sono reperite le tavole di rappresentazione o quelle relative alle carpenterie.
- **LDD = 3 → colore giallo:** elementi per i quali non erano presenti gli allegati grafici ma le cui caratteristiche potevano essere desunte per similitudini da altri orizzontamenti.

- **LLD = 4 → colore viola:** elementi non presenti nella documentazione ufficiale ma rilevati in situ.

Allego in seguito la tavola relativa al livello di conoscenza della struttura: Tale metodologia è estremamente efficace per comprendere a colpo d'occhio il grado di livello conoscitivo dell'intera struttura.

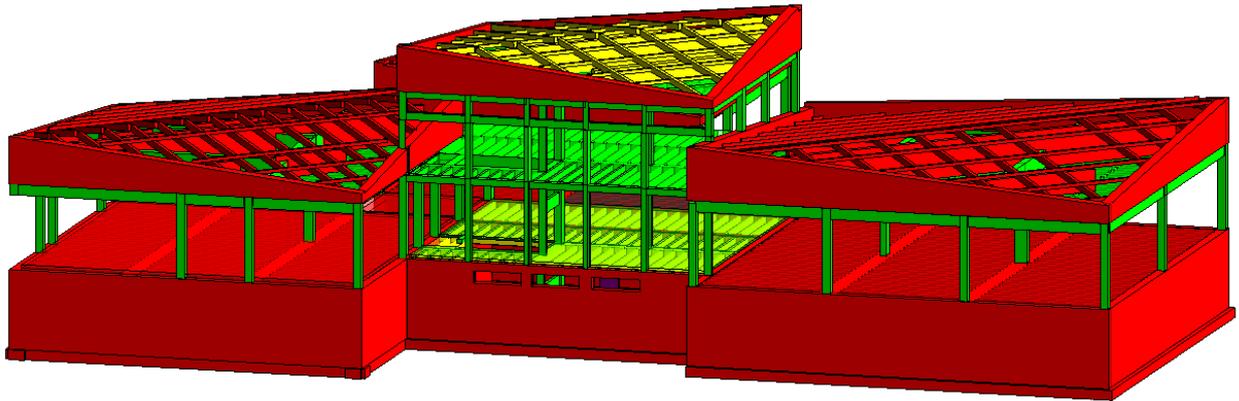


Figura 72: livello di dettaglio strutturale.

4.3. Proprietà oggetto analitico

Vorrei dedicare il seguente capitolo all'analisi dei parametri che possiamo gestire nella rappresentazione analitica per i diversi elementi strutturali. Allego in seguito la vista complessiva del modello adibito al calcolo strutturale relativo al mio caso studio.

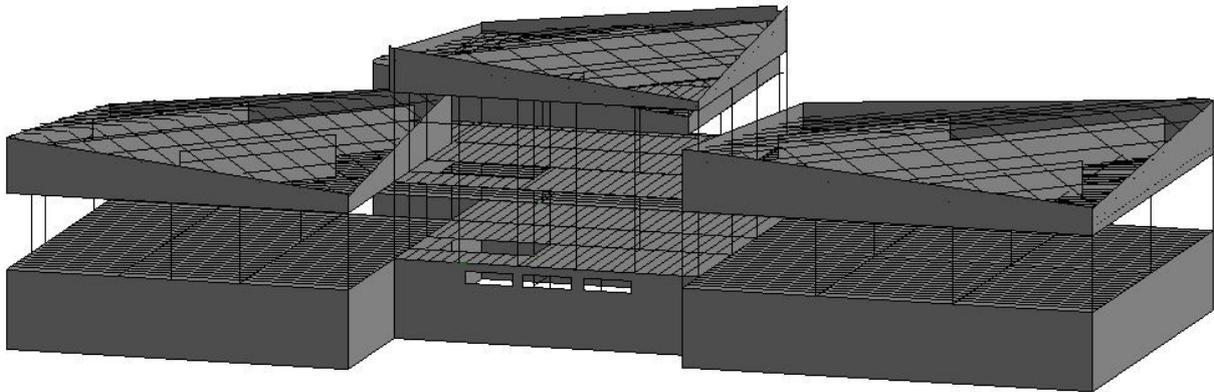


Figura 73: Modello analitico della struttura.

4.3.1. Travi

L'elemento trave è ciò che, insieme ai pilastri, forma lo scheletro portante della struttura e Revit, comprendendone l'importanza strategica, ha aggiunto numerose possibilità per la loro gestione nel modello di calcolo.

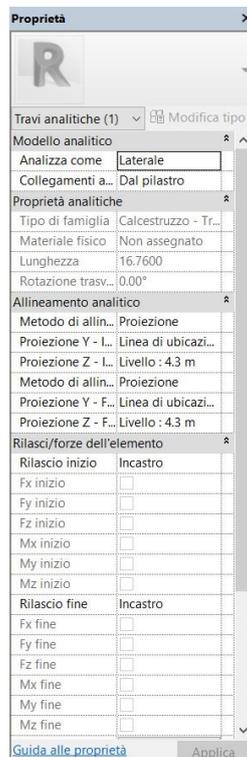


Figura 74: Parametri trave modello analitico.

Le sezioni sono:

- Modello analitico.

I parametri di questa sezione si riferiscono alla funzione strutturale che può assumere l'oggetto: *portante*, *laterale* o *non portante* e la modalità di associazione del collegamento analitico. Come si vede nella seguente immagine, il programma consente di settare queste proprietà caso per caso. Per esempio, è possibile specificare che il collegamento analitico sia associato al pilastro.



Figura 75: Possibilità di gestione del collegamento analitico.

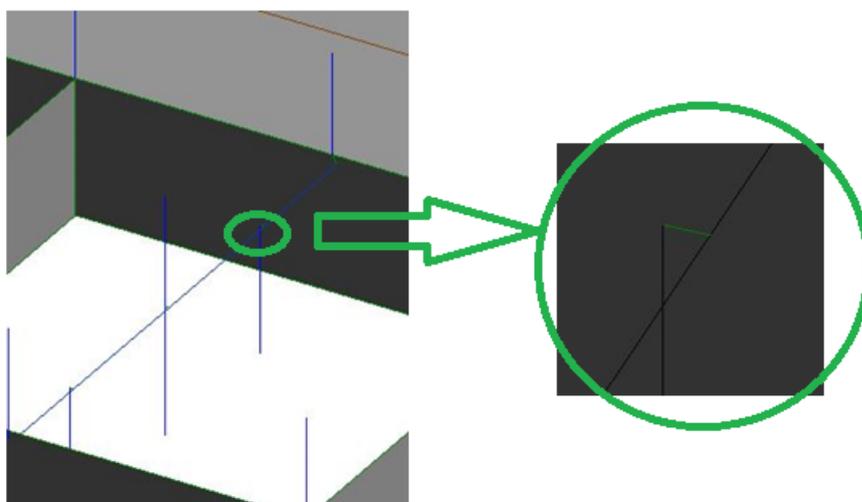


Figura 76: Visualizzazione in ambiente Revit del collegamento analitico trave-pilastro.

Il collegamento analitico è un elemento predefinito in Revit per consentire la continuità del modello gestendo le eccentricità tra le aste di calcolo. Selezionando un qualunque oggetto del modello analitico, si può osservare il menù a tendina visibile nella seguente immagine.

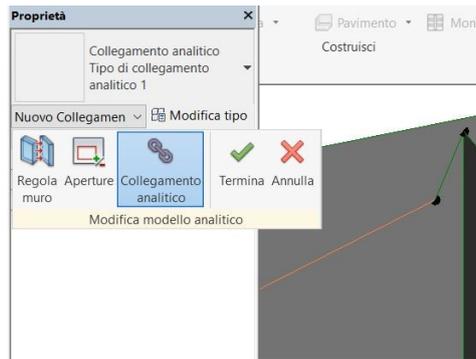


Figura 77: Creazione collegamento analitico sistema di travi-muro di appoggio.

se si seleziona la voce “regolazione analitica” si arriva al menù nella seguente figura.



Figura 78: Possibilità per la gestione dell'elemento analitico in ambiente Revit.

Il collegamento analitico, anche detto elastic link, non presenta peso proprio né rigidezza e può essere generato solo tra due nodi del modello.

- Proprietà analitiche.

Proprietà analitiche	
Tipo di famiglia	Calcestruzzo - Trave rettangolare : tr17 (70*20)
Materiale fisico	A_calcestruzzo
Lunghezza	12.7600
Rotazione trasversale	0.00°

Figura 79: Proprietà analitiche.

In questa sezione si possono leggere le caratteristiche fisiche dell’elemento che verranno trasferite al software di calcolo come il tipo di famiglia, il materiale, la lunghezza e la rotazione trasversale. Le caratteristiche provengono direttamente dalla modellazione architettonica e quindi non ne è consentita la modifica a livello di gestione analitica.

- Allineamento analitico.

In questa parte sono presenti le informazioni riguardanti la posizione della rappresentazione analitica dell’elemento rispetto alla sua effettiva ubicazione.

Allineamento analitico	
Metodo di allin...	Proiezione
Proiezione Y - I...	Linea di ubicazi...
Proiezione Z - I...	Livello : 4.3 m
Metodo di allin...	Proiezione
Proiezione Y - F...	Linea di ubicazi...
Proiezione Z - F...	Livello : 4.3 m

Figura 80: Allineamento analitico.

La tolleranza tra la rappresentazione analitica e geometrica viene gestita alla voce “parametri strutturali” presente nella Ribbon di Revit.



Figura 81: Impostazioni strutturali.

Tolleranze			
Distanza supporto:	0.3048	Rilevamento automatico modello analitico -	0.3048
Distanza tra modello analitico e fisico:	0.1504	Rilevamento automatico modello analitico - Verticale:	0.3048
		Rilevamento automatico collegamento analitico:	0.3000

Figura 82: Tolleranze modello analitico.

E' possibile definire il riferimento con cui Revit posiziona l'elemento di calcolo a partire da quello reale. Si può impostare, infatti, se la barra analitica che la rappresenta deve essere posizionata all'intradosso o all'estradosso, in prossimità della faccia laterale o ad un certo livello. Di default Revit imposta come allineamento il *rilevamento automatico*: in questo modo il modello analitico della trave è al suo estradosso.

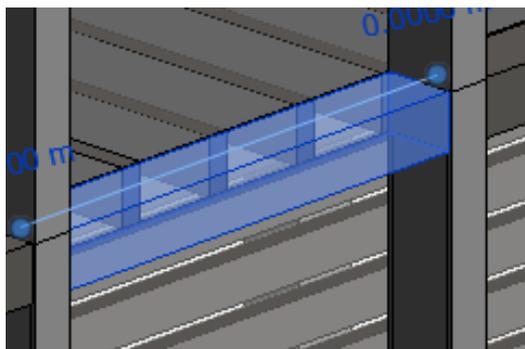


Figura 83: Rilevamento automatico linea analitica trave: estradosso.

Se invece si spunta l'impostazione *Proiezione*, si può utilizzare come riferimento uno dei due lati della trave, l'intradosso o un certo livello.

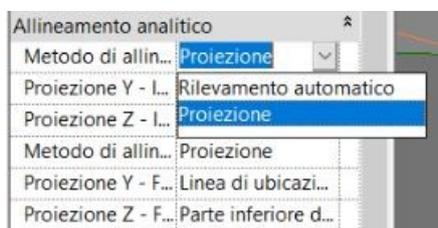


Figura 84: Allineamento analitico.

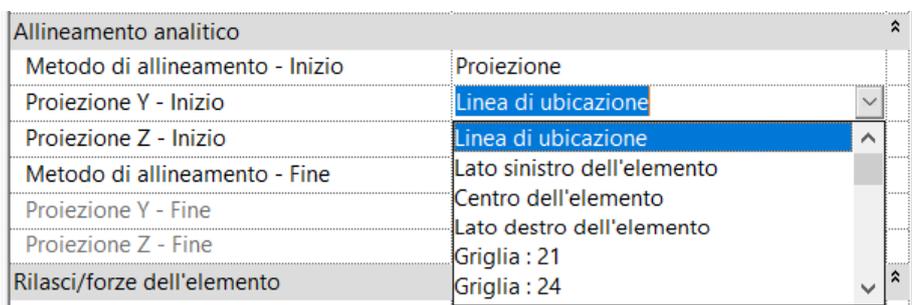


Figura 85: Possibilità allineamento analitico.

Nel caso in cui sia stato inserito un offset alla trave, cioè uno spostamento rigido in una direzione, con l'impostazione *rilevamento automatico* questo non verrà tenuto in conto per la posizione dell'asta analitica.

- Rilasci/ forze dell'elemento.

In questa gestione possiamo gestire i nodi che nascono all'intersezione tra gli elementi.



Figura 86: Tipologia di vincolo agli estremi dell'elemento analitico.

Le possibilità presenti sono:

- Incastro.
- Cerniera.
- Momento flettente.
- Definito dall'utente.

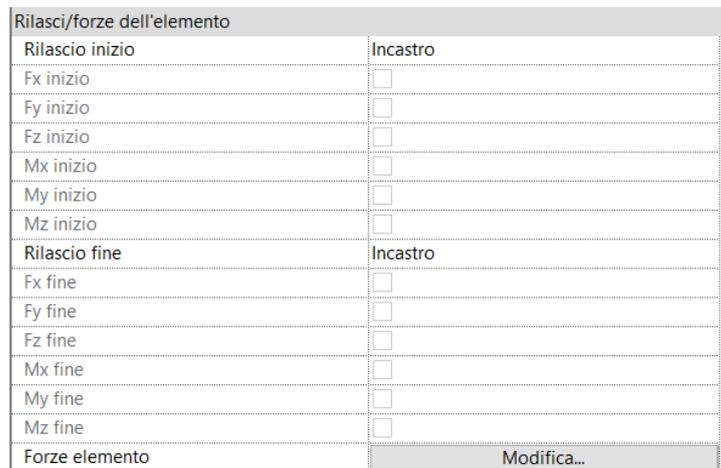


Figura 87: Rilasci/Forze dell'elemento.

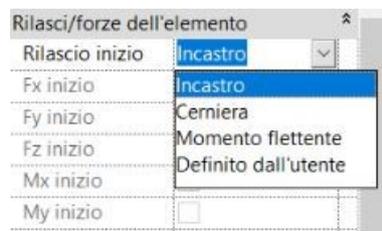


Figura 88: Possibilità di gestione vincoli iniziali e finali dell'elemento.

Per ciascuna di esse si possono osservare il tipo di sollecitazione che viene rilasciata dal vincolo: nel caso di incastro, per esempio, nessuna avrà la spunta in quanto non consente alcun di tipo spostamento e rotazione.

Alla voce *forze elemento*, infine, si possono definire il valore delle forze nei nodi di inizio e fine dell'elemento: nel mio caso studio non ne è stato necessario l'utilizzo perché non vi erano azioni, come un carico appeso, applicate puntualmente su un nodo.

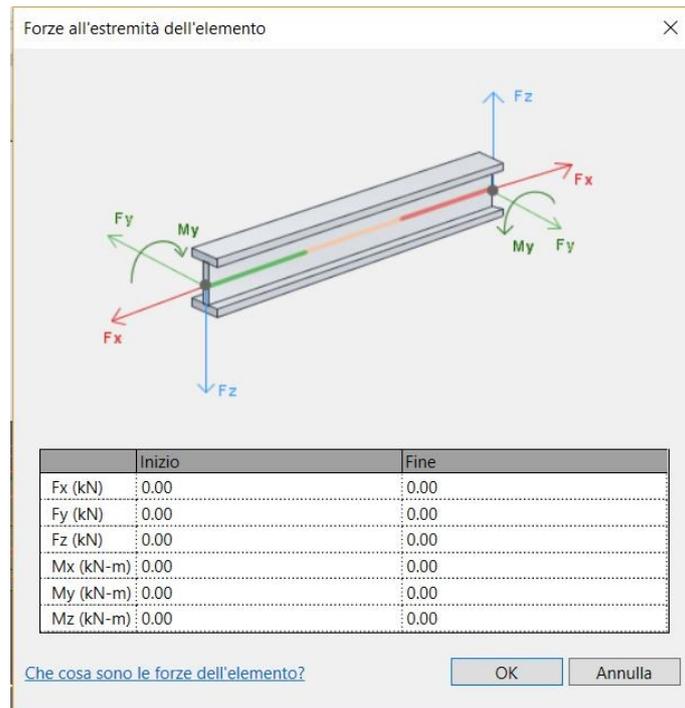


Figura 89: Forze all'estremità dell'elemento.

- Dati identità e fasi.

In questa sezione vi sono le informazioni relative all'identificativo dell'elemento e alla fase di creazione.

4.3.2. Pilastri

Insieme alle travi, i pilastri costituiscono l'elemento fondamentale per la definizione della capacità portante di una struttura. I parametri disponibili in ambiente Revit per la famiglia pilastri sono gli stessi delle travi.

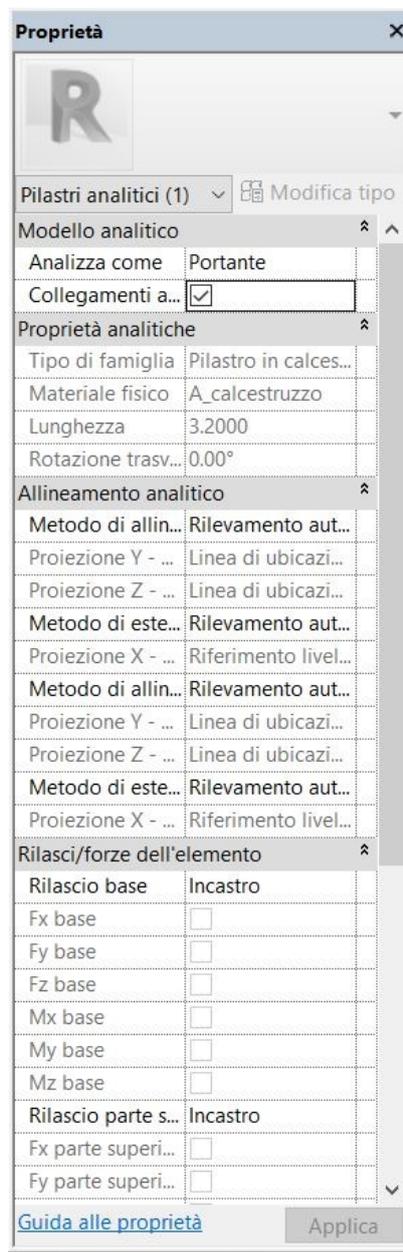


Figura 90: Proprietà pilastri analitici.

Nello specifico la voce *modello analitico* consente di gestire il tipo di valenza strutturale che vogliamo conferirgli e la presenza o meno del collegamento analitico. Per il primo, possiamo impostare se rendere il pilastro portante, non portante o laterale mentre per la seconda se

impiegare o meno il collegamento analitico. Nel mio caso studio ho spuntato il flag in tutti quei casi in cui il nodo d'estremità della trave e quello del pilastro non fossero coincidenti.

Allego tuttavia, per maggior chiarezza, un'immagine relativa al modello analitico dei pilastri nella vista architettonica per una porzione di solaio del mio progetto.

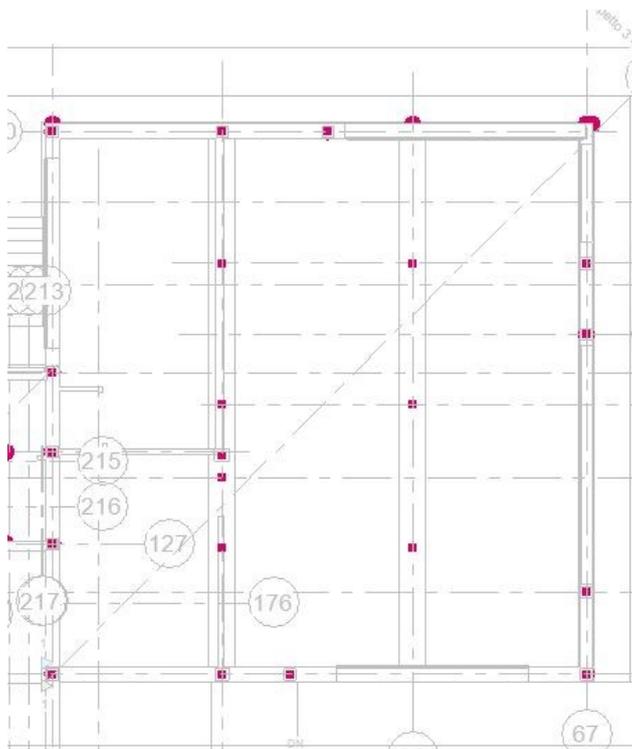


Figura 91: Pilastri analitici nella vista architettonica di una porzione di solaio.

Di default Revit posiziona il nodo analitico del pilastro nel baricentro dello stesso, tuttavia è buona norma verificarne l'effettiva posizione per evitare problemi nella restituzione analitica.

4.3.3. Solai

Gli orizzontamenti sono gli elementi che consentono la fruizione da parte degli utenti dei locali accessibili e la ripartizione dei carichi di esercizio alla struttura portante. Vorrei innanzitutto focalizzare l'attenzione del lettore su un aspetto relativo al modello analitico restituito dal plug-in di STA-DATA: il solaio strutturale ha lo spessore della soletta in calcestruzzo del getto di ricoprimento, nel mio caso 4 cm, ed i travetti hanno sezione rettangolare con altezza pari a quella dell'intero spessore del solaio, 20 cm. Pertanto l'impiego dell'applicativo STA-DATA ha un gran valore per quel che riguarda la visualizzazione dei travetti e delle pignatte che costituiscono il solaio ma non è utile per i calcoli strutturali. Infatti il pavimento analitico ha uno spessore di soli 4 cm rispetto ai 20 o 26 del solaio reale e quindi non si terrebbe conto del suo effettivo peso.

Inoltre, nel modello analitico associato al pavimento, non viene mantenuta l'informazione sul materiale.

Proprietà analitiche	
Tipo di famiglia	Pavimento : Laterocemento - 20.0 cm
Materiale fisico	Non assegnato
Area	65.458 m ²
Perimetro	37.8503

Figura 92: Assenza materiale fisico al pavimento analitico creato con il plug-in STA DATA.

Quindi per le analisi strutturali, svolte sul solo blocco centrale, sono stati utilizzati i solai modellati senza plug-in.

- Modello analitico.

In questa sezione si può impostare un parametro fondamentale per un solaio: quello di essere analizzato come un elemento bidirezionale o monodirezionale. Essendo la prassi progettuale quella di fare in modo che il peso del solaio venga ripartito per l'80% sulle travi principali e il restante 20% sulle secondarie si è optato per la prima possibilità. Per quel che riguarda le *proprietà analitiche*, esse hanno la stessa valenza di quelle relative alla famiglia travi e pilastri con la differenza che in questo caso sono presenti le informazioni relative ad area e perimetro.

- Proprietà analitiche.

Contiene le proprietà analitiche dell' elemento tra cui l'area e il livello assegnato. Una volta specificate le caratteristiche presenti nel modello analitico, è possibile non far coincidere l'area del solaio architettonico con quello di calcolo. Modellando il solaio a filo esterno delle travi su cui poggia, com'è peraltro nella realtà, l'elemento restituito nella vista strutturale poggia solo sulle travi secondarie come si può vedere anche nella seguente immagine.

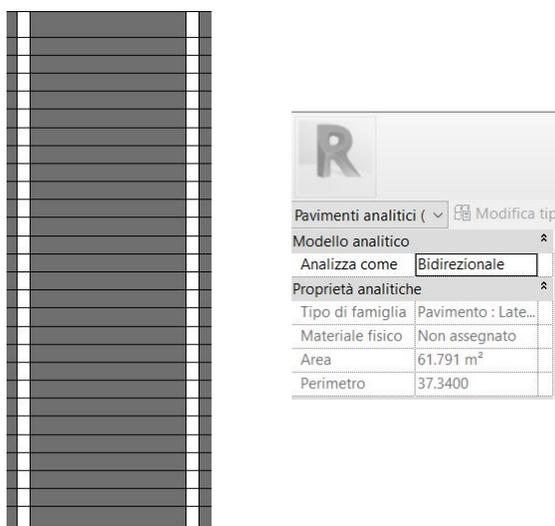


Figura 93: Modello analitico del solaio non poggiate sulle travi principali.

Attraverso il comando *regolazione analitica*, tuttavia, possiamo modificare la geometria: tale cambiamento rimane soltanto nella vista adibita al calcolo e non modifica quella architettonica.

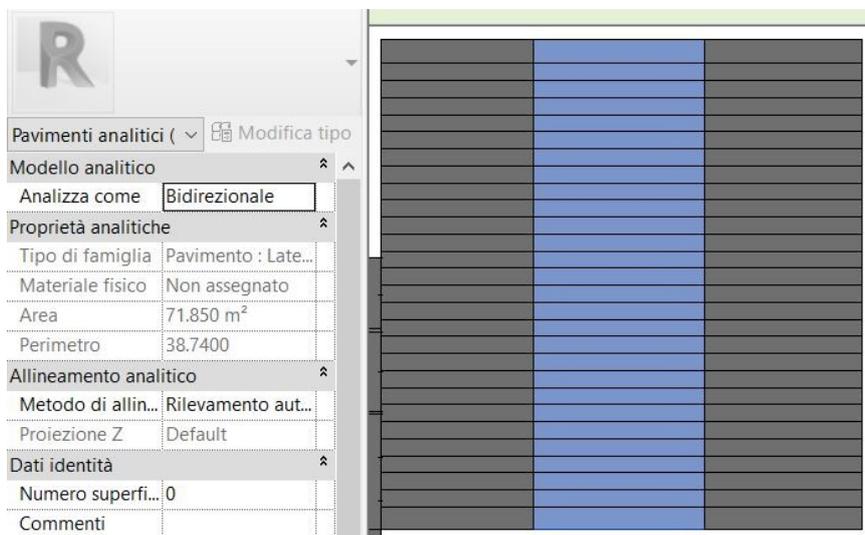


Figura 94: Modica area analitica del solaio.

Come possiamo osservare nell'esempio l'area passa da 61.79 m² a 71.85 m² mentre il solaio architettonico rimane di 61.70 m².

4.3.4. Muri

I muri in Revit si trovano sia nella Ribbon *Architettura* sia in quella *Struttura* in quanto il programma consente di modellare gli elementi portanti e di tamponatura.

Proprietà analitiche	
Tipo di famiglia	Muro di base : Ge...
Materiale fisico	A_muratura(1)
Area	13.789 m ²
Perimetro	27.8365
Allineamento analitico	
Metodo di alline...	Rilevamento auto...
Proiezione Z	Centro dell'eleme...
Metodo di estens...	Rilevamento auto...
Proiezione Y - Su...	Parte superiore d...
Metodo di estens...	Rilevamento auto...
Proiezione Y - Ba...	Base del muro
Dati identità	
Numero superficie	0
Commenti	
Fasi	
Fase di creazione	Stato di Fatto
Fase di demolizi...	Nessuno

Figura 95: Proprietà relative al muro analitico.

- proprietà analitiche.

Proprietà elemento come analitico come area e materiale fisico.

- allineamento analitico

Contiene le informazioni relative al riferimento rispetto al quale allineare il muro e i suoi limiti superiore ed inferiore. La possibilità di poter definire la posizione del tramezzo costituisce una potenzialità eccezionale per l'utente. Per esempio si considerino due tamponature disposte una sopra l'altra a formare un elemento di altezza pari alla somma dei due in cui il primo ha uno spessore di 40 cm e il secondo di 30 cm: in questo modo nasce un'eccentricità relativa di 5 cm tra la linea d'asse di quello di sotto e quello di sopra.

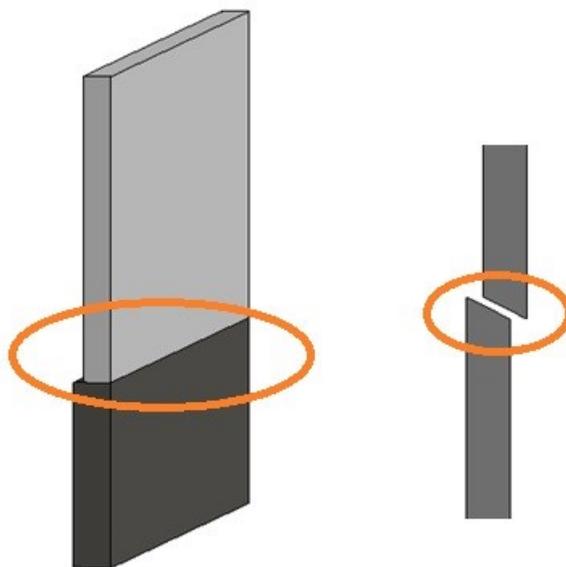


Figura 96: Sfalsamento modelli analitici.

Per gestirla nell'ambiente adibito al calcolo non dobbiamo far altro che impostare come riferimento per l'analitico la parete esterna di entrambe le pareti.

Allineamento analitico	
Metodo di allineamento	Proiezione
Proiezione Z	Superficie esterna elemento
Metodo di estensione - In alto	Rilevamento automatico
Proiezione Y - Superiore	Parte superiore del muro
Metodo di estensione - Base	Rilevamento automatico
Proiezione Y - Base	Base del muro



Figura 97: Allineamento analitico sulla superficie esterna dell'elemento.

Un' altra importante funzionalità implementata da Revit inoltre, alla voce *regolazione analitica*, è *regola muro*: con questa funzione il software consente di andare a collegare le estremità delle tamponature non del tutto coincidenti.



Figura 98: Regolazione analitica per i muri.

4.3.5. Fondazioni

Per i sistemi di fondazione infine sono state utilizzate due famiglie distinte: plinto e cordolo. Il primo è stato impiegato al di sotto dei pilastri mentre il secondo come appoggio al muro di fondazione.

Plinti analitici (1) Modifica tipo	
Modello analitico	
Analizza come	Fondazione
Proprietà analitiche	
Tipo di famiglia	Plinto : A5
Materiale fisico	Non assegnato

Figura 99: Parametri plinto analitico.

I parametri presenti nelle proprietà sono:

- Modello analitico.

In questa sezione viene indicato in che modo viene analizzato il riferimento analitico.

- Proprietà analitiche.

Come si può osservare nell'immagine precedente, non ci sono le informazioni relative alla geometria ed al materiale impiegato. Infatti le fondazioni vengono esportate solo come vincolo e vengono persi i dati della geometria e del materiale.

Nella seguente immagine si possono osservare le proprietà dell'elemento analitico.

Modello analitico						
Proprietà oggetto	Trave	Pilastro	Muro	Solaio	Plinto	Cordolo
Modello analitico	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Proprietà analitiche	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Allineamento analitico	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Rilasci/forze elemento	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Dati identità	✗	✗	✓	✓	✗	✗

Figura 100: Proprietà oggetto analitico.

4.4. Carichi e combinazioni

Revit consente la creazione di carichi e di gestirne la combinazione: innanzitutto, alla voce analizza della Ribbon, si possono definire le condizioni di carico.

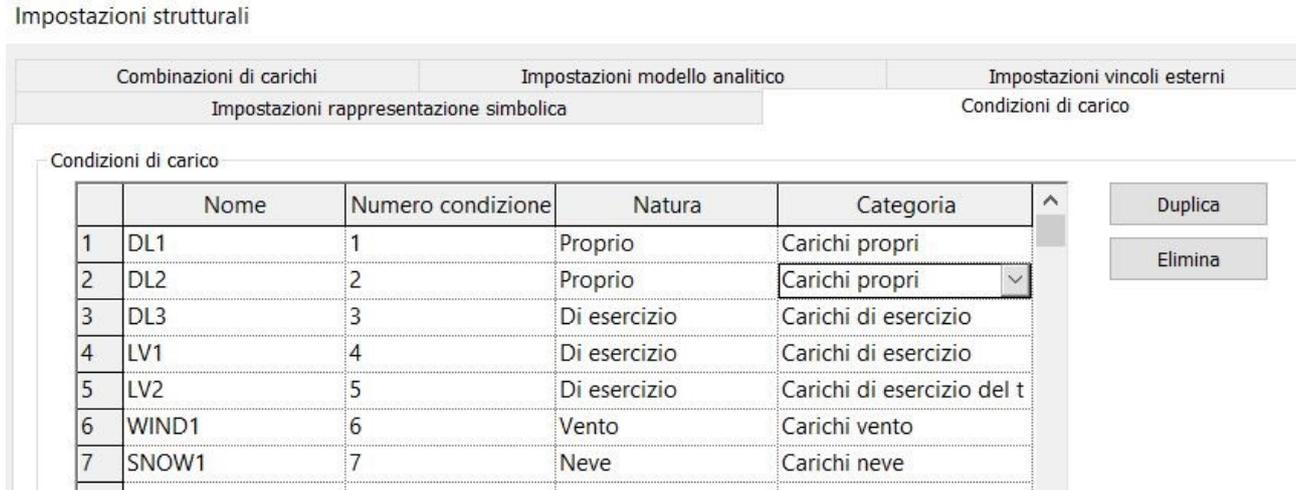


Figura 101: Condizioni di carico in Revit.

Come si legge nella figura precedente Revit consente di impostare il nome, il numero della condizione, la natura e la categoria.

Poi, per ciascun carico, è possibile definirne il tipo: concentrato, areale, ecc. e la sua entità.

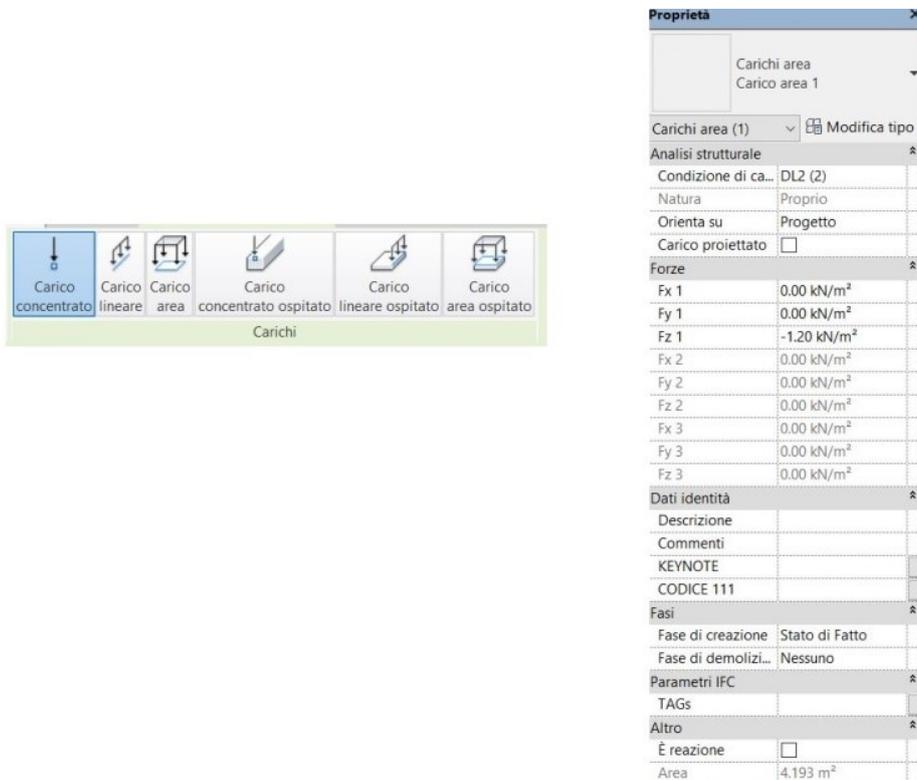


Figura 102: Definizione dei carichi in Revit.

Un aspetto su cui focalizzare l'attenzione è il fatto che Revit consente di applicare un carico soltanto definendone la geometria e la posizione, nei programmi di calcolo, invece, dipende dall'elemento selezionato. L'applicazione di un peso per unità di area potrà essere attuata soltanto ad un pannello, idem nel caso lineare con una trave. Questo aspetto, da una parte, è un vantaggio perché possono definire delle zone di carico che non coincidono con l'elemento modellato per esempio su una porzione di solaio. Tuttavia, bisogna porre estrema cura nella definizione delle varie impronte di carico mentre nel software di calcolo, selezionando il pannello, si è certi che le varie condizioni di carico vengano applicate sulla medesima area.

Un problema di visualizzazione riscontrato nel modello analitico di Revit è quello di non poter visualizzare soltanto una condizione di carico alla volta: questo implica poca chiarezza in quanto se i pesi sono applicati nella medesima posizione si sovrappongono. In robot invece, si può scegliere di vedere il solo caso che si desidera.

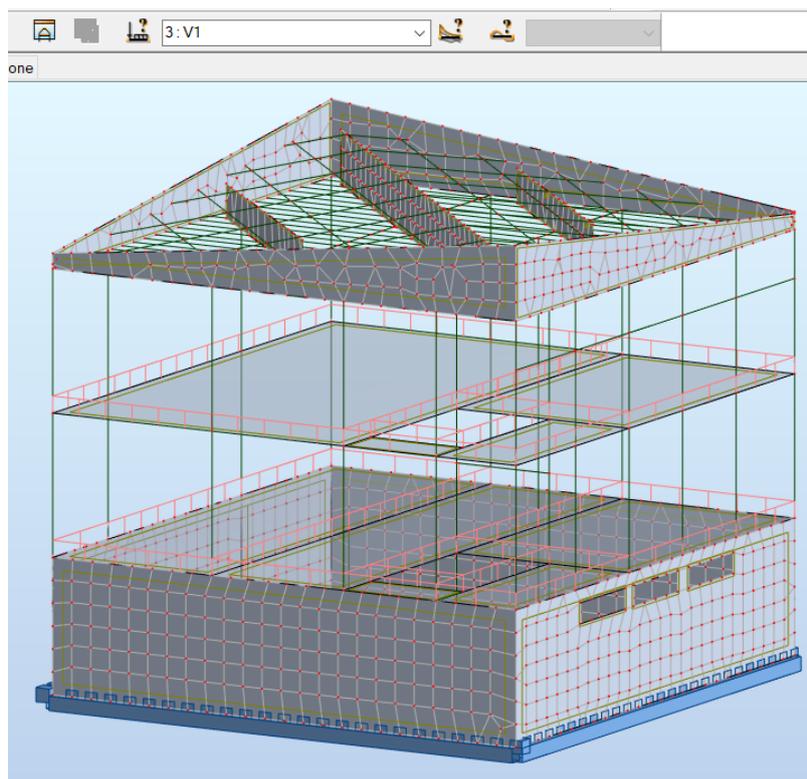


Figura 103: Carico V3 in Robot.

Per quel che riguarda la combinazione dei carichi Revit ha una buona potenzialità ed interfaccia: come si può leggere nella seguente immagine possiamo generare manualmente il caso desiderato definendo volta per volta il fattore da applicare al caso specifico.

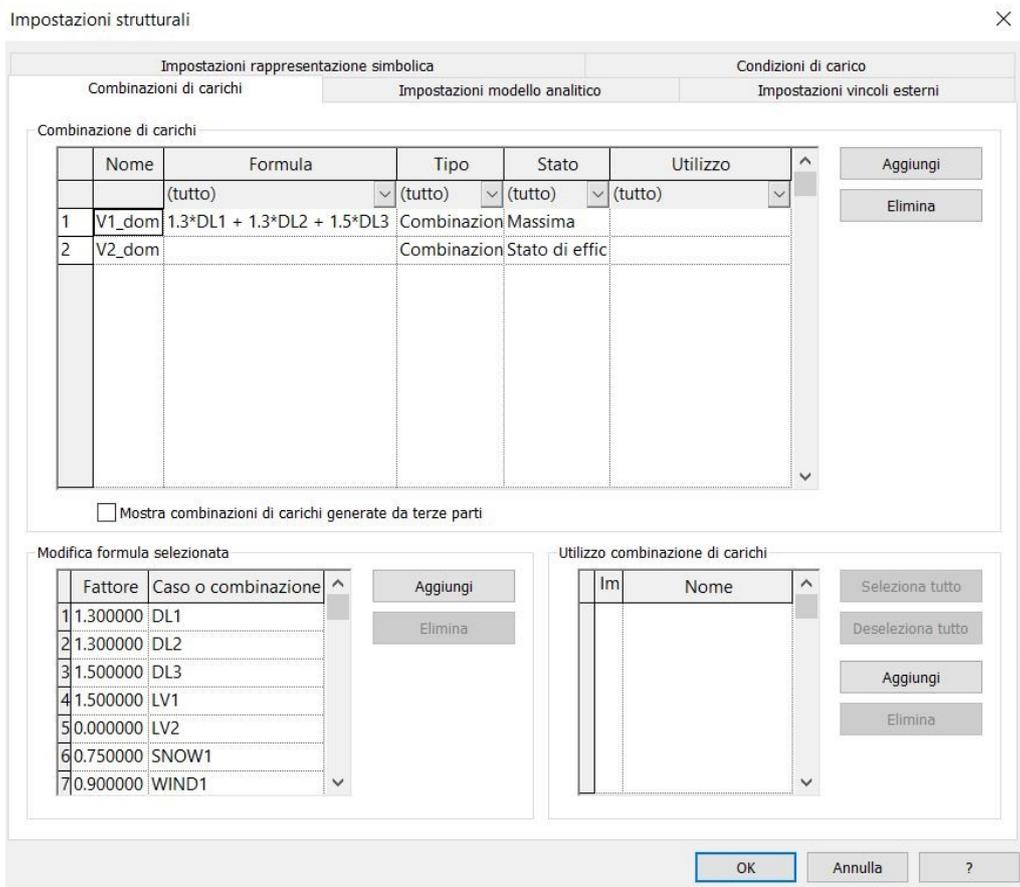


Figura 104: Combinazione dei carichi in Revit.

Purtroppo non sono implementati i fattori parziale di combinazione definiti dalla normativa. D'altro canto ciò può anche essere interpretato come una limitazione voluta del programma in quanto si deroga al progettista strutturista di gestire le combinazione dei pesi.

5. Rilievo strutturale

Un'ulteriore grande possibilità offerta dal BIM per la realizzazione della componente strutturale di un'opera è quella relativa alla pianificazione e realizzazione ottimizzata del rilievo strutturale. Con esso si intendono l'insieme di prove in situ atte a definire le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti la struttura portante e a verificare la disposizione dell'armatura.

5.1. Pianificazione

Grazie al modello tridimensionale della struttura è stato agevole identificare, in fase preliminare, i pilastri da indagare: in particolare ci si è soffermati su quelli aventi le quattro facce in vista. Si sono pertanto effettuate in ambiente Revit le tavole per visualizzare, piano per piano, gli elementi da testare in funzione della tipologia di prova. Ne allego in seguito l'immagine e specifico che gli elaborati grafici possono essere analizzati nella loro interezza nel capitolo finale alla voce *allegati*.

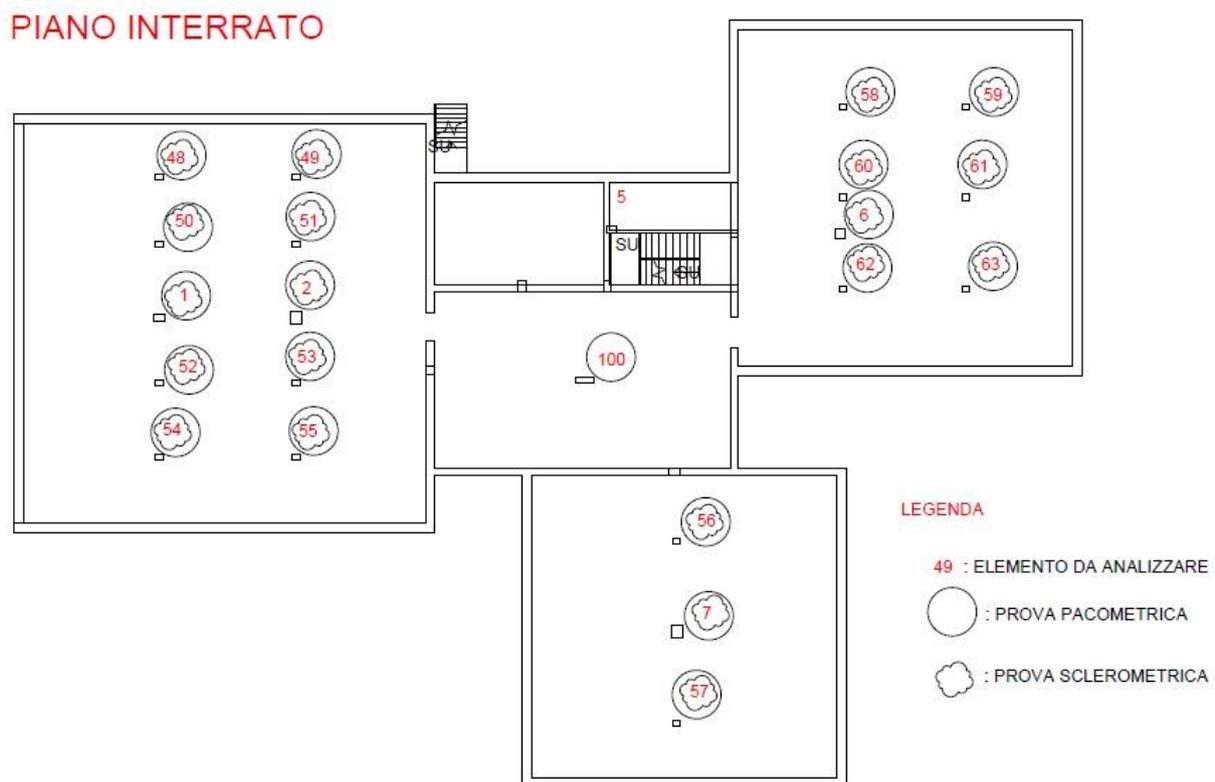


Figura 105: Prove in situ realizzate al piano interrato.

Si può osservare, per esempio, che per il pilastro 100 è stata predisposta soltanto l'indagine sclerometrica in quanto, non essendo tale elemento presente nelle carpenterie, non si è potuto compiere la verifica dell'armatura. Inoltre, per il pilastro numero cinque non è predisposta alcun tipo di prova in quanto è un elemento d'angolo con sole due facce in vista.

5.1.1. Utilizzo masse concettuali per il trattamento dei dati

Al fine di sfruttare al massimo le potenzialità offerte dalla metodologia BIM si è deciso aggiungere al modello le informazioni ricavate dalle due prove. In particolare si è scelto di impiegare la famiglia di Revit *masse metrica – massa concettuale*: tali elementi sono degli oggetti modellati a partire da una geometria rettangolare che viene poi estrusa nella dimensione fuori dal piano in modo da creare un parallelepipedo.

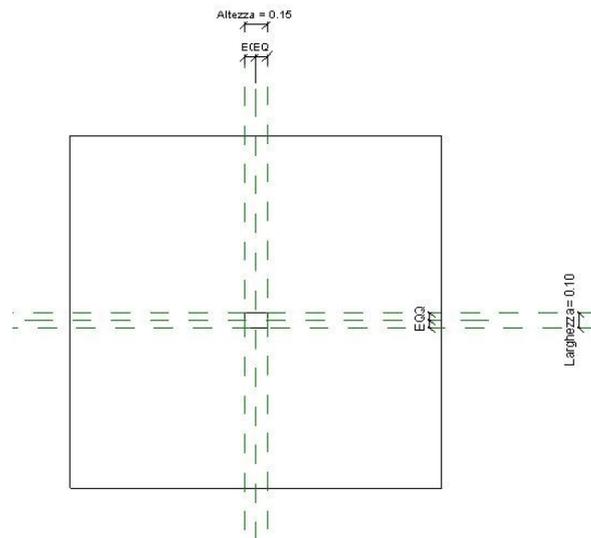


Figura 106: Parametrizzazione dimensioni massa concettuale.

Sono state parametrizzate le dimensioni dell'area di indagine in modo da creare un elemento con caratteristiche funzionali alla prova. In particolare:

- Altezza da terra;
- Larghezza area di indagine;
- Base area di indagine.

Gli oggetti così creati vengono inseriti negli host, nel nostro caso i pilastri, in una vista in pianta del progetto il cui livello che diventa il riferimento rispetto al quale definire l'altezza di posizionamento della massa concettuale.

Inoltre, a partire da un'unica famiglia, per entrambe le prove sono stati definiti quattro tipo di massa: destra, sinistra, fronte e retro, una per ogni faccia del pilastro indagato con riferimento ai punti cardinali est, ovest, nord e sud. Questo passaggio non può essere implementato in maniera automatica in quanto Revit ragiona per oggetti e non per superfici.

5.1.2. Parametri impiegati per la prova pacometrica

Per la prova pacometrica si sono indagati un rettangolo di dimensione 30 cm di altezza e 20 cm di base. Come si può osservare nella seguente immagine, sono stati aggiunti inoltre i parametri relativi ai risultati della prova: sono stati creati come parametro condiviso per poi venir aggiunto alla famiglia come parametro di progetto.

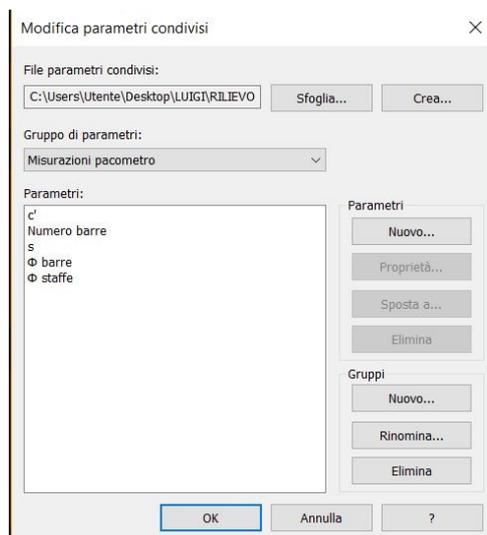


Figura 107: Parametri misurazioni pacometro.

In particolare sono stati creati i parametri per:

- Spessore del copriferro medio.
- Numero delle barre d'armatura longitudinale.
- Interasse tra le staffe.
- diametro delle barre.
- diametro delle staffe.

Il diametro delle barre non è stato effettivamente rilevato per l'eccessivo errore nella misura ma per completezza il parametro è stato comunque aggiunto. Nella prossima immagine si può vedere come aggiungere ad una categoria un parametro condiviso. Nello specifico lo spessore del copriferro medio ai modelli generici. Il parametro è stato aggiunto alla categoria *Comune*. Il tipo di parametro è testo in quanto deve contenere il valore del copriferro. La scelta del tipo di parametro da impiegare è un passaggio importante in quanto deve essere coerente con il tipo di dato che deve contenere.

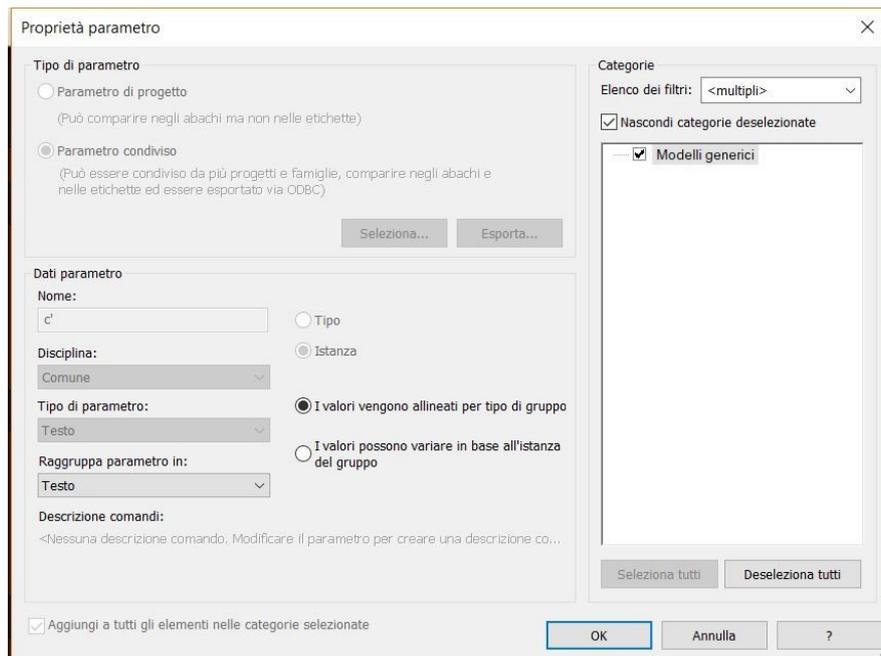


Figura 108: Importazione parametri condivisi in quelli di progetto.

Si è poi proceduto alla compilazione delle varie voci in modo tale da aggiungere i dati ricavati dalla prova al modello.

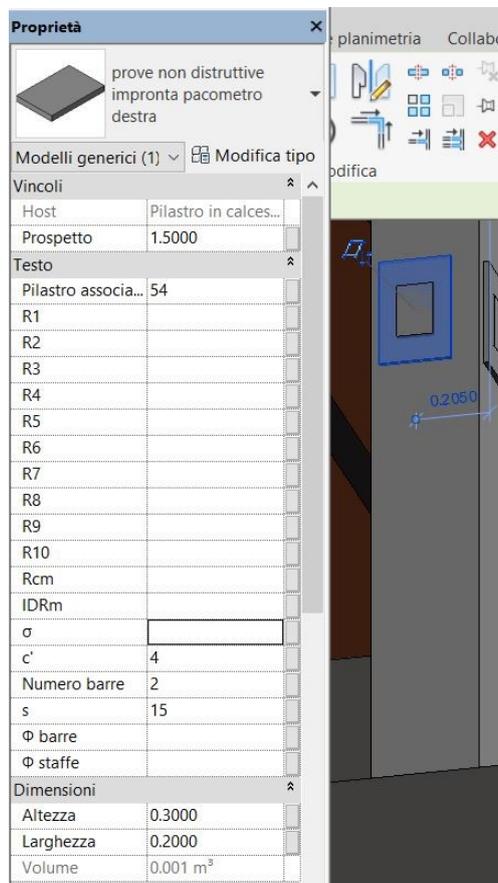


Figura 109: Compilazione parametri.

5.1.3. Prova sclerometrica

Per tale prova si è definita una massa con dimensioni 12 cm * 15 cm. L'iter per la definizione dei parametri è quello appena descritto ciò che cambia sono le informazioni aggiunte.

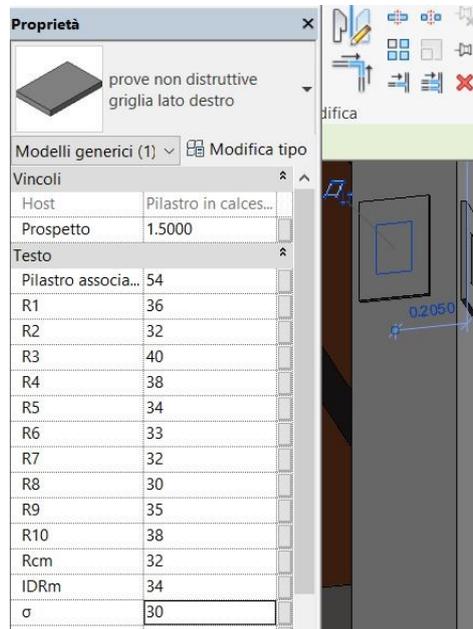


Figura 110: Compilazione massa sclerometro.

Possiamo osservare nell'immagine precedente l'insieme dei parametri relativi alla massa sclerometrica:

- Pilastro associato
- R1, R2 , ecc. : valori ottenuti dalle battute dello sclerometro.
- R_{cm} : resistenza a compressione media del calcestruzzo ricavata dalla prova
- IDR_m : Indice Di Rimbalzo medio, che è la media degli indici di rimbalzo da cui si ricava R_{cm} attraverso la curva di interpolazione.
- σ : resistenza media del calcestruzzo da progetto.

5.1.4. definizione pilastro associato

Uno step di fondamentale importanza è stato quello di definire il pilastro associato alla prova. L'obiettivo era associare a ciascuna massa il pilastro su cui era stata applicata. Questa operazione presuppone il fatto di prendere l'*Identificativo* dell'elemento pilastro e inserirlo in *pilastro associato* della massa. Per completare tale operazione è stato necessario avvalersi di Dynamo, un software di design parametrico implementato in Revit attraverso un plug-in. Il nodo cruciale del procedimento è fare in modo che la massa riconosca l'host a cui è associata per poi considerarne l'identificativo e inserirlo nel parametro *pilastro associato*.

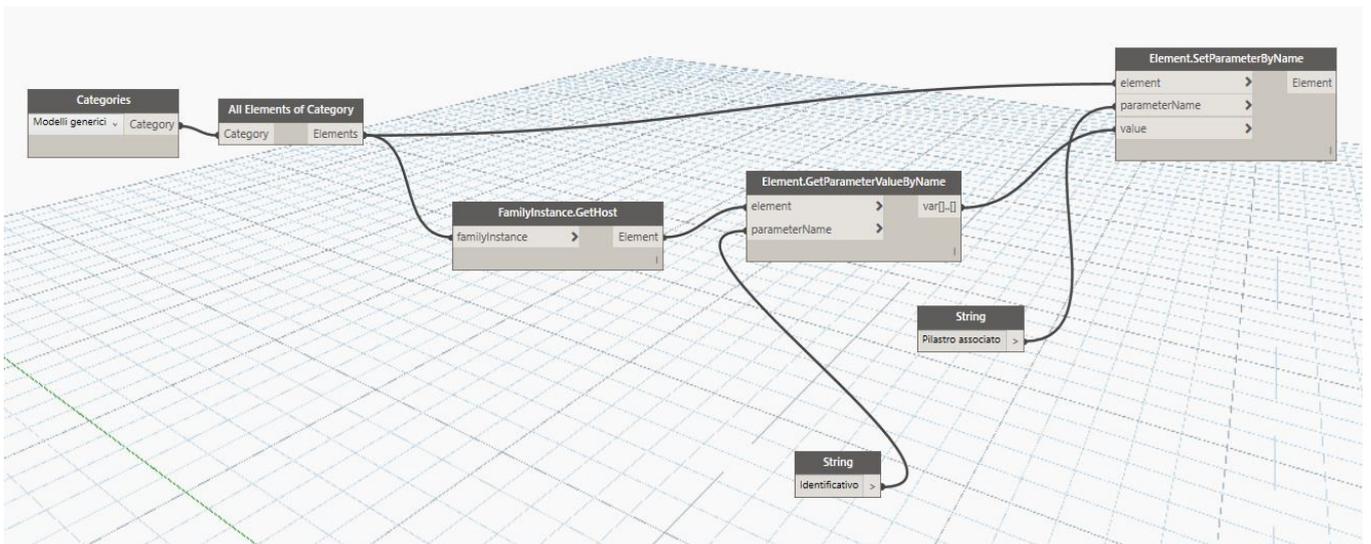


Figura 111: Script dynamo per il collegamento identificativo-pilastro associato.

Per ricavare la vista degli pilastri su cui si sono compiute le prove è stato creato un parametro condiviso di testo con il rispettivo nome che è poi stato compilato con il valore sì o no in base a che tipo di indagine è stata condotta.

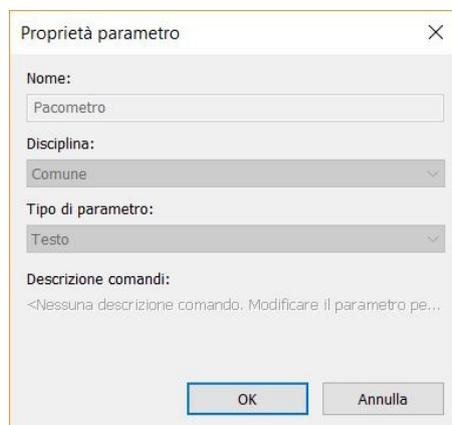


Figura 112: Parametro per la visualizzazione degli elementi indagati.

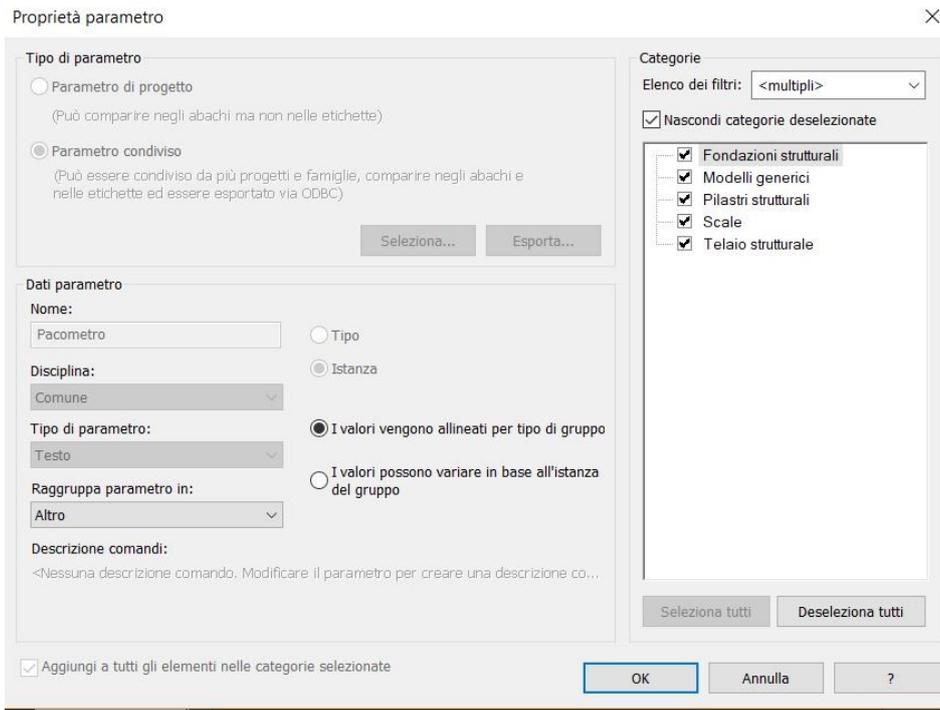


Figura 113: Importazione parametro condiviso.

Si è quindi creato un filtro di visualizzazione nella vista tridimensionale per osservare tutti gli elementi su è stata compiuta la prova.

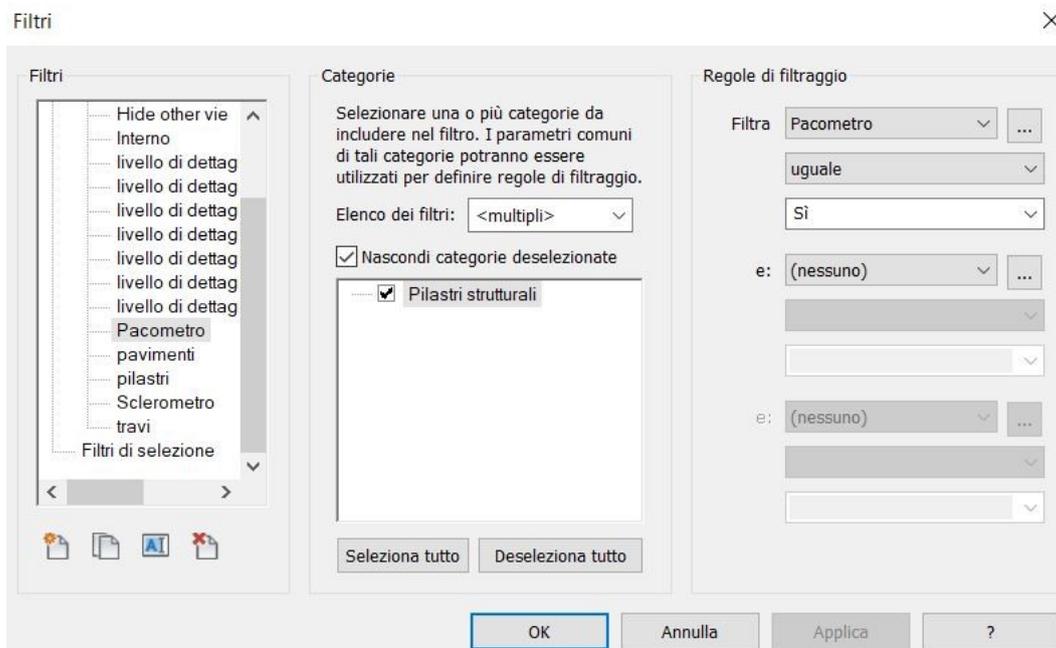


Figura 114: Filtro visualizzazione elementi con prova pacometrica.

Sostituzioni visibilità/grafica per Vista 3D: Pacometro							
Categorie del modello		Categorie di annotazioni		Categorie del modello analitico		Categorie importate	
Filtri							
Nome	Visibilità	Proiezione/Superficie			Taglio		Mezzitoni
		Linee	Motivi	Trasparenza	Linee	Motivi	
Pacometro	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>

Figura 115: Impostazione visiva del filtro: prova pacometrica.

Nella seguenti immagini si possono vedere gli elementi indagati con le due prove: nella prima la prova pacometrica e nella seconda quella sclerometrica.

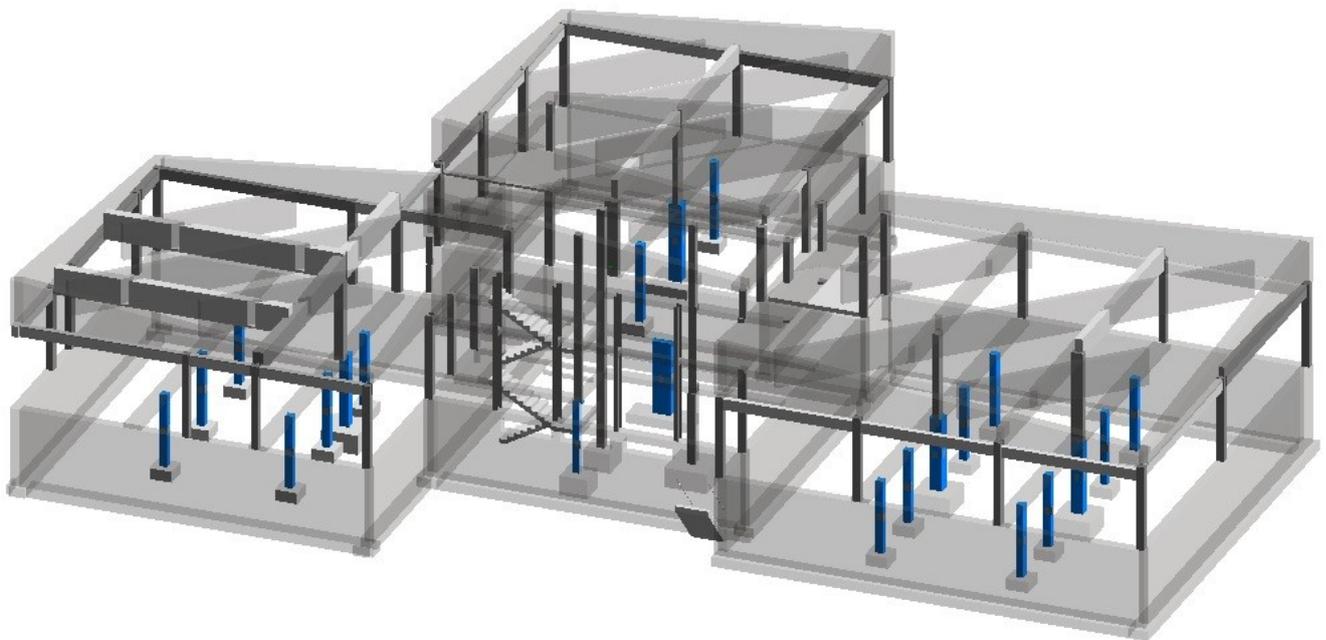


Figura 116: Elementi indagati con prova pacometrica.

Nome	Visibilità	Proiezione/Superficie			Taglio		Mezzitoni
		Linee	Motivi	Trasparenza	Linee	Motivi	
Sclerometro	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>

Figura 117: Impostazione visiva del filtro: prova sclerometrica.

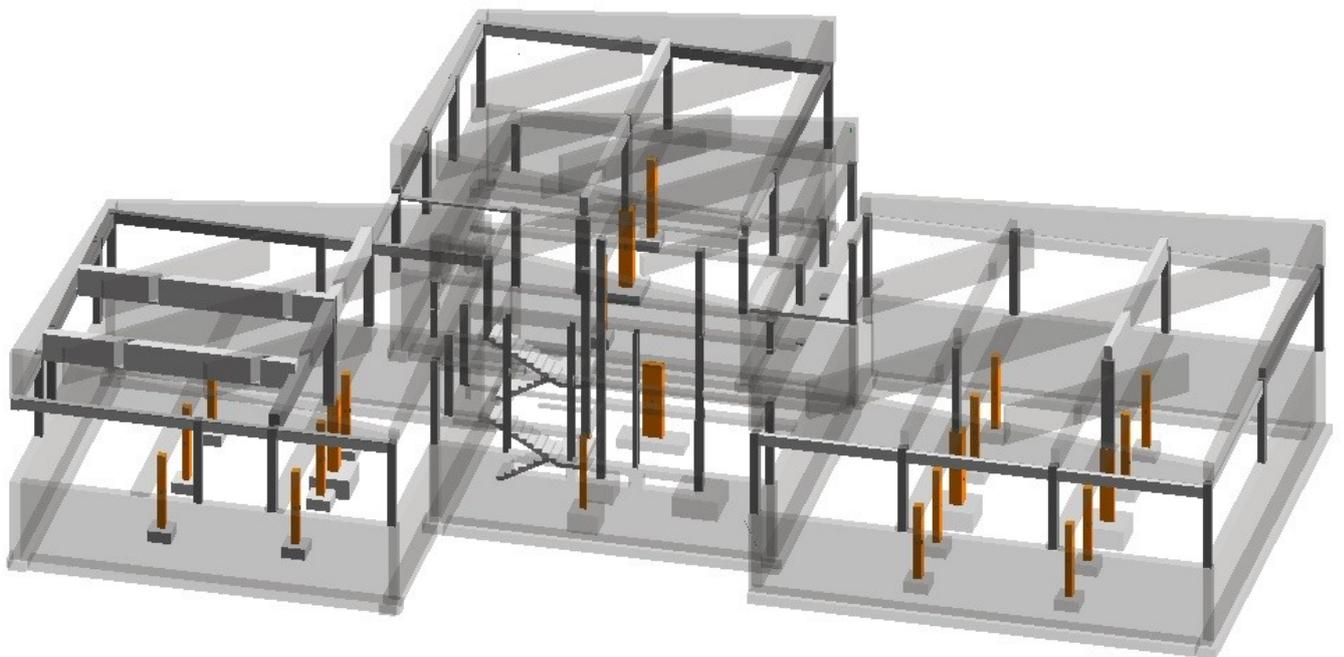


Figura 118: Elementi indagati con prova sclerometrica.

5.2. Normativa di riferimento

Le norme tecniche per le costruzioni del 2008 con la relativa circolare esplicativa n°617 del 2 febbraio 2009, in particolare al capitolo C8A.1.B "COSTRUZIONI IN CALCESTRUZZO ARMATO O IN ACCIAIO: DATI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE" definiscono la documentazione necessaria ed il tipo e quantità di prove da compiere per raggiungere un certo Livello di conoscenza.

Quest'ultimo rappresenta, come dice il nome stesso, il grado di informazione che si possiede riguardo una struttura e si traduce con l'applicazione di diversi fattori di confidenza alle proprietà dei materiali e all'impiego di metodi di analisi differenti per la struttura.

Nel testo si definiscono tre livelli:

- LC1: Conoscenza Limitata;
- LC2: Conoscenza Adeguata;
- LC3: Conoscenza Accurata.

Gli aspetti che su cui si basano sono:

1. **Geometria**, ossia le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali.
2. **Dettagli strutturali**, ossia la quantità e disposizione delle armature, compreso il passo delle staffe e la loro chiusura.
3. **Materiali**, ossia le proprietà meccaniche dei materiali.

La relazione tra livelli di conoscenza, metodi di analisi e fattori di confidenza è illustrata nella prossima immagine.

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>estese</i> verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure <i>estese</i> prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>esaustive</i> verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ oppure <i>esaustive</i> prove in-situ	Tutti	1.00

Figura 119: Tabella 11.1 definizione dei livelli di conoscenza.

Fonte: Ordinanza 3431 capitolo 11.2.3.3. pag. 105.

La percentuale di elementi strutturali da verificare per i vari livelli è definita nella tabella C8A.1.3a dello stesso capitolo di cui segue l'immagine.

	Rilievo (dei dettagli costruttivi) ^(a)	Prove (sui materiali) ^{(b)(c)}
Per ogni tipo di elemento "primario" (trave, pilastro...)		
Verifiche limitate	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio
Verifiche estese	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio
Verifiche esaustive	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio

Figura 120: Tabella 11.2a: Descrizione verifiche.

Fonte: Ordinanza 3431 capitolo 11.2.3.3. pag. 107.

Poiché l'edificio risulta utilizzato, al fine di ridurre l'impatto sulle attività insediate si è proposto in fase preliminare un livello di conoscenza obiettivo pari a LC2 raggiungibile effettuando:

- **limitate verifiche** in situ.
- **limitate prove** in situ.

5.3. Descrizione indagini

5.3.1 Prova pacometrica

La prova pacometrica appartiene alla famiglia che utilizza la magnetometria per individuare i materiali ferromagnetici presenti negli elementi facenti parte del corpo indagato: pilastri, travi, travetti di solaio etc.

In particolare, l'indagine consente di mappare la maglia di armatura presente nei componenti strutturali di cui sopra e di conoscerne lo spessore di copriferro medio.

5.3.1.1 Descrizione dello strumento

Il pacometro consiste in una sonda emettitrice di campo magnetico collegata ad un'unità di elaborazione digitale ed acustica ed è costituito da:

- Un'unità di emissione e lettura del campo elettromagnetico;
- Una o più sonde emittenti-riceventi il campo magnetico.



Figura 121: Unità di emissione e lettura del campo magnetico/sonda emittente e ricevente il campo magnetico.

L'unità di emissione contiene un dispositivo in grado di emettere un segnale acustico quando rileva un oggetto metallico e presenta un monitor su cui si può leggere lo spessore del copriferro con una precisione di ± 1 cm. Nello schermo presente nell'unità di misura c'è la possibilità di impostare il diametro delle barre che la sonda andrà a cercare ma, durante l'attività di rilievo, si è osservato che tale misurazione è poco precisa e quindi non è stata effettuata.

Lo strumento presenta una precisione del millimetro nella misura del copriferro e nella posizione delle barre.

5.3.1.2 Principio fisico sfruttato

“Il principio fisico sfruttato è quello dell’induzione magnetica secondo cui un conduttore metallico che si trova in un campo magnetico generato da una sonda mobile posta sulla superficie, provoca sulle estremità una differenza di potenziale rilevata da un’unità di lettura.”⁴

L’unità emettitrice genera un campo magnetico che si propaga nel mezzo in cui è annessa l’armatura, nel nostro caso calcestruzzo, lungo l’asse della sonda per una profondità di 10 cm.

Il corpo metallico che viene investito da tale campo rimane magnetizzato per qualche secondo, tempo sufficiente alla sonda per stimarne l’entità che dipende dalla distanza tra la barra e la sonda cioè dallo spessore di copriferro.

5.3.1.1. Descrizione della prova e risultati ottenuti

La sonda emettitrice viene fatta scorrere sull’elemento in calcestruzzo ad una velocità tale da consentire allo strumento di indurre il campo magnetico nel materiale ferroso e di rilevarne la posizione.

Al riconoscimento di un elemento ferromagnetico il processore emette un segnale acustico per agevolare l’utente nel caso si lavori in luoghi rumorosi. Contemporaneamente sul monitor si vede una colonnina digitale che aumenta l’ascissa quando lo strumento è in asse con la barra.

Dato che la sonda emette il campo magnetico lungo il suo asse è facile poter definire con la precisione di qualche millimetro l’effettiva direzione della barra.

E’ buona prassi ricercare in prima battuta le staffe per poi far passare la sonda nello spazio generato dal loro interasse per definire la posizione delle barre longitudinali.

Ricapitolando i risultati ricavati dalla prova sono:

1. Posizione, interasse e copriferro medio delle staffe.
2. Posizione e copriferro medio delle barre d’armatura longitudinali.

⁴ Estratto dal libro “indagini non invasive in edilizia ed impiantistica” di Juan Pedro Grammaldo e Francesco Mazziotti, 2016.

Allego nel seguito un risultato tipico relativo ad un pilastro. Si può osservare come l'elemento strutturale sia stato preventivamente coperto con dei fogli di carta in modo da non lasciare il segno della prova dato che non fa parte di una campagna ufficiale.



Figura 122: Esempio di prova pacometrica su pilastro.

Partendo dall'alto dell'immagine possiamo osservare il numero del pilastro ed il relativo piano, la direzione di staffe e barre longitudinali con il relativo copriferro.

Dopo la prova ho compiuto la verifica dell'armatura presente da rilievo e quella da carpenteria, allego, a titolo di esempio, il risultato relativo al piano interrato.

±5 cm ±1 cm

PIANO INTERRATO										
carpenteria						rilievo				
N° elemento	dimensioni(b*h)	barre longitudinali	staffe	copriferro barre long	copriferro staffe	dimensioni(b*h)	barre longitudinali	staffe	copriferro medio barre long	copriferro medio staffe
[/]	[cm]*[cm]	N°ferri[/]Φdiametro[mm]	Φdiametro[mm]/passo[cm]	[mm]	[mm]	[cm]*[cm]	N°ferri[/]Φdiametro[mm]	passo medio [cm]	[mm]	[mm]
1	50*30	4Φ14, 2Φ12	Φ6/25	20	20	50*30	10	17	37	44
2	50*50	8Φ12	Φ6/25	20	20	50*50	8	22	38	66
48	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	15	38	34
49	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	20	40	40
50	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	9	33	30
51	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	22	46	45
52	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	28	36	31
53	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	20	30	32
54	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	17	28	44
55	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	13	41	44
100	/	/	/	/	/	75*25	4	10	57	56
56	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	21	30	46
7	50*50	8Φ12	Φ6/25	20	20	50*50	8	24	21	25
57	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	30	30	21
58	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	30	24	27
59	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	23	27	33
60	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	25	29	26
61	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	25	26	31
62	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	20	47	36
63	30*25	4Φ10	Φ6/25	20	20	30*30	4	22	30	33
6	40*40	4Φ16	Φ6/25	20	20	40*40	4	14	40	36

Figura 123: Confronto armatura da carpenteria e rilievo piano interrato

LEGENDA
GRANDEZZA VERIFICATA
GRANDEZZA VERIFICATA A FAVORE DI SICUREZZA
GRANDEZZA NON VERIFICATA

totale verificati con carpenteria
95%

La tabella è divisa tra la parte relativa ai dati noti da carpenteria e quella nota da rilievo.

Da sinistra verso destra sono presenti:

- Il numero del pilastro.
- Le dimensioni della sezione.
- Numero e diametro delle barre longitudinali.
- Diametro e passo delle staffe.
- Copriferro delle barre longitudinali e delle staffe.

Lo stesso schema è ripetuto nella parte relativa ai dati ottenuti da rilievo.

Come detto nei capitoli precedenti non è stato possibile misurare il diametro delle barre longitudinali quindi è indicato solo la loro quantità. Ho indicato con il colore verde chiaro le grandezze che risultano verificate nel confronto tra carpenteria e rilievo, con il verde scuro quelle a favore di sicurezza e con il rosso chiaro i valori non verificati con le carpenterie.

Come indicato nel riquadro giallo in basso a sinistra non è stata effettuata alcuna esportazione di materiale col fine di misurare il diametro delle armature.

E' stata effettuata la media aritmetica del passo delle staffe e dei valori di copriferro come si può osservare nella seguente immagine:

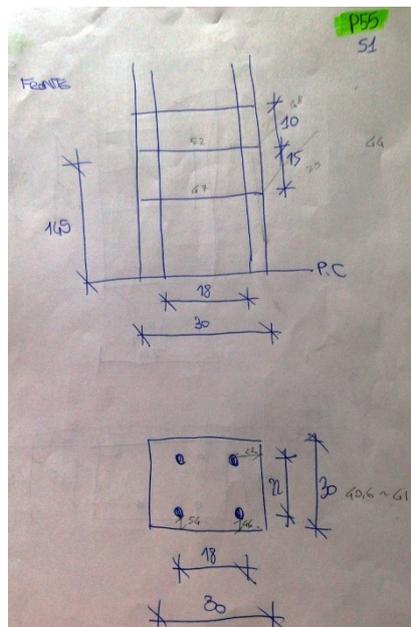


Figura 68: Esempio media aritmetica passo delle staffe e copriferro.

Possiamo trarre le seguenti conclusioni:

- Esistono alcune imprecisioni nel numero effettivo di barre longitudinali come nel caso della colonna 1 del seminterrato in cui sono state rilevate 10 barre longitudinali al posto delle 6 disposte da carpenteria. Il motivo potrebbe essere sia l'effettiva presenza di 4 barre in più sia il rilevamento degli spilli delle staffe.
- Esistono molte differenze tra il passo teorico delle staffe e quello effettivamente rilevato, ciò può essere dovuto all'incertezza dello strumento o ad un'effettiva differenza nella disposizione dell'armatura rispetto allo stato di progetto.
- I valori maggiormente difformi dalla carpenteria sono quelli relativi al copriferro medio: un suo maggior spessore è stato considerato non a favore di sicurezza poiché, nonostante consenta un maggior grado di protezione verso la corrosione dell'acciaio implica un aumento dell'altezza utile del pilastro.
- E' doveroso sottolineare come lo strumento sia contraddistinto da un livello di incertezza che presuppone un'interpretazione critica ed attenta dei risultati.

5.3.2 Prova sclerometrica

La prova sclerometrica è un tipo di indagine che consente di conoscere la resistenza del calcestruzzo attraverso la correlazione empirica con l'indice di rimbalzo proporzionale alla durezza superficiale del calcestruzzo.

5.3.2.1 Descrizione della strumentazione

Al fine di svolgere la prova sono necessari tre strumenti:

- Sclerometro
- Incudine di taratura
- Pietra abrasiva



Figura 69: Sclerometro e pietra abrasiva.

Lo sclerometro è un corpo cilindrico in alluminio al cui interno si trova una massa battente in acciaio azionata da una molla di costante elastica nota, che contrasta un' asta di percussione a contatto con la superficie di prova del calcestruzzo.

Sulla superficie del cilindro è presente una scala graduata su cui è riportato l'indice di rimbalzo, un valore adimensionale che, attraverso le curve di correlazione proprie dello strumento restituisce la resistenza cilindrica media del calcestruzzo.



Figura 70: Sclerometro.

L'incudine di taratura è un'incudine di acciaio, caratterizzato da una massa di circa 16 kg e da una durezza minima predefinita, mediante la quale si verifica il corretto funzionamento dello sclerometro prima di ogni campagna di indagine: la molla all'interno dello sclerometro con il tempo può deteriorarsi e provocare una variazione della propria rigidità causando una misurazione errata dell'indice di rimbalzo. La pietra abrasiva è un disco di 7 cm di diametro e 3 di spessore in carburo di silicio o materiale equivalente con tessitura granulare media, con la quale regolarizzare la superficie nuda del calcestruzzo prima della prova. La sua applicazione è di fondamentale importanza per rimuovere il film più esterno di polvere e carbonatazione superficiale che possono modificare l'indice di rimbalzo reale.

5.3.2.2 Principio fisico sfruttato

L'indagine, in pratica, si basa sulla corrispondenza fra il carico unitario di rottura a compressione e la durezza superficiale del calcestruzzo, pertanto va svolta con la struttura al rustico cioè senza finiture quali intonaci, piastrelle e malte. Essendo un'indagine puntuale dipende molto dalle caratteristiche dell'area indagata, bisogna quindi tener conto che sono numerosi i parametri che possono alterarne il risultato.

Ad esempio:

- La presenza di armatura al di sotto del punto indagato;
- Il contenuto di umidità, in quanto al crescere del rapporto acqua su cemento si riduce la stima della resistenza;
- La maturazione del calcestruzzo: un calcestruzzo più vecchio a causa della carbonatazione dovuta dagli agenti esterni può provocare un irrigidimento dello stato superficiale fino al 50% in più rispetto allo stato iniziale;
- L'imperfetta taratura dello strumento;
- La posizione del punto di battuta all'interno dell'elemento indagato: in base alla quota del getto di calcestruzzo si avrà un ingranamento degli inerti nelle zone più basse della struttura ed un incremento del rapporto acqua/cemento in quelle alte provocando un aumento dell'indice di rimbalzo nel primo caso e una diminuzione nel secondo.

L'indagine sclerometrica non può sostituire il test standard per la misura della resistenza meccanica a compressione tuttavia nel nostro caso, siccome non era consentita alcuna prova di tipo distruttivo, è stata l'unica impiegata per la sua stima.

5.3.2.3 Descrizione della prova e risultati ottenuti

Per semplicità si considera che lo sclerometro fosse correttamente tarato tramite l'incudine. Ciò detto, come si può vedere nella seguente immagine, è necessario rimuovere il film superficiale con la pietra abrasiva: nell'immagine si può vedere un pilastro la cui metà di sinistra è stata già "ripulita" dal film superficiale mentre quella di destra no, si può osservare come la prima risulti più chiara della seconda.



Figura 72: Differenza pilastro trattato e non con la pietra abrasiva.

In seguito bisogna tracciare sull'elemento da analizzare una griglia regolare con 12 quadranti, generalmente quattro righe per tre colonne con dimensioni dai 3 ai 5 cm.

In questo passaggio è importante, per evitare di compiere la battuta proprio in prossimità di una barra, consultare con attenzione i fogli con la griglia di armatura. Per compiere la misurazione è necessario posizionare lo sclerometro nel punto da indagare in modo che sia il più ortogonale possibile al pilastro per poi armare lo strumento: l'asta di percussione viene premuta sulla superficie tramite la molla che si accorcia della quantità prevista, istantaneamente questa viene rilasciata fino al termine della sua corsa facendo in modo che la massa guidata dall'asta di scorrimento colpisca il materiale. Il rimbalzo che ne scaturisce viene visualizzato su una scala graduata sullo strumento e riportata su un'apposita tabella di cui allego l'immagine.



POLITECNICO DI TORINO
 Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica
MASTRLAB

Committente	data	ora	Sperimentatore

PROVA SCLEROMETRICA

Elemento strutturale: PILASTRO

Descrizione del sistema di riferimento: X: DA SINISTRA VERSO DESTRO EDIFICIO CON FRONTE INGRESSO
 Y: DA PIANO DI CALPESTIO PUNTO VERSO SOFFITTO

N	Codice posizione	X _G		Y _G		I _n											
		(m)	(m)	(m)	(m)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂
1	P.53	0,15	1,45	38	42	42	38	42	43	38	36	45	40	36	36	35	
2	P.55	0,15	1,30	43	38	39	34	42	34	32	42	44	38	38	42		
3	P.2	0,25	0,88	38	38	39	40	41	43	32	40	40	36	36	42		
4	P.51	0,15	1,10	42	42	40	40	39	29	36	39	34	42	39	34		
5	P.49	0,15	1,08	36	30	40	33	36	41	34	41	43	34	36	40		
6	P.18	0,15	1,25	36	37	34	34	31	35	35	30	28	32	36			
7	P.50	0,15	1,50	40	38	34	40	37	40	39	42	38	32	36			
8	P.1	0,15	1,32	33	42	42	30	41	43	42	42	43	32	38			
9	P.52	0,15	1,32	43	37	34	28	44	39	41	42	41	31	34			
10	P.54	0,15	1,33	34	38	38	30	28	39	36	32	38	29	33			

Figura 73: Tabella utilizzata per la trascrizione degli indici di rimbalzo in situ.

A partire da sinistra possiamo leggere: il numero progressivo di indagine, il codice posizione dell'elemento indagato, le coordinate spaziali del baricentro della griglia con sistema di riferimento descritto nelle righe al di sopra e l'indice di rimbalzo delle 12 battute. Per l'elenco completo delle prove sclerometriche compiute si richiama agli allegati.

Ipotizzando che i valori registrati si distribuiscano secondo un andamento gaussiano si scartano i due valori estremi per poi compiere la media aritmetica tra i 10 valori restanti: il numero così ottenuto è l'indice di rimbalzo medio (IDR_m).

Tale parametro è quello da inserire nelle ascisse del grafico per la stima della resistenza media del calcestruzzo: le curve differiscono per l'angolo di inclinazione(α) dello sclerometro, generalmente quelle più impiegate sono quelle con $\alpha=0^\circ$, 90° e -90° che rappresentano rispettivamente sclerometro orizzontale (caso del pilastro), sclerometro diretto all'in su (misura dell'estradosso di una trave) e sclerometro all'in giù (misura intradosso trave).

Per ottenere una precisione maggiore nella stima della resistenza media sono stati impiegati dei fogli di calcolo elettronico aventi le funzioni che descrivono le curve di interpolazione utilizzate.

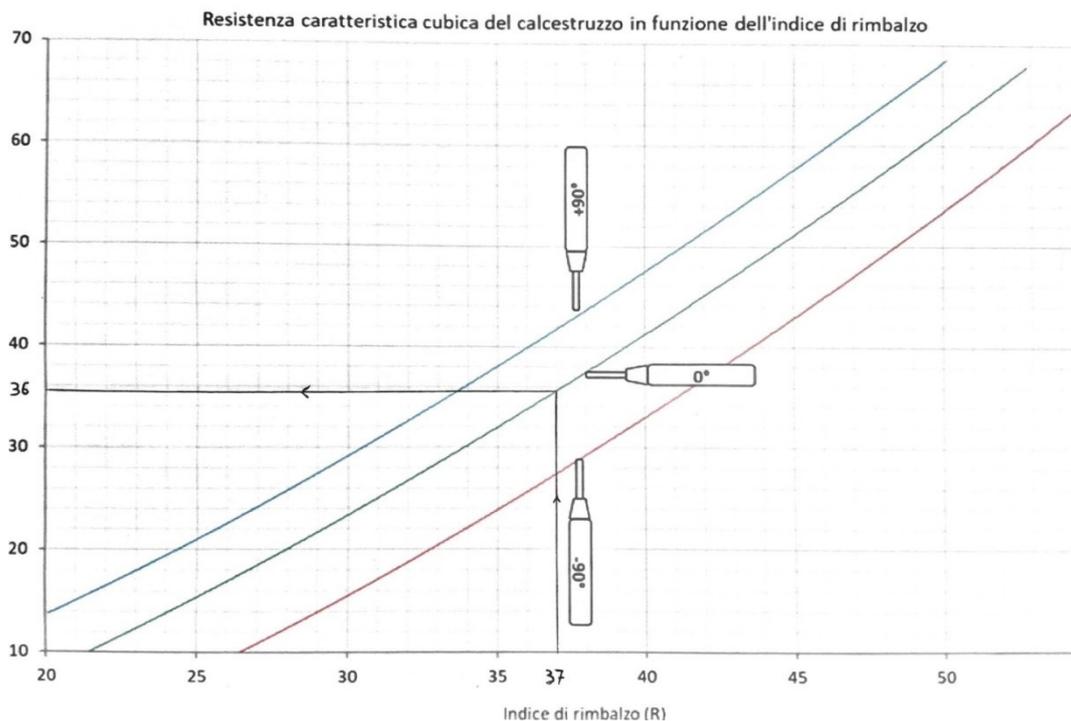


Figura 74: Curve di interpolazione indice di rimbalzo-resistenza caratteristica cls.

In seguito si può leggere la tabella relativa al confronto tra la resistenza caratteristica ricavata dalla prova in situ e quella nota tramite il materiale fornitoci dal Comune di Torino.

N° elementi	Elemento strutturale	Piano	I _{medio} [°]	orientamento (°)	±1 MPa		R _{ck, capitolato} [MPa]	f _{ck, capitolato} [MPa]	f _{cm, capitolato} [MPa]	verifica [V]
					R _{cm, rilievo} [MPa]	f _{cm, rilievo} [MPa]				
1	P48	Piano interrato	34	0	30	25	25	21	29	FALSO
2	P49	Piano interrato	37	0	36	30	25	21	29	VERO
3	P50	Piano interrato	38	0	37	31	25	21	29	VERO
4	P51	Piano interrato	39	0	39	33	25	21	29	VERO
5	P52	Piano interrato	38	0	37	30	25	21	29	VERO
6	P53	Piano interrato	40	0	40	33	25	21	29	VERO
7	P54	Piano interrato	36	0	33	27	25	21	29	FALSO
8	P55	Piano interrato	39	0	39	33	25	21	29	VERO
9	P1	Piano interrato	40	0	41	34	25	21	29	VERO
10	P2	Piano interrato	39	0	39	33	25	21	29	VERO
11	P56	Piano interrato	37	0	36	30	25	21	29	VERO
12	P57	Piano interrato	38	0	38	32	25	21	29	VERO
13	P7	Piano interrato	35	0	33	27	25	21	29	FALSO
14	P58	Piano interrato	36	0	35	29	25	21	29	VERO
15	P59	Piano interrato	39	0	39	33	25	21	29	VERO
16	P60	Piano interrato	38	0	37	31	25	21	29	VERO
17	P61	Piano interrato	36	0	33	28	25	21	29	VERO
18	P62	Piano interrato	36	0	33	28	25	21	29	VERO
19	P63	Piano interrato	37	0	35	29	25	21	29	VERO
20	P6	Piano interrato	32	0	27	23	25	21	29	FALSO

totale elementi verificati
80%

verifica soddisfatta se $f_{cm, rilievo} \geq 28 \text{ Mpa}$

LEGENDA
GRANDEZZA VERIFICATA
GRANDEZZA VERIFICATA A FAVORE DI SICUREZZA
GRANDEZZA NON VERIFICATA

Figura 75: Confronto resistenza calcestruzzo in situ e teorica.

Come si può capire dall'immagine, l'80% degli elementi presenta una resistenza effettiva che è almeno 28 MPa contro i 29 MPa definiti nel capitolato d'appalto: si è imposta una tolleranza di 1 MPa. Oltre ai 4 pilastri con resistenza inferiore ai 28 MPa ce ne sono 12 aventi una f_{cm} maggiore rispetto a quella teorica e altri 4 con il medesimo valore.

5.4.Piano delle indagini

Si prevede la necessità di eseguire le seguenti indagini, allo scopo di validare le informazioni acquisite dalla documentazione di supporto e dai rilievi visivi effettuati:

- Rilievo della gabbia d'armatura tramite prova pacometrica.

<u>PROVA PACOMETRICA</u>	
Percentuale di elementi da indagare	15%
N° pilastri esistenti	112
N° minimo pilastri da rilevare	17
N° pilastri analizzati	33
Percentuale effettiva	29,4%

La posizione degli elementi analizzati è presente nella tavola in allegato.

- Stima della resistenza del calcestruzzo tramite prova sclerometrica.

<u>PROVA SCLEROMETRICA</u>	
Percentuale di elementi da indagare	15%
N° pilastri esistenti	112
N° minimo pilastri da rilevati	17
N° pilastri analizzati	20
Percentuale effettiva	18%

La posizione degli elementi strutturali analizzati nella planimetria è definita nell'allegato.

6. Interoperabilità tra i software

6.1 Scelta del software di calcolo

Preventivamente alla scelta del software di calcolo è stata compiuta una ricerca sullo stato dell'arte dei programmi commerciali più BIM compatibili, la maggior parte dei quali dialoga con Revit tramite il formato IFC.

Uno di questi è il software Edilus della casa ACCA o Travilog della Logical Soft: in entrambi i casi, una volta esportato il file IFC, venivano perse le informazioni relative al materiale impiegato e veniva mantenuta la sola geometria pertanto sono stati scartati.

Si è indagato quindi lo scambio di dati con SAP2000 della software house californiana CSI: questo solutore agli elementi finiti è uno tra i più affermati tra i professionisti italiani per via della sua estrema versatilità e potenza di calcolo. Lo scambio dei dati anche in questo caso è affidata al formato IFC. Nonostante alcuni test preliminari condotti avessero dato buon esito si è optato per un software con una base di interoperabilità che fosse la più alta possibile: la scelta è ricaduta quindi su Robot Structural Analysis, il programma strutturale della Autodesk.

Tale software è impiegato dagli studi di tutto il mondo in quanto sono implementate le normative dei principali paesi e consente di effettuare dall'analisi statica lineare fino a quella sismica non lineare.

Il collegamento con l'ambiente Revit è affidato ad un collegamento interno bidirezionale che ne aumenta la velocità di scambio e l'efficacia. Infatti non dobbiamo salvare o esportare il file in un formato di scambio interno e si può aggiornare il modello Revit con le modifiche ricavate da Robot.

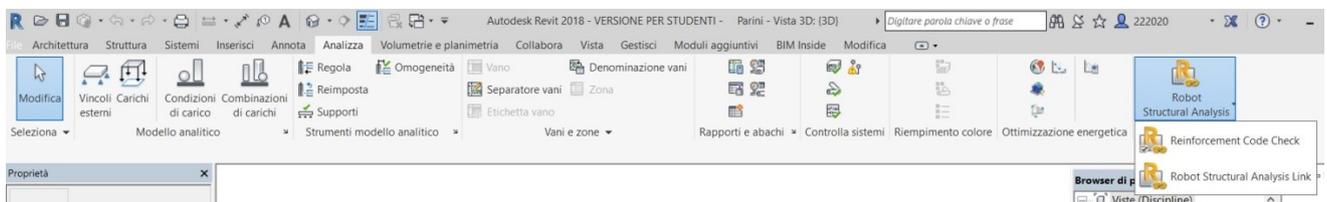


Figura 124: Plug-in Revit-Robot.

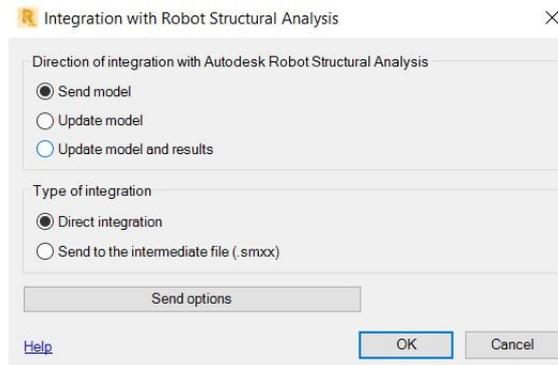


Figura 125: Possibilità di esportazione Revit-Robot.

Come si può leggere nell'immagine di sopra, selezionando il comando *Robot Structural Analysis Link*, possiamo scegliere se inviare il modello analitico a Robot, aggiornare il modello Revit con quello di Robot o infine se aggiornare il modello Revit con anche i risultati ricavati dal software di calcolo.

Alla spunta *send option*, come si può osservare nella figura seguente, possiamo definire la condizione di carico che contiene il peso proprio degli elementi strutturali: di default viene inserito nella DL1. Qualora volessimo inserire il peso proprio in Robot attraverso dei carichi possiamo spuntare l'ipotesi *Ignore self-weight*.

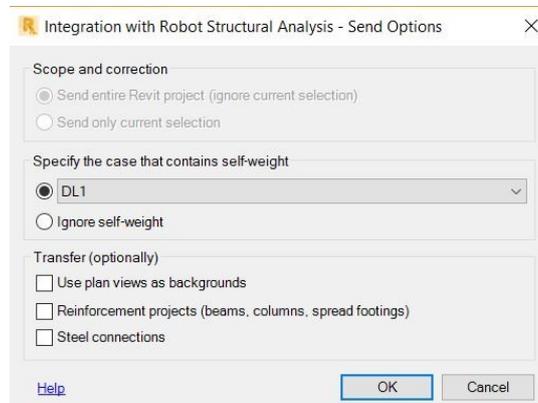


Figura 126: Impostazioni di trasferimento Revit-Robot.

Revit consente inoltre, con le tre voci da spuntare, di trasferire:

- le viste in pianta del progetto come piano di lavoro.
- Le armature.
- Le connessioni strutturali in acciaio.

Per quel che riguarda le armature, si è preferito modellarle direttamente nel software di calcolo in quanto ne consente un inserimento più intuitivo e dettagliato rispetto a quello consentito in Revit:

mi appresterò a descriverne i passaggi nel prossimo capitolo. Allego infine una tabella riassuntiva con le famiglie di elementi e le informazioni esportate.

Elemento esportato	Check
Livelli	✓
Griglie	✓
Materiali	✓
Muri strutturali	✓
Pilastri strutturali	✓
Pavimenti strutturali	✓
Plinti	✓
Cordoli di fondazione	✓
Aperture	✓
Condizioni di carico	✓
Combinazione dei carichi	✓
Carichi	✓
Direzione orditura solaio	✓
Elastic link	✓
Sistemi di travi	✓
Tetti	✗
Scale	✗
Pignatte	✗

Figura 127: Famiglie esportate da Revit a Robot.

Un particolare che ritengo degno di nota è quello relativo alle fondazioni: nel mio caso i plinti e i cordoli al di sotto del muro contro terra. A questi, in Revit, vengono assegnati geometria, materiale ecc. ma in Robot vengono esportati solo come vincoli: incastro nel primo caso e incastro continuo nel secondo. Ciò ha come conseguenza il fatto di trascurare il peso proprio dei suddetti elementi.

Per quel che riguarda invece scale e tetto, la perdita nell'esportazione è dovuta al fatto che, non venendo considerati strutturali, non viene attivato il modello analitico.

6.2 Individuazione punti di attenzione per l'esportazione

Si è focalizzata l'attenzione su alcune criticità nella modellazione architettonica e la loro gestione nell'esportazione in Robot.

Per comprendere in che modo i due software governano tali problematiche si sono analizzate strutture elementari in cui è stato più facile comprenderne a fondo il comportamento.

I risultati così ottenuti sono stati poi implementati sulla struttura completa.

Nello specifico si sono indagati i problemi riguardanti:

- Eccentricità trave-pilastro.
- Sovrapposizione trave-solaio
- Ripartizione dei carichi tra tamponatura e telaio.

6.2.1 Eccentricità trave-pilastro.

Con tale tematica si intendono tutti quei casi in cui si intersecano elementi strutturali monodimensionali come travi e pilastri con sezioni differenti e/o eccentricità tra i due elementi. Si consideri il seguente esempio di telaio spaziale: tre travi, segnate in arancione, con eccentricità rispetto ai pilastri che le sostengono e le due colonne evidenziate in rosso scostate l'una rispetto all'altra.

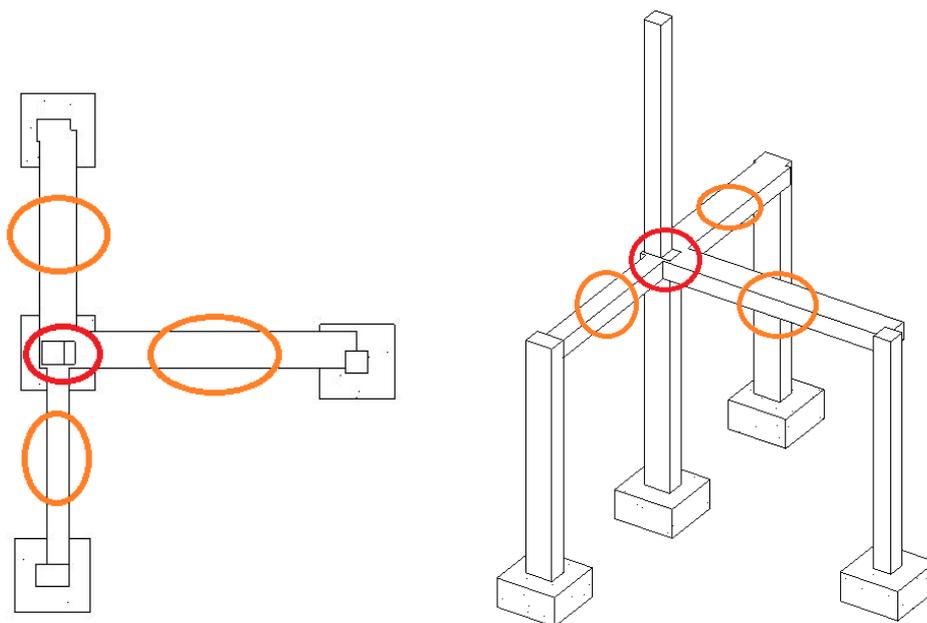


Figura 128: Telaio spaziale con eccentricità.

La relativa restituzione analitica delle travi segnate in arancione è inclinata rispetto al reale asse rettilineo e i due pilastri segnati in rosso sono scostati provocando così una struttura disgiunta.

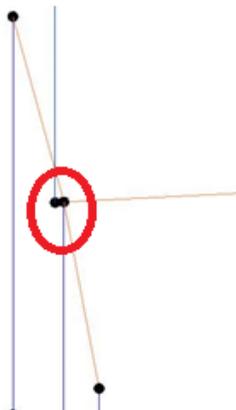


Figura 129: Restituzione analitica in Revit.

6.2.1.1. Soluzione impiegata

Per la gestione di tale problematica si è impiegata la possibilità di inserire, come descritto al capitolo 4, il collegamento analitico.

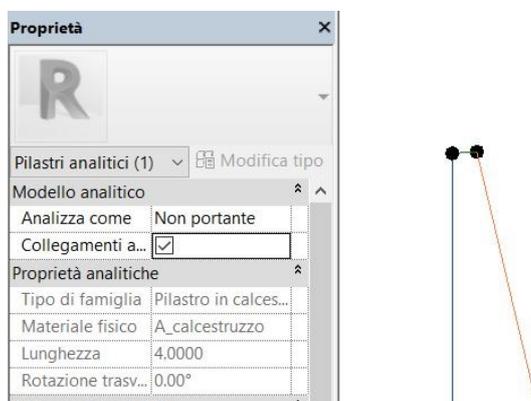


Figura 130: Impiego collegamento analitico.

Per la sua applicazione è sufficiente spuntare la casella alla voce Collegamenti analitici che compare selezionando il pilastro. La stessa operazione è stata compiuta per le travi.

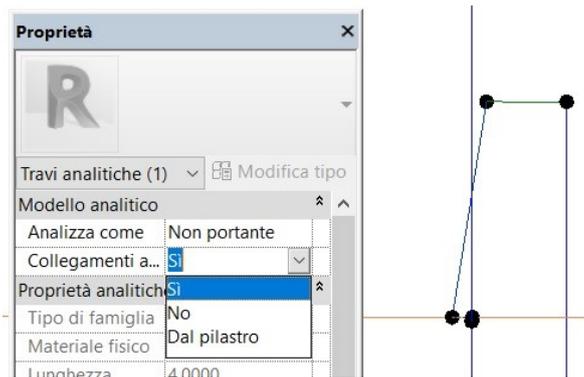


Figura 131: Collegamento analitico trave.

Ciò che si vuole ottenere è fare in modo che l'elastic link costituisca un elemento infinitamente rigido in grado di bloccare le traslazioni e le rotazioni nelle tre dimensioni, di modo che il momento negativo all'incastro del traverso sia ribaltato all'inizio del pilastro. Per raggiungere tale obiettivo di possono impostare i parametri dell'elastic link in modo da fissare i sei gradi di libertà.

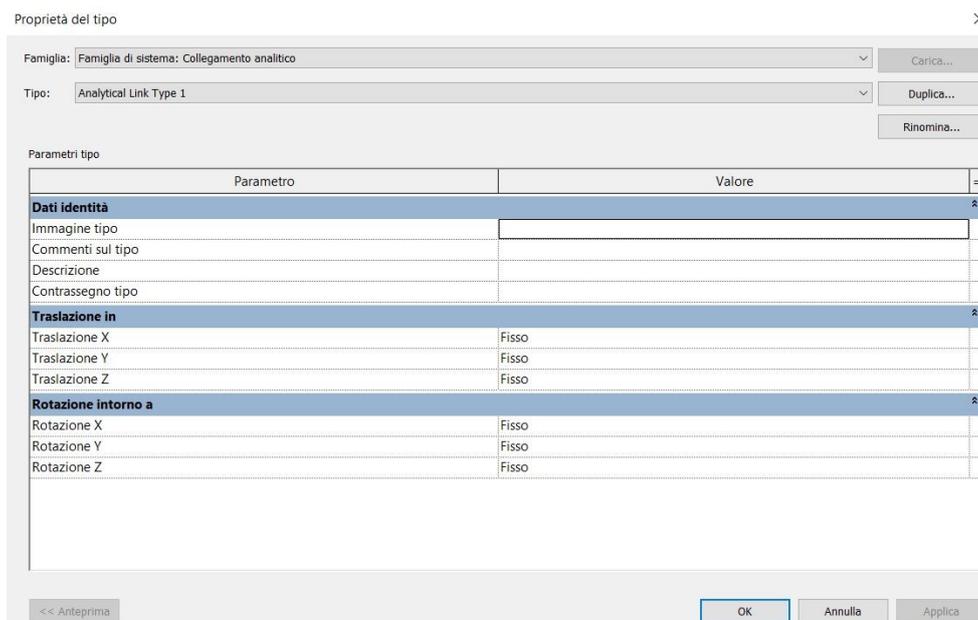


Figura 132: Impostazione gradi di libertà elastic link.

6.2.1.2. Soluzione alternativa

Una possibilità alternativa è quella di allineare il riferimento analitico della trave rispetto ad una faccia dell'elemento strutturale: questa possibilità però è efficace soltanto nei casi in cui l'eccentricità del pilastro sia coincidente ad un suo lato.

Si prenda per esempio il caso seguente: pilastro inserito in una tamponatura con trave in corrispondenza dello stesso.

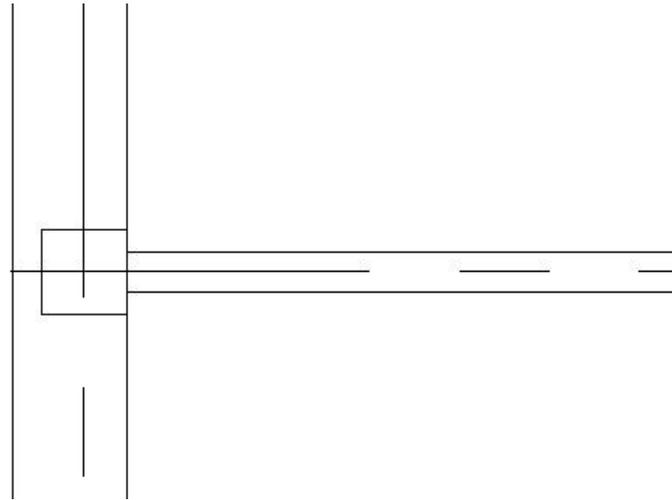
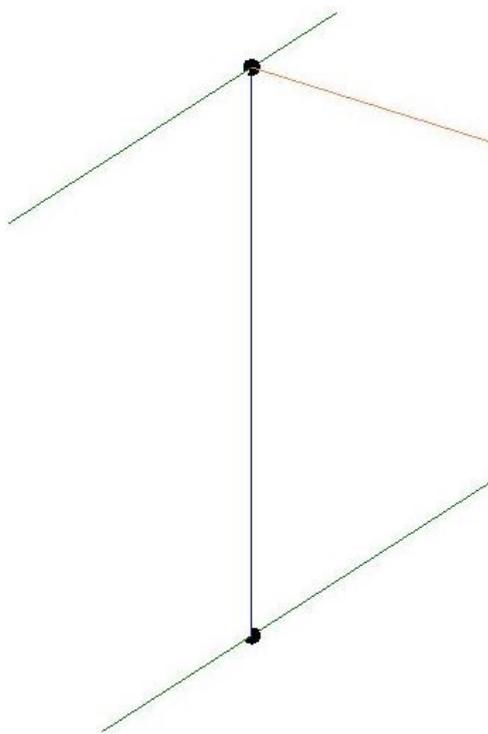


Figura 133: Vista 3D pilastro-muro eccentrici.

Siccome vi è un' eccentricità tra pilastro e muro è necessario impostare per entrambi che il riferimento analitico sia sul lato interno dell'elemento: in questo modo si ottiene il risultato visibile nella prossima immagine in cui l'asse del pilastro e quello del muro non sono scostati.



Allineamento analitico	
Metodo di allineamento - In alto	Proiezione
Proiezione Y - Superiore	Lato destro dell'elemento
Proiezione Z - Superiore	Linea di ubicazione
Metodo di estensione - In alto	Rilevamento automatico
Proiezione X - Parte superiore	Riferimento livello superiore
Metodo di allineamento - Base	Proiezione
Proiezione Y - Base	Lato destro dell'elemento
Proiezione Z - Base	Linea di ubicazione
Metodo di estensione - Base	Rilevamento automatico
Proiezione X - Base	Livello : Livello 1

Figura 134: Posizionamento analitico elementi strutturali.

6.2.1.3. *Analisi in Robot Structural Analysis*

Attraverso il collegamento interno in Revit si è provveduto all'exportazione in Robot della struttura. Siccome l'elastic link viene trasferito nel software di calcolo non è necessario reimpostarne la geometria in Robot.

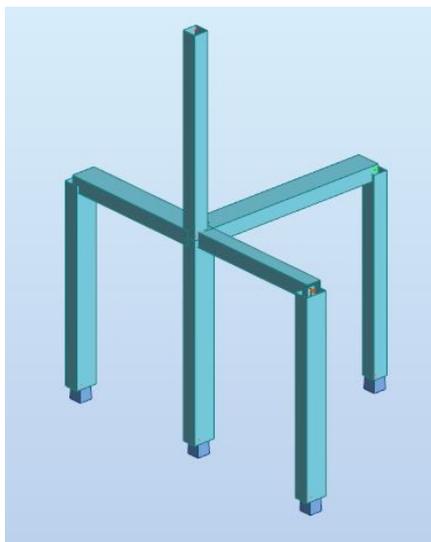


Figura 135: Vista 3D della struttura in Robot.

In seguito si è eseguita l'analisi statica lineare per il peso proprio degli elementi trave e pilastro. Nella prossima immagine si può osservare il momento flettente massimo e minimo ottenuto sulla struttura e quello di un particolare del nodo trave-colonna in cui il momento di -2.49 KNm si ribalta perfettamente per via dell'elastic link.

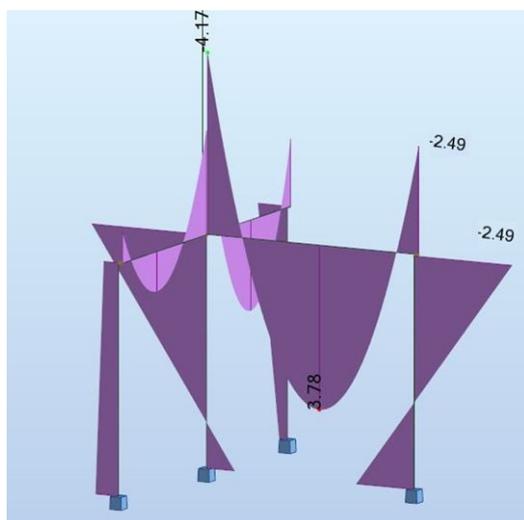
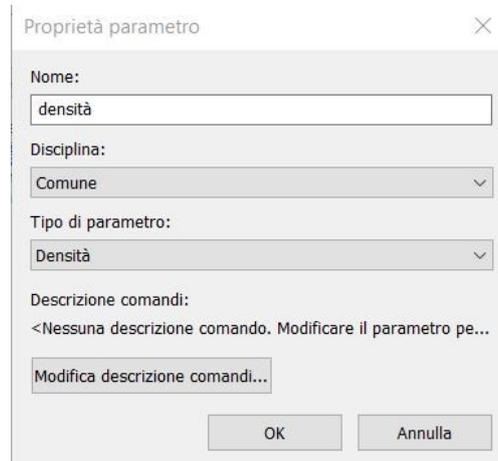


Figura 136: Diagramma momento flettente dovuto al solo peso proprio.

6.2.1.4. Verifica peso proprio struttura

Nel seguito verrà descritto il percorso automatizzato per il calcolo del peso degli elementi strutturali che è stato poi utilizzato per l'intera struttura. Si è creato innanzitutto un parametro condiviso *densità* di tipo massa per unità di volume.

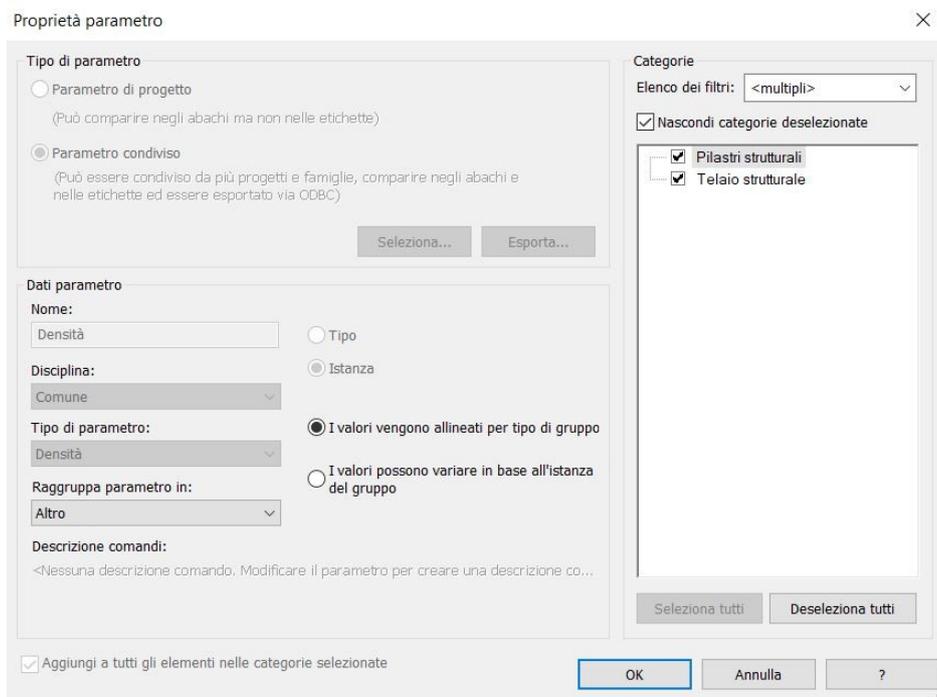


The screenshot shows a dialog box titled "Proprietà parametro" with a close button (X) in the top right corner. The dialog contains the following fields and options:

- Nome:** A text input field containing "densità".
- Disciplina:** A dropdown menu with "Comune" selected.
- Tipo di parametro:** A dropdown menu with "Densità" selected.
- Descrizione comandi:** A text area containing "<Nessuna descrizione comando. Modificare il parametro pe...". Below it is a button labeled "Modifica descrizione comandi...".
- At the bottom, there are two buttons: "OK" and "Annulla".

Figura 137: Creazione parametro condiviso densità.

Poi è stato importato come parametro di progetto di tipo istanza ed è stato applicato agli elementi trave e pilastro.



The screenshot shows a dialog box titled "Proprietà parametro" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into several sections:

- Tipo di parametro:** Two radio buttons: "Parametro di progetto" (unselected) and "Parametro condiviso" (selected). Below "Parametro di progetto" is the text "(Può comparire negli abachi ma non nelle etichette)". Below "Parametro condiviso" is the text "(Può essere condiviso da più progetti e famiglie, comparire negli abachi e nelle etichette ed essere esportato via ODBC)". There are two buttons: "Seleziona..." and "Esporta...".
- Dati parametro:** A section with the following fields:
 - Nome:** Text input field containing "Densità".
 - Disciplina:** Dropdown menu with "Comune" selected.
 - Tipo di parametro:** Dropdown menu with "Densità" selected.
 - Raggruppa parametro in:** Dropdown menu with "Altro" selected.
 - Descrizione comandi:** Text area containing "<Nessuna descrizione comando. Modificare il parametro per creare una descrizione co...".
- Categorie:** A section with a dropdown menu "Elenco dei filtri:" set to "<multipli>". Below it is a checkbox "Nascondi categorie deselezionate" which is checked. A list box contains two items: "Pilastri strutturali" (checked) and "Telaio strutturale" (checked). At the bottom of the list box are two buttons: "Seleziona tutti" and "Deseleziona tutti".
- At the bottom left, there is a checkbox "Aggiungi a tutti gli elementi nelle categorie selezionate" which is checked.
- At the bottom right, there are three buttons: "OK", "Annulla", and "?".

Figura 138: Creazione parametro di progetto densità.

Si è poi proceduto alla creazione degli abachi di interesse: peso proprio travi e pilastri.

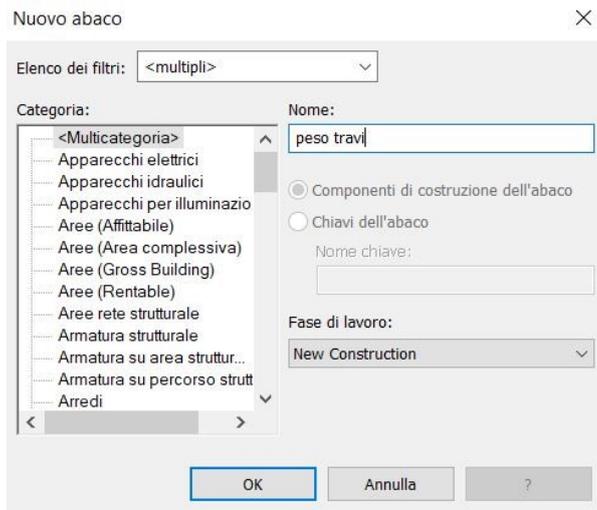


Figura 139: Creazione abaco peso travi.

Si sono definiti i campi a partire dalla categoria a cui appartiene l'elemento, nel nostro caso telaio strutturale e pilastri strutturali.

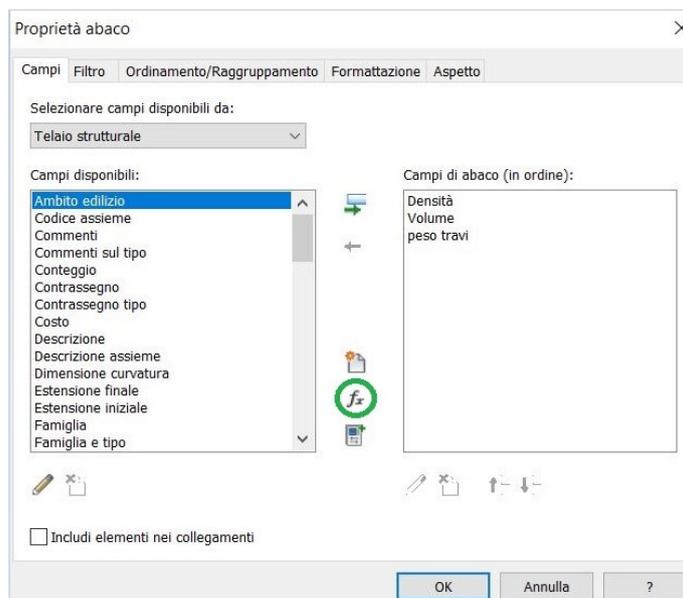


Figura 140: Definizione dei campi dell'abaco.

Il parametro peso travi è stato definito attraverso il comando funzione cerchiato in verde nella precedente figura. Questa possibilità è studiata apposta per effettuare semplici calcoli tra i parametri impiegati:

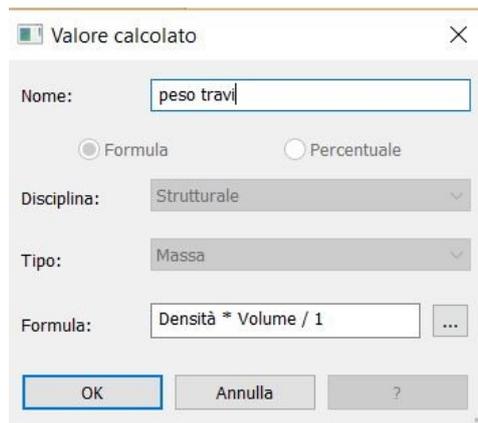


Figura 141: Parametro definito con funzione.

Il fattore 1 è stato inserito per risolvere il problema delle unità di misura. Infine è stato necessario settare altre due impostazioni nell'abaco per fare in modo che fosse effettuata la somma dei pesi propri di ogni elemento per ricavare automaticamente quello complessivo. In particolare alla voce formattazione si imposta di calcolare i totali relativi ad un parametro e in ordinamento e raggruppamento si imposta *solo totali*.

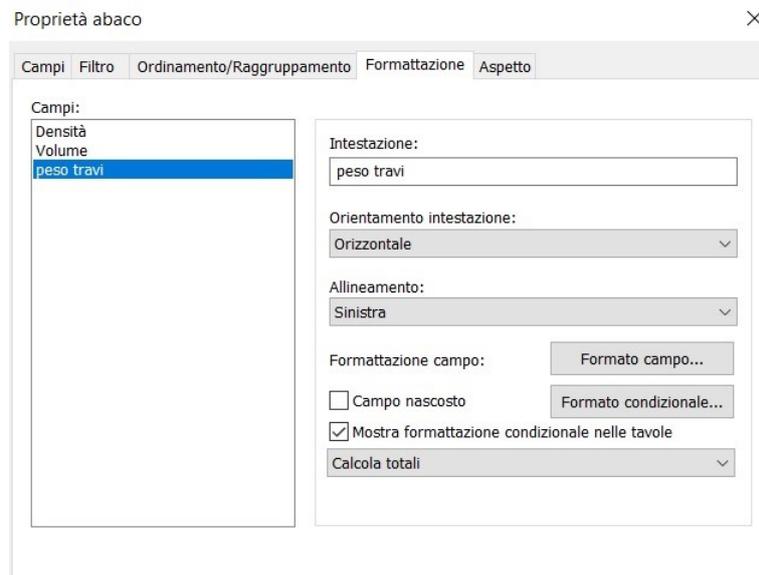


Figura 142: Impostazione calcola totali per un parametro.

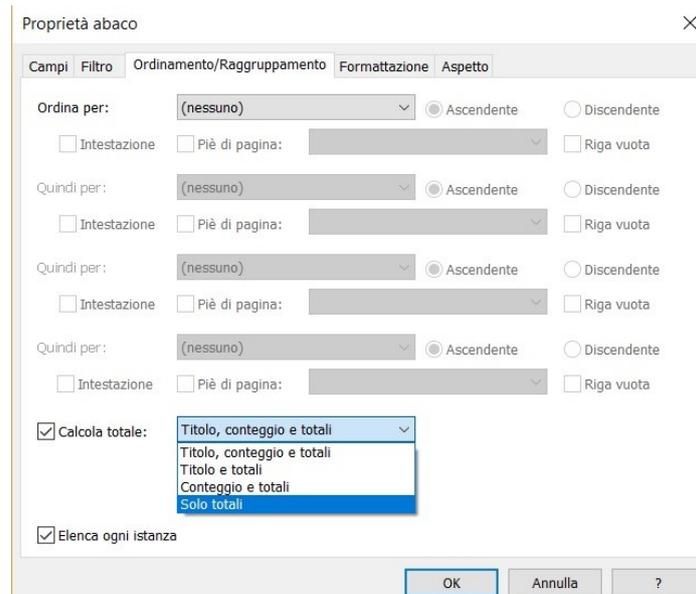


Figura 143: Ordinamento/raggruppamento solo totali.

Il risultato finale nell'abaco è il seguente:

<peso travi>		
A	B	C
Densità	Volume	peso travi
2500.00 kg/m³	0.23 m³	585.00 kg
2500.00 kg/m³	0.43 m³	1066.88 kg
2500.00 kg/m³	0.55 m³	1372.50 kg
		3024.38 kg

Figura 144: Abaco peso travi.

Gli stessi step sono stati effettuati per il calcolo complessivo del peso dei pilastri.

<peso pilastri>		
A	B	C
Densità	Volume	peso pilastri
2500.00 kg/m³	0.54 m³	1350.00 kg
2500.00 kg/m³	0.54 m³	1350.00 kg
2500.00 kg/m³	0.54 m³	1350.00 kg
2500.00 kg/m³	0.36 m³	900.00 kg
2500.00 kg/m³	0.36 m³	900.00 kg
		5850.00 kg

Figura 145: Abaco peso pilastri.

Il peso complessivo tramite Robot è stato ricavato come somma delle reazioni vincolari dovute al solo peso proprio.

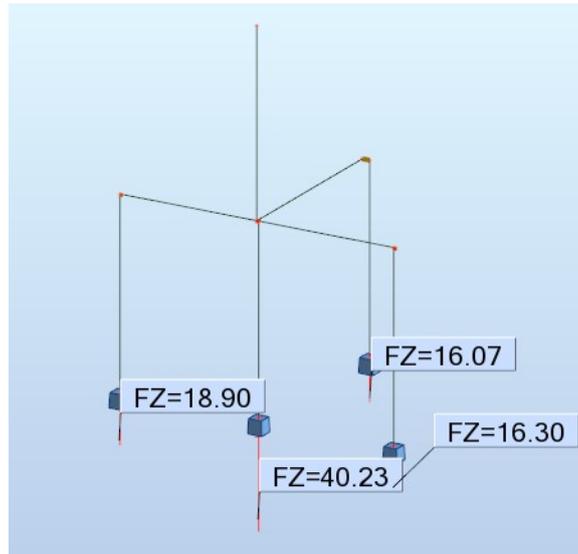


Figura 146: Reazioni vincolari sulla struttura.

DIFFERENZA PERCENTUALE PESO PROPRIO STRUTTURA [%]			
Caso	Peso struttura [KN]	Differenza peso struttura[KNm]	Differenza peso struttura[%]
Revit	88.74	2.76	3.11
Robot	91.50		

Figura 147: Differenza calcolo peso proprio Revit-Robot.

Come si può osservare nella precedente immagine Robot calcola il peso proprio della struttura con errore percentuale del 3.11%.

6.2.1.5. verifica del momento flettente

Prima di analizzare la differenza tra il caso con e senza eccentricità si è voluto indagare la bontà in termini assoluti del momento flettente ottenuto da Robot. A tal fine si è osservata la differenza tra il momento flettente restituito da Robot rispetto alla stessa sollecitazione calcolata analiticamente attraverso le formule da letteratura. In particolare, si è preso in considerazione uno dei tre portali che compongono la figura nella configurazione senza eccentricità per maggior verosimiglianza con il portale delle formule note in letteratura.

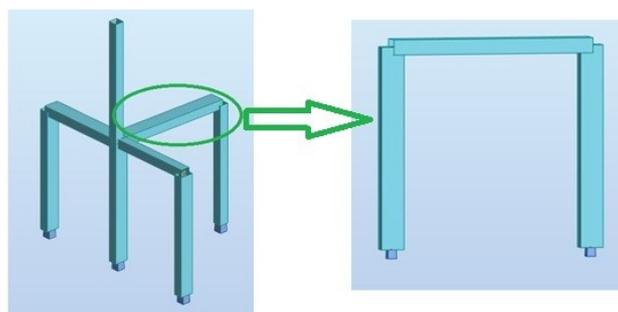


Figura 148: Telaio in cui si è verificato il momento flettente.

A tal fine si è proceduto nel seguente modo:

- Si è calcolato il carico lineare, KN/m, relativo al traverso come: $q = A_{sez} \cdot \gamma_{cls}$.
- Si è applicato il carico così ottenuto al traverso del portale.
- Si sono calcolate le sollecitazioni in mezzeria e agli incastri con le seguenti formule.

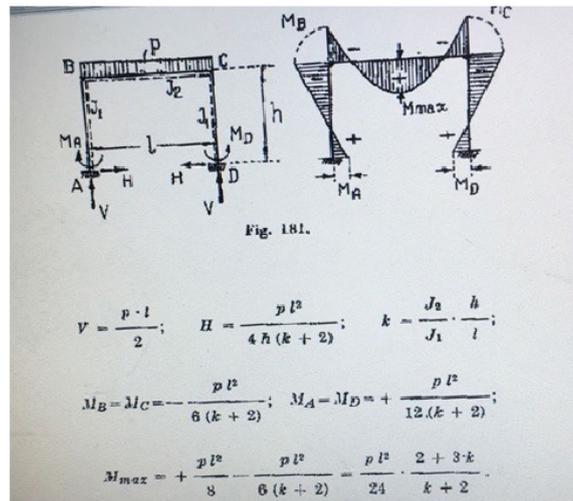


Figura 149: Formulario sollecitazioni.

Nel nostro caso $q = 3.54 \text{ KN/m}$, $k = 1$.

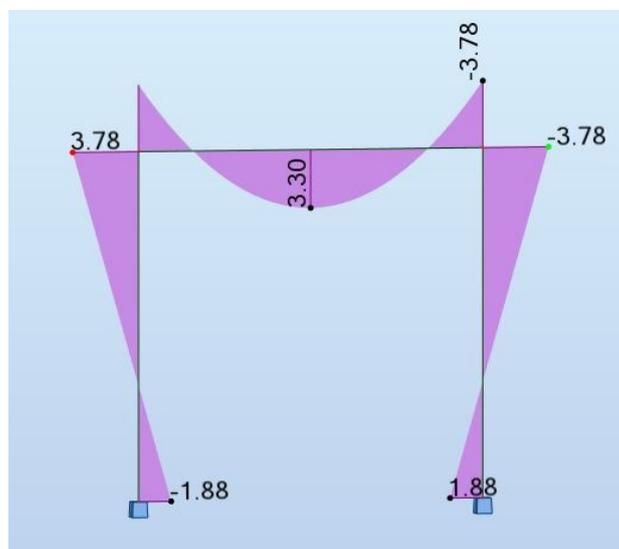


Figura 150: Vista momento flettente portale tramite Robot.

Allego in seguito una tabella per il confronto tra i valori di momento restituiti da Robot e quelli calcolati analiticamente.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso	M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [%]
Analitico	3.18	0.12	3.64
Robot_no_ecc	3.3		

Figura 151: Differenza calcolo analitico e tramite Robot del momento in campata.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO INCASTRO [%]			
Caso	M _{pilastro} [KNm]	Differenza M _{pilastro} [KNm]	Differenza M _{pilastro} [%]
Analitico	-3.66	0.12	3.17
Robot_no_ecc	-3.78		

Figura 152: Differenza calcolo analitico e tramite Robot del momento all'incastro.

La differenza tra il calcolo analitico e quello tramite Robot è estremamente ridotta pertanto si può affermare che Robot è uno strumento assai preciso per il calcolo delle sollecitazioni. Si è proceduto alla verifica del valore del momento flettente applicando sul traverso il carico lineare effettivamente utilizzato nel calcolo analitico, quel 3.54 KN/m di cui sopra. Per far ciò è stato sufficiente, in fase di esportazione da Revit, spuntare la possibilità *Ignore-self weight* come si può osservare nella seguente immagine.

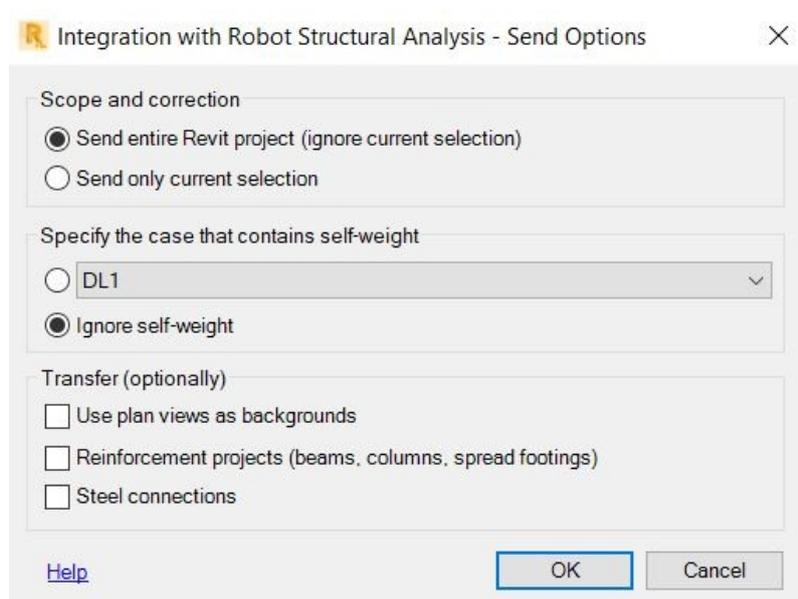


Figura 153: Impostazione ignore self-weight esportazione Revit-Robot.

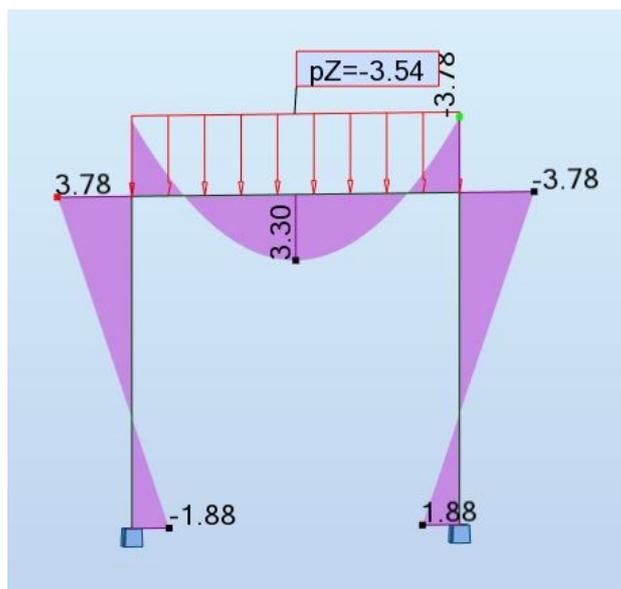


Figura 154: Momento flettente con peso proprio aggiunto come carico.

Il risultato è esattamente uguale a quello ottenuto utilizzando come peso proprio quello direttamente ricavato dalla geometria di Revit. In conclusione quindi si può affermare che il carico del peso proprio a partire dalla geometria dell'elemento strutturale è molto preciso, uguale a quello che si ottiene con l'analisi dei carichi manuale.

6.2.1.6. struttura senza eccentricità

Per valutare l'influenza dell'eccentricità si è analizzata la stessa struttura annullando le eccentricità. Allego in seguito la visualizzazione in Revit e i risultati restituiti da Robot.

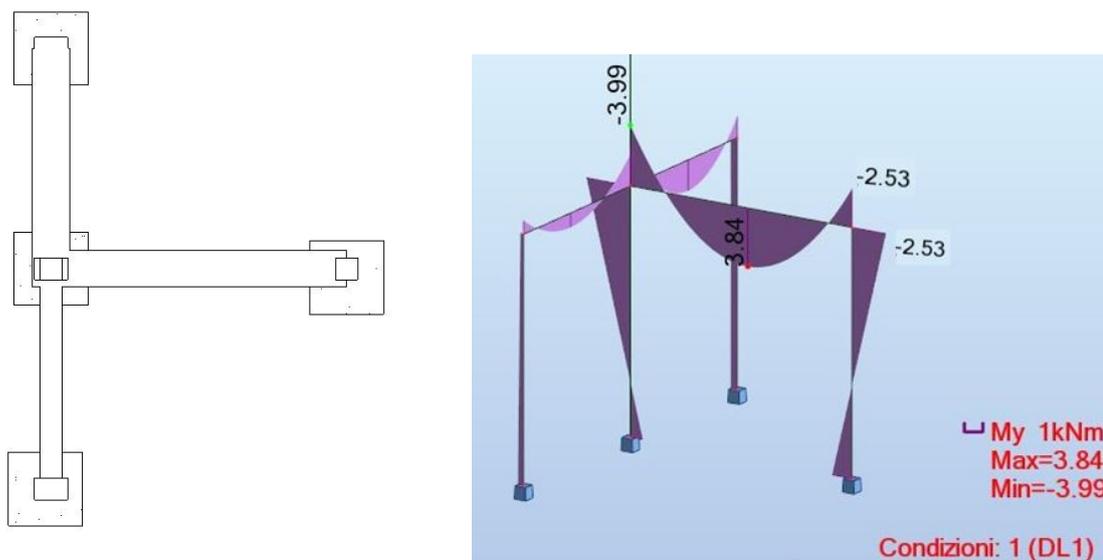


Figura 155: Modello senza eccentricità: vista in Revit e momento flettente dovuto al peso proprio in Robot.

Come si può osservare nella precedente immagine, si registra un aumento della sollecitazione dovuta alla mancata considerazione del momento flettente.

Allego infine la tabella riassuntiva delle diverse configurazioni.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO INCASTRO [%]			
Caso	M_{pilastro} [KNm]	Differenza M_{pilastro} [KNm]	Differenza M_{pilastro} [%]
Con eccentricità	-2.49	0.04	1.58
Senza eccentricità	-2.53		

Figura 156: Differenza percentuale momento all'estremo finale del pilastro.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso	M_{campata} [KNm]	Differenza M_{campata} [KNm]	Differenza M_{campata} [%]
Con eccentricità	3.78	0.06	1.56
Senza eccentricità	3.84		

Figura 157: Differenza percentuale momento massimo in campata trave.

La differenza percentuale media tra i due casi è dell'1.57%: nonostante non sia un valore apparentemente molto grande, essendo il nostro obiettivo la verifica di alcuni elementi strutturali, è importante tenere in conto anche di questi dettagli.

6.2.2. Sovrapposizione trave-solaio

La seconda problematica che si è approfondita è quella relativa alla sovrapposizione tra il solaio e la travi nella fase di modellazione. In una struttura reale il solaio poggia sulle travi a partire dalla linea esterna delle stesse, questa configurazione però in Revit, siccome le travi vengono analizzate come un'asta analitica, porta ad avere un solaio sospeso nel vuoto. Infatti nella restituzione di Revit per il calcolo non viene visualizzato l'ingombro della trave le cui dimensioni della sezione sono esportate insieme alle altre informazioni.

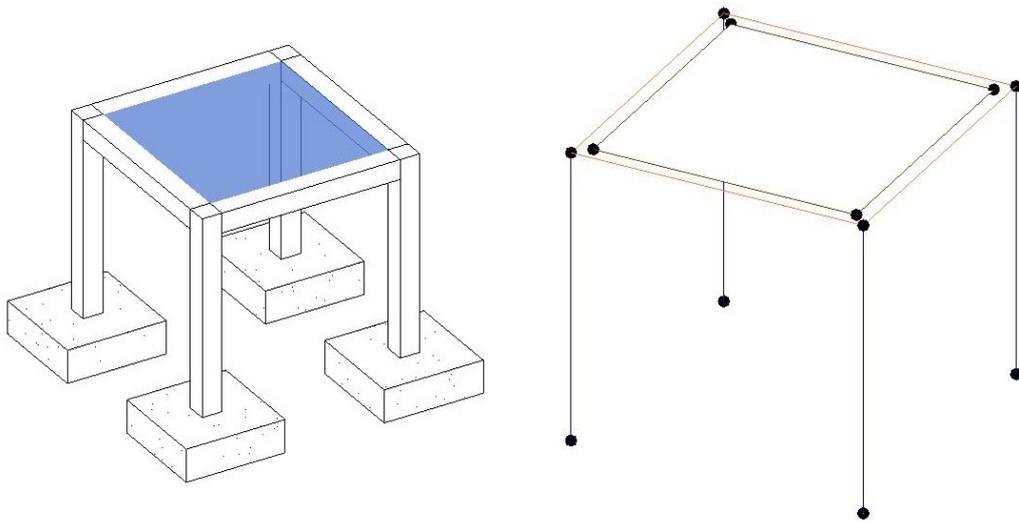


Figura 158: Modellazione solaio a partire dal filo esterno delle travi e relativa restituzione analitica.

Si è pensato, in una prima fase, di collegare i nodi degli estremi del solaio con quelli dei pilastri attraverso degli elastic link ma Robot restituiva poi un errore per segnalare che nessun elemento trasmette la sovrapposizione del carico del solaio alle travi.

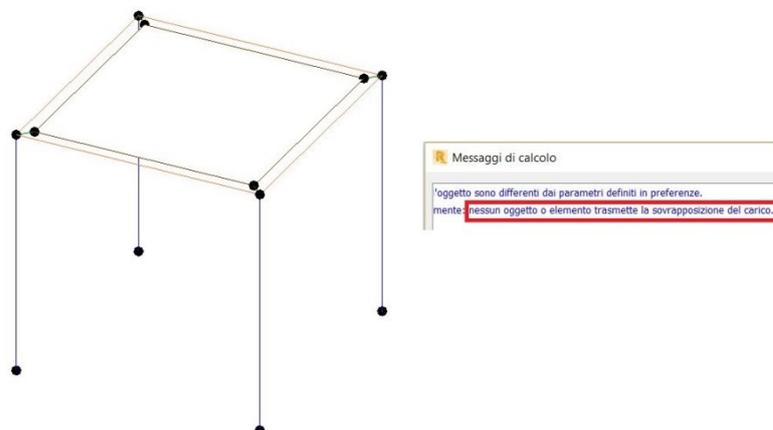


Figura 159: Tentativo 1, inserimento elastic link con relativo errore di Robot.

Si è poi ipotizzato di creare un solaio fittizio con peso specifico nullo a partire dalla linea media delle travi per poi applicare un carico per unità di superficie solo nell'area effettivamente occupata dal solaio.

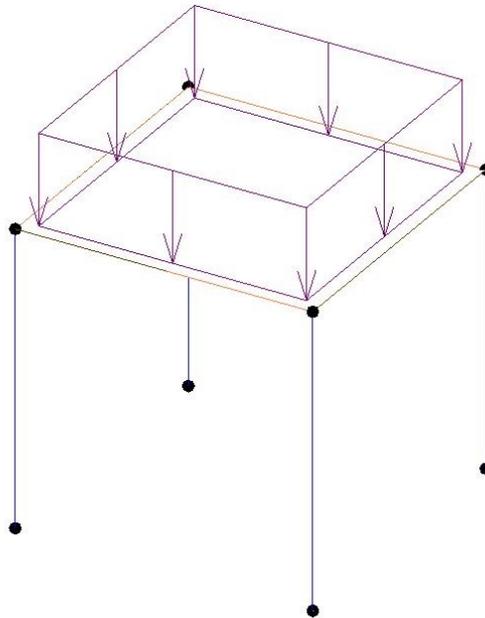


Figura 160: Tentativo 2, solaio fittizio con peso specifico nullo e applicazione del carico del solaio sulla sua effettiva area.

Questa soluzione non è in linea però con l'obiettivo della tesi: raggiungere il massimo livello di interoperabilità possibile tra Revit e Robot sfruttando al massimo le potenzialità offerte dal primo per la modellazione strutturale e minimizzare i passaggi necessari per compiere l'analisi nel secondo.

Pertanto si è scelta la seguente alternativa: modellare il solaio a partire dalla linea media delle travi per poi applicare un coefficiente di riduzione al peso volumico del solaio per tener conto della effettiva superficie inferiore.

6.2.2.1. definizione del peso specifico del solaio

I solai del blocco centrale hanno spessore pari a 26 cm con pignatta da 22 cm di altezza e getto di ricoprimento di 4 cm mentre quelli dei corpi adiacenti a quello interno pari a 20 cm di cui 16 di pignatta e 4 cm di colata in cls. Le presenza di rompi tratta è stata valutata caso per caso.

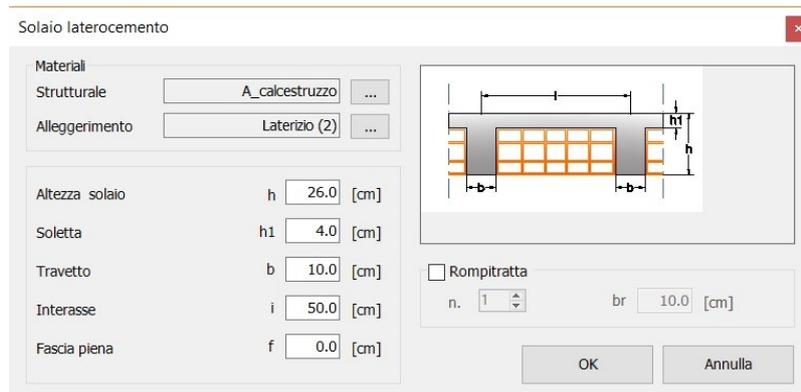


Figura 161: Tipologia 1 solaio, blocco centrale.

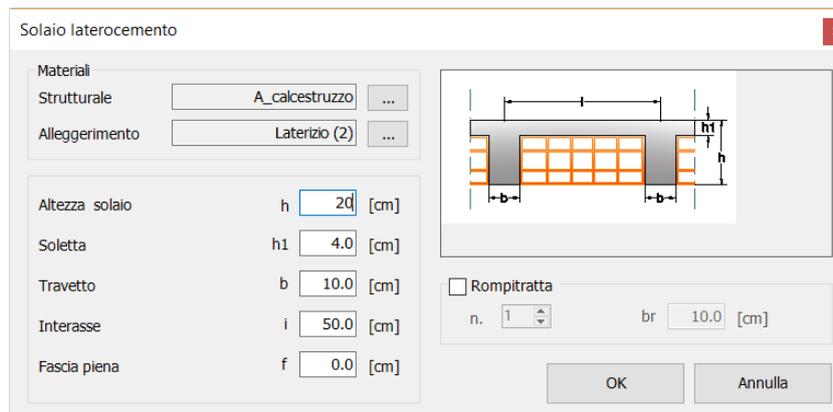


Figura 162: Tipologia 2 solaio, blocchi adiacenti a quello centrale.

Partendo quindi dal tipo di materiale impiegato, la geometria dei solai e la disposizione di travetti e pignatte si è calcolato il peso volumico dei solai.

I pesi specifici dei materiali sono stati definiti a partire dalle linee guida dell' NTC2008.

- Cemento armato: $\gamma = 25 \text{ KN}/\text{m}^3$.
- Laterizio forato: $\gamma = 7 \text{ KN}/\text{m}^3$.

Siccome l'interasse tra i due travetti è di 50 cm, in un metro ve ne saranno due, si è poi calcolata l'area del getto di ricoprimento. In questo modo si è definita l'area di sezione in cemento armato.

Per quel che riguarda le pignatte in una sezione da 1 m ve ne saranno due. Se ne è calcolata la sezione.

I valori così ottenuti per una sezione ortogonale ai travetti di solaio di 1 m sono:

- $A_{c.a.} = 2 \cdot (0.1\text{m} \cdot 0.22\text{m}) + 1\text{m} \cdot 0.04\text{m} = 0.084 \text{ m}^2$
- $A_{laterizio} = 2 \cdot (0.4\text{m} \cdot 0.22\text{m}) = 0.176 \text{ m}^2$

- $A_{tot} = A_{c.a.} + A_{laterizio} = 0.084 \text{ m}^2 + 0.176 \text{ m}^2 = 0.26 \text{ m}^2$

Si è poi calcolato il coefficiente per tener conto della percentuale di area dei due materiali rispetto a quella complessiva:

- $\alpha_{c.a.}: 100 = A_{c.a.}: A_{tot}$ da cui $\alpha_{c.a.} = 32.3\%$.
- $\alpha_{laterizio} = (100 - 32,3)\% = 67.7\%$.

Si è infine proceduto al calcolo del peso specifico pesato con i coefficienti α .

- $\gamma_{laterocemento_26cm} = \alpha_{c.a.} \cdot \gamma_{c.a.} + \alpha_{laterizio} \cdot \gamma_{laterizio} = 13 \text{ KN/m}^3$

Idem per il solaio da 20 cm.

- $A_{c.a.} = 2 \cdot (0.1 \text{ m} \cdot 0.16 \text{ m}) + 1 \text{ m} \cdot 0.04 \text{ m} = 0.072 \text{ m}^2$
- $A_{laterizio} = 2 \cdot (0.4 \text{ m} \cdot 0.16 \text{ m}) = 0.128 \text{ m}^2$
- $A_{tot} = A_{c.a.} + A_{laterizio} = 0.072 \text{ m}^2 + 0.128 \text{ m}^2 = 0.20 \text{ m}^2$

Si è poi calcolato il coefficiente per tener conto della percentuale di area dei due materiali rispetto a quella complessiva:

- $\alpha_{c.a.}: 100 = A_{c.a.}: A_{tot}$ da cui $\alpha_{c.a.} = 36\%$.
- $\alpha_{laterizio} = (100 - 36)\% = 64\%$.

Si è infine proceduto al calcolo del peso specifico pesato con i coefficienti α .

- $\gamma_{laterocemento_20cm} = \alpha_{c.a.} \cdot \gamma_{c.a.} + \alpha_{laterizio} \cdot \gamma_{laterizio} = 13.5 \text{ KN/m}^3$

6.2.2.2. Calcolo del peso volumico del solaio ridotto

Ricavato il peso specifico corretto del solaio in laterocemento ci si è poi concentrati sul suo fattore di riduzione dovuto ad un'area effettiva inferiore rispetto a quella definita a partire dalla linea media delle travi. Si è partiti indagando un telaio spaziale con travi entrambe di 3 m e solaio da 20 cm, per poi passare ad altri due casi con le travi secondarie con lunghezza costante di 3 m e le principali di 6 m e 9 m. Considerando un solaio di 20 cm di spessore, i risultati ottenuti sono i seguenti.

- **Caso 1: lunghezza travi 3 m, solaio 20 cm.**

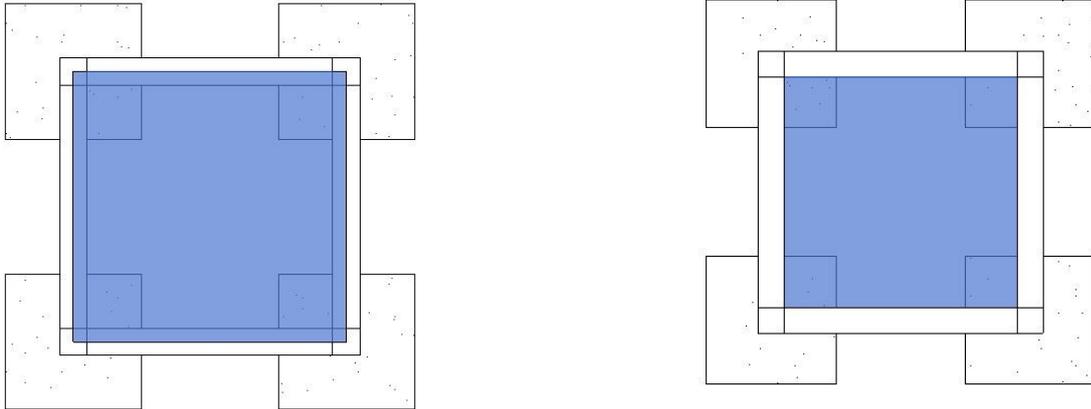


Figura 118: Solaio lungo linea media travi, $A=9\text{m}^2$ e solaio da bordo trave, $A=7.29\text{m}^2$.

Come si può osservare nelle due figure, con una sezione di trave da $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ l'area del solaio passa da 9 a 7.29 m^2 con una riduzione del 19%. Per quel che riguarda il volume, nel primo caso è pari a 1.8 m^3 mentre nel secondo di 1.46 m^3 : la percentuale di riduzione è la stessa.

Ci si è chiesti quindi quale dovrebbe essere il peso specifico del solaio modellato a partire dall'asse delle travi per avere lo stesso peso del caso 2.

La risposta è un orizzontamento avente peso volumico ridotto del 19%, quindi, 11 KN/m^3 .

Allego in seguito i diagrammi di momento flettente nei due casi.

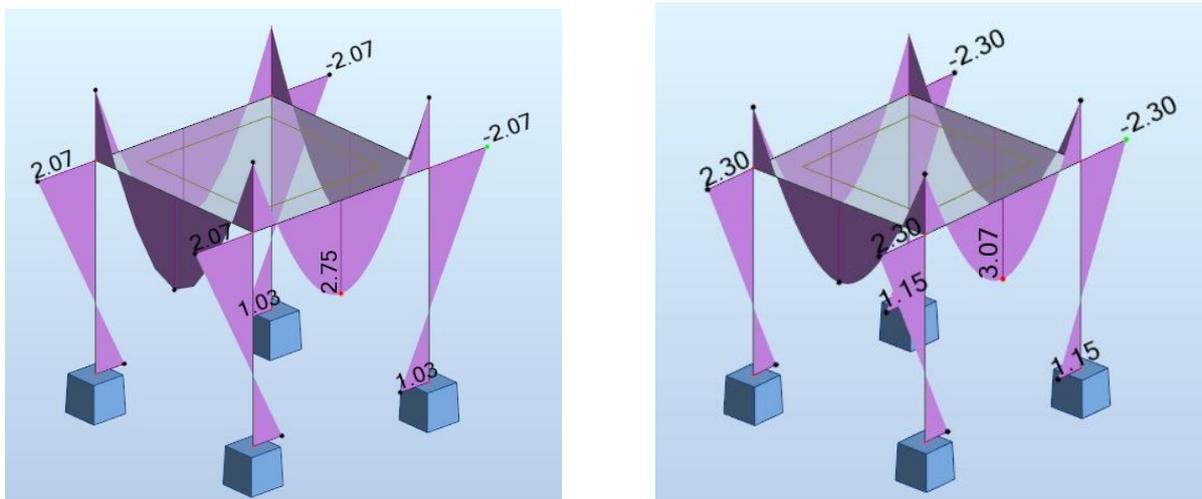


Figura 163: Caso 1, momento flettente solaio alleggerito e solaio non alleggerito.

Nel seguito si può osservare una tabella riassuntiva dei valori di differenza percentuale di momento in campata e all'incastro.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso1	M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [%]
peso proprio modificato	2.75	0.32	11.64
peso proprio non modificato	3.07		

Figura 164: Differenza momento massimo in campata.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO INCASTRO [%]			
Caso1	M _{pilastro} [KNm]	Differenza M _{pilastro} [KNm]	Differenza M _{pilastro} [%]
peso proprio modificato	-2.07	0.23	11.11
peso proprio non modificato	-2.3		

Figura 165: Differenza momento all'incastro.

Si registra una diminuzione del momento flettente medio dell'11.3%: tale risultato non è trascurabile al fine della verifica.

- **Caso 2: lunghezza travi secondarie 3 m, travi principali 6 m e solaio spesso 20 cm.**

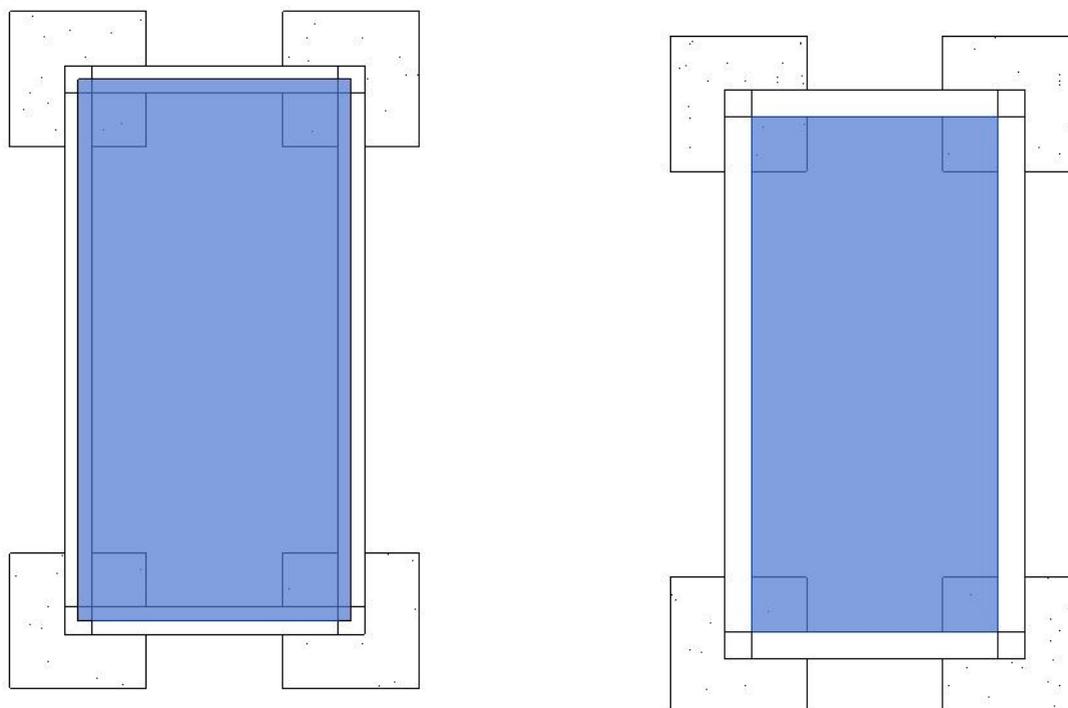


Figura 166: Solaio lungo linea media travi, A= 19 m² e solaio da bordo trave, A= 15.39m².

Allego in seguito i diagrammi di momento flettente nei due casi.

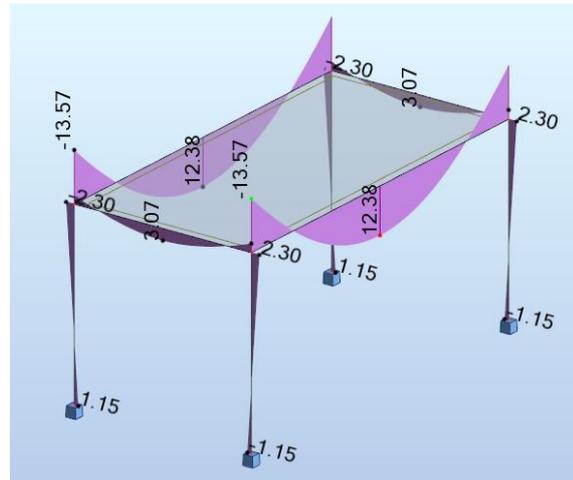
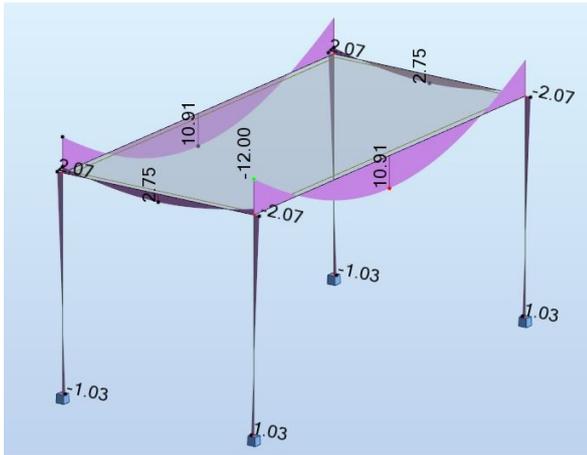


Figura 167: Caso 2, momento flettente solaio alleggerito e solaio non alleggerito.

Nel seguito si è allegata la tabella riassuntiva dei risultati .

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso2	M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [%]
peso proprio modificato	10.91	1.47	13.47
peso proprio non modificato	12.38		

Figura 168: Differenza momento massimo in campata.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO INCASTRO [%]			
Caso2	M _{pilastro} [KNm]	Differenza M _{pilastro} [KNm]	Differenza M _{pilastro} [%]
peso proprio modificato	-12	1.57	13.08
peso proprio non modificato	-13.57		

Figura 169: Differenza momento all'incastro.

Si registra una diminuzione del momento flettente medio del 13.3%.

- Caso 3: lunghezza travi secondarie 3 m, travi principali 9 m e solaio spesso 20 cm.

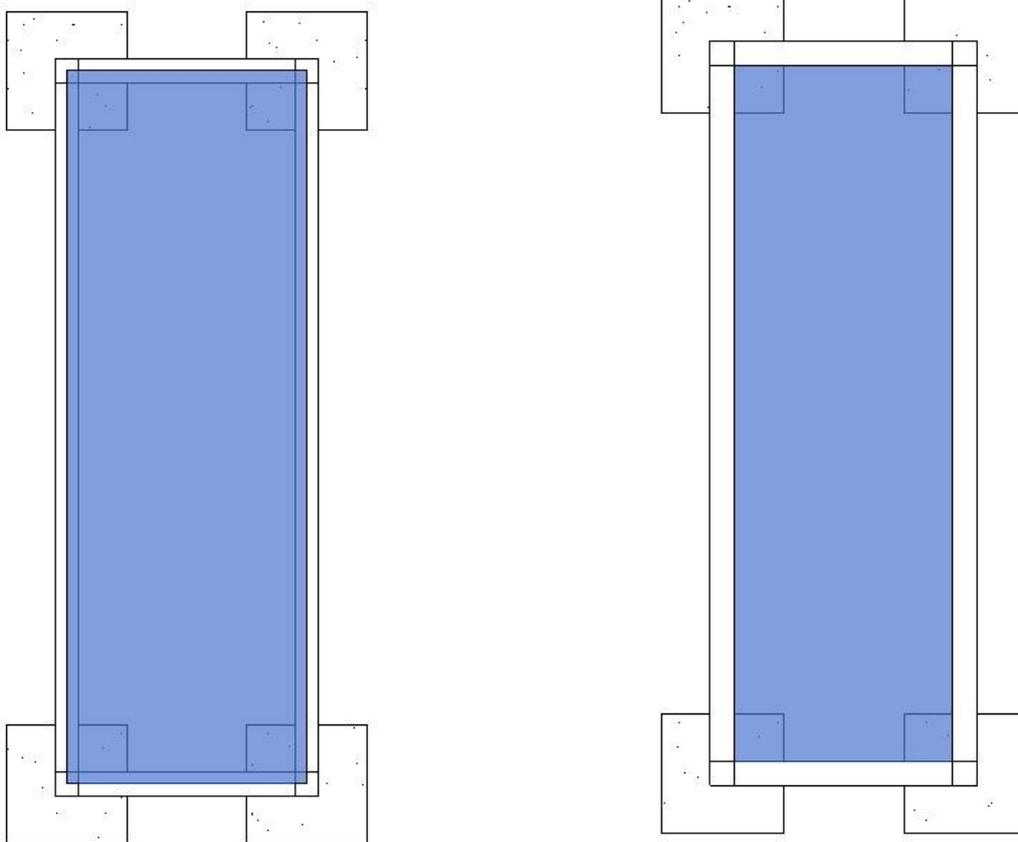


Figura 170: Solaio lungo linea media travi, $A= 27m^2$ solaio da bordo trave, $A=23.49m^2$.

Allego in seguito i diagrammi di momento flettente nei due casi.

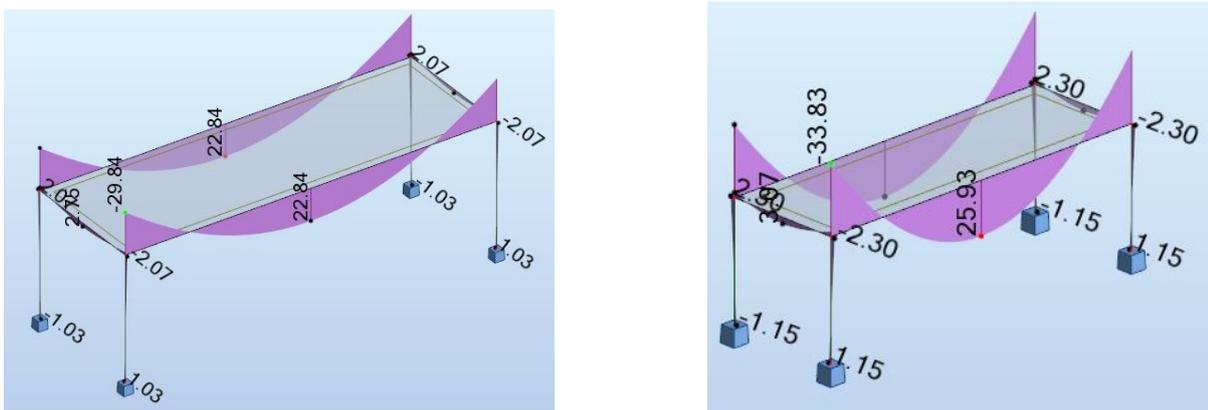


Figura 171: Caso 3, momento flettente solaio alleggerito e solaio non alleggerito.

Nel seguito si è allegata la tabella riassuntiva dei risultati.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso3	M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [%]
peso proprio modificato	22.84	3.09	13.53
peso proprio non modificato	25.93		

Figura 172: Differenza momento massimo in campata.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO INCASTRO [%]			
Caso3	M _{pilastro} [KNm]	Differenza M _{pilastro} [KNm]	Differenza M _{pilastro} [%]
peso proprio modificato	-33.83	3.99	11.79
peso proprio non modificato	-29.84		

Figura 173: Differenza momento all'incastro.

Si registra una diminuzione del momento flettente medio del 12.66% con quello in campata che addirittura varia quasi del 14%.

Allego infine una tabella riassuntiva con le differenze percentuali dei momenti flettenti con il solaio dal peso proprio modificato e non modificato nei tre casi: l'errore che si commetterebbe qualora non si tenesse in conto della sovrapposizione tra trave e pilastro è dell'ordine del 12%. Siccome ci troviamo in fase di verifica non può essere trascurato.

RIASSUNTO DIFFERENZE PERCENTUALI NEI 3 CASI		
	Differenza M _{campata} [%]	Differenza M _{pilastro} [%]
Caso1	11.64	11.11
Caso2	13.47	13.08
Caso3	13.53	11.79

Figura 174: Riassunto differenze percentuali.

6.2.3. Ripartizione dei carichi tamponatura-trave

Un altro aspetto su cui ci si è voluto concentrare è quello relativo alla ripartizione del carico delle tamponature sul telaio in cemento armato. Infatti siccome nella nostra struttura sono state impiegate pareti perimetrali di 40 cm di spessore in laterizio il loro peso è una percentuale molto importante del peso complessivo della stessa: nel nostro caso specifico pari al 32%.

Allo stesso modo degli altri casi di interesse, si è indagata una struttura elementare per imparare a governare il problema: un telaio spaziale su tre livelli: 0, 4 e 8 m. Le travi al livello due hanno sezione da 60 cm · 50 cm mentre quelle al livello tre da 40 cm · 50 cm. Entrambe sono state realizzate in cemento armato. La tamponatura è stata realizzata in mattoni pieni e malta di calce come da tabella C8A.2.1 nella normativa NTC2008.

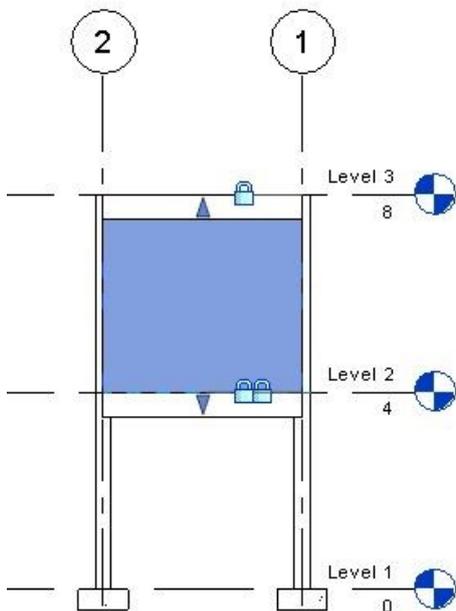


Tabella C8A.2.1 - Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte; f_m = resistenza media a compressione della muratura, τ_0 = resistenza media a taglio della muratura, E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio della muratura

Tipologia di muratura	f_m	τ_0	E	G	w
	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100	2,0	690	230	19
	180	3,2	1050	350	
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200	3,5	1020	340	20
	300	5,1	1440	480	
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260	5,6	1500	500	21
	380	7,4	1980	660	
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140	2,8	900	300	16
	240	4,2	1260	420	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600	9,0	2400	780	22
	800	12,0	3200	940	
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	340	6,0	1200	400	18
	400	9,2	1800	600	
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500	24	3500	875	15
	800	32	5600	1400	
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400	30,0	3600	1080	12
	600	40,0	5400	1620	
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300	10,0	2700	810	11
	400	13,0	3600	1080	
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150	9,5	1200	300	12
	200	12,5	1600	400	
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300	18,0	2400	600	14
	440	24,0	3520	880	

Nel caso delle murature storiche, i valori indicati nella Tabella C8A.2.1 (relativamente alle prime sei tipologie) sono da riferirsi a condizioni di muratura con malta di scadenti caratteristiche, giunti non particolarmente sottili ed in assenza di ricorsi o listature che, con passo costante, regolarizzano

Figura 175: Struttura elementare indagata con materiale impiegato da NTC 2008.

Fonte: Norme Tecniche per le Costruzioni NTC 2008.

Ricordo inoltre che, affinché venga attivato il modello analitico deve essere spuntata in Revit la possibilità *attiva modello analitico*.

Strutturale	
Strutturale	<input checked="" type="checkbox"/>
Attiva modello ...	<input checked="" type="checkbox"/>
Utilizzo struttur...	Portante
Copriferro arm...	Rebar Cover 1 <...
Copriferro arm...	Rebar Cover 1 <...
Copriferro arm...	Rebar Cover 1 <...

Figura 176: Impostazione strutturale della parete.

L'obiettivo era quello di fare in modo che l'intero peso del pannello fosse sostenuto dalla trave al livello due. A tal scopo si è innanzitutto effettuato il calcolo analitico del momento flettente senza pannello di modo tale da verificare la bontà del calcolo in Robot.

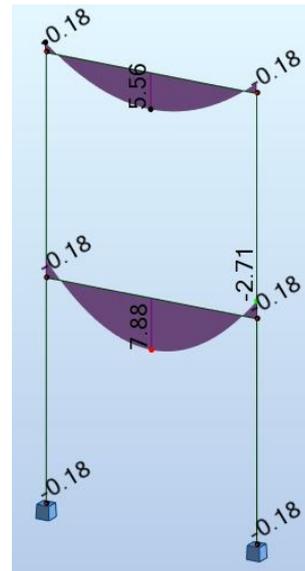
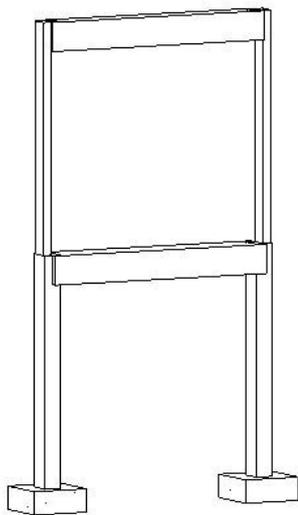


Figura 177: Caso senza pannello: visualizzazione 3D in Revit e momento flettente ottenuto in Robot.

Si è compiuto il calcolo analitico a partire dalle formule per la risoluzione di un portale. Il carico dovuto alla trave era:

- $g_{TR,LIV1} = 1.14 \text{ m}^3 \cdot 2407.29 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1}{4\text{m}} = 6.86 \text{ KN/m}$

Ed il relativo momento flettente all'incastro ed alla base:

- $M_{max,campata} = \frac{6.86\text{KN/m} \cdot 16\text{m}^2}{24} \cdot \frac{5}{3} = 7.62 \text{ KNm}$
- $M_{incastro} = \frac{6.86\text{KN/m} \cdot 16\text{m}^2}{18} = -2.5 \text{ KNm}$

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso	$M_{campata}$ [KNm]	Differenza $M_{campata}$ [KNm]	Differenza $M_{campata}$ [%]
Calcolo analitico	7.62	0.26	3.41
Calcolo con Robot	7.88		

Figura 178: Differenza percentuale massimo momento in campata analitico-Robot.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO INCASTRO [%]			
Caso	$M_{pilastro}$ [KNm]	Differenza $M_{pilastro}$ [KNm]	Differenza $M_{pilastro}$ [%]
Calcolo analitico	-2.60	0.11	4.23
Calcolo con Robot	-2.71		

Figura 179: Differenza percentuale momento all'incastro analitico-Robot.

Le differenze percentuali inferiori al 5% confermano la buona precisione di Robot per il calcolo delle sollecitazioni.

Si è poi indagata quale fosse la modellazione più efficace della tamponatura in termini di precisione di momento flettente rispetto al calcolo analitico e di minimizzazione del lavoro necessario in Robot. La soluzione a cui si è giunti è la seguente: modellare la parete fino all'intradosso della trave del livello tre e lateralmente fino al riferimento analitico dei pilastri.

Proprietà analitiche	
Tipo di famiglia	Muro di base : Ge...
Materiale fisico	A_muratura(1)
Area	16.000 m ²
Perimetro	16.0000
Allineamento analitico	
Metodo di alline...	Rilevamento auto...
Proiezione Z	Superficie interna ...
Metodo di estens...	Proiezione
Proiezione Y - Su...	Livello : Level 3
Metodo di estens...	Rilevamento auto...
Proiezione Y - Ba...	Base del muro
Dati identità	
Numero superficie	0
Commenti	
Fasi	
Fase di creazione	New Construction
Fase di demolizi...	Nessuno

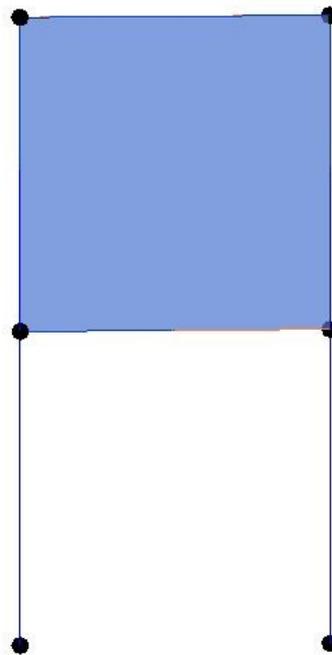


Figura 180: Vista analitica del portale in Revit.

Il carico dovuto alla tamponatura è:

- $$g_{Tamponatura} = 6.4 \text{ m}^3 \cdot 1800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1}{4\text{m}} = 28.24 \text{ KN/m}$$

Ed il relativo momento flettente all'incastro ed alla base:

- $$M_{max,campata} = \frac{28.24\text{KN/m} \cdot 16\text{m}^2}{24} \cdot \frac{5}{3} + M_{max,campata,trave} = 36.88 \text{ KNm}$$

- $$M_{incastro} = \frac{28.24\text{KN/m} \cdot 16\text{m}^2}{18} + M_{incastro,TR,LIV1} = -27.70 \text{ KNm}$$

In seguito si possono osservare le tabelle riassuntive dei risultati in termine di momento flettente.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso	$M_{campata}$ [KNm]	Differenza $M_{campata}$ [KNm]	Differenza $M_{campata}$ [%]
Calcolo analitico	36.88	11.38	44.63
Calcolo con Robot	25.50		

Figura 181: Differenza momento massimo in campata, calcolo analitico-Robot.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO INCASTRO [%]			
Caso	$M_{pilastro}$ [KNm]	Differenza $M_{pilastro}$ [KNm]	Differenza $M_{pilastro}$ [%]
Calcolo analitico	-27.70	10.30	37.18
Calcolo con Robot	-17.40		

Figura 182: Differenza momento all'incastro, calcolo analitico-Robot.

Come si può osservare nelle due tabelle, l'errore tra il calcolo analitico e quello ottenuto è circa del 40% che è un valore inaccettabile, peraltro se si considera il fatto che è a sfavore di sicurezza. Pertanto le tamponature sono state considerate in fase di analisi dei carichi come carico distribuito areale sui solai alla voce peso tramezzi, condizione di carico G_2 .

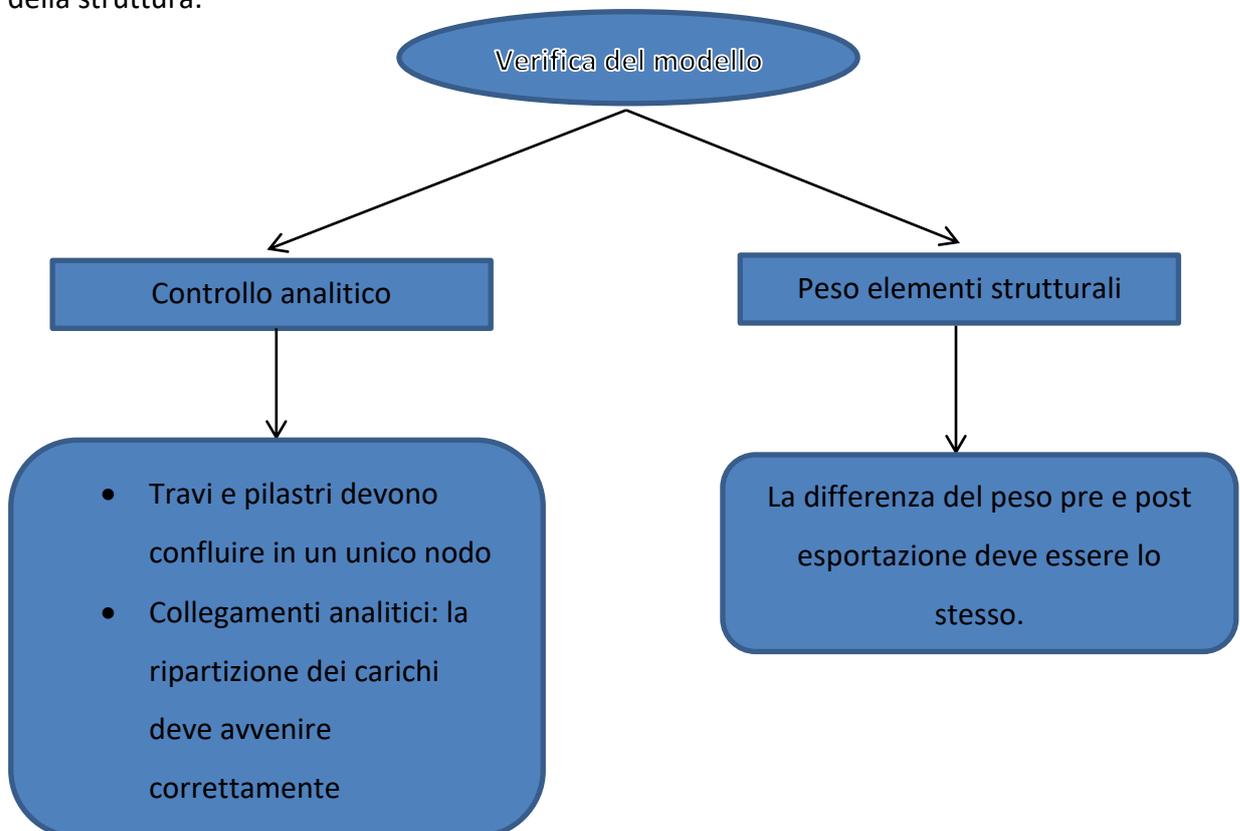
7. Modellazione e analisi strutturale sul software di calcolo

Nel seguente capitolo vengono descritte le operazioni che portano all'analisi e alle verifiche strutturali. Il modello esportato da Revit deve essere controllato nel dettaglio, in particolare nelle zone di maggior criticità quali i nodi con i relativi collegamenti analitici. Nella fase successiva viene controllato che il peso della struttura importata in Robot sia analogo a quello derivante da Revit. Infine, per dare un'idea globale di tutto il percorso necessario alla valutazione della sicurezza globale di un edificio esistente, sono state compiute alcune verifiche su alcuni elementi.

7.1. Controllo del modello ed esportazione sul software di calcolo

Il controllo è stato focalizzato sul modello analitico e sul peso degli elementi strutturali.

Il processo di lavoro può essere riassunto nel seguente flow chart: partendo dal modello analitico, si verifica che i collegamenti analitici creati uniscano correttamente gli elementi: è possibile infatti che ne vengano creati in numero eccessivo e che non colleghino gli elementi come si vorrebbe. Una volta che il modello di calcolo è stato trasferito correttamente in Robot si procede con la verifica del peso complessivo. A tal fine si è utilizzato il procedimento descritto al paragrafo 6.2.1.3.: si creano i parametri per la densità e attraverso gli abachi si calcola il valore del peso totale della struttura.



7.1.1 Controllo analitico

Si è verificato che:

- Travi e pilastri confluissero in un unico nodo .
- Non vi fossero errori macroscopici nella modellazione.
- I collegamenti analitici creati da Revit automaticamente fossero trasferiti in maniera adeguata.

Il controllo di tali problematiche è stato condotto sull'intera struttura ma, l'esportazione ai fini del calcolo del peso proprio, è stato effettuato solo sul blocco centrale.

Particolare attenzione è stata impiegata per verificare che i nodi analitici del sistema di travi su cui poggia il tetto appartenessero ai pannelli perimetrali di appoggio.

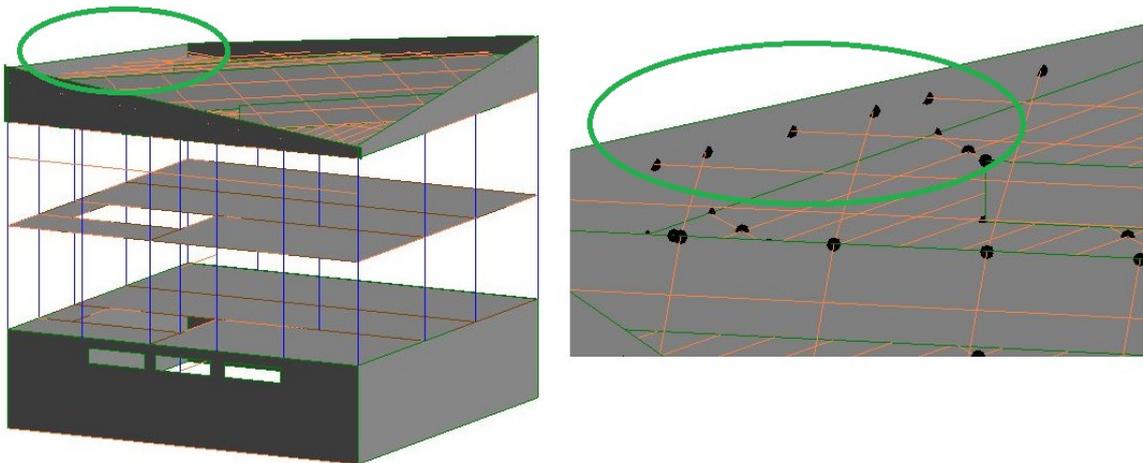


Figura 183: Verifica appoggi sistema di travi del tetto.

7.1.2. Controllo peso proprio della struttura

Per verificare che il peso della struttura ottenuto da Robot coincidesse con quello restituito da Revit si è applicato il metodo già descritto in precedenza al paragrafo 6.2.1.3.

Si calcolano i pesi degli elementi strutturali con l'ausilio degli abachi e se ne fa la somma. In Robot si calcolano le reazioni vincolari dovuti al solo peso proprio.

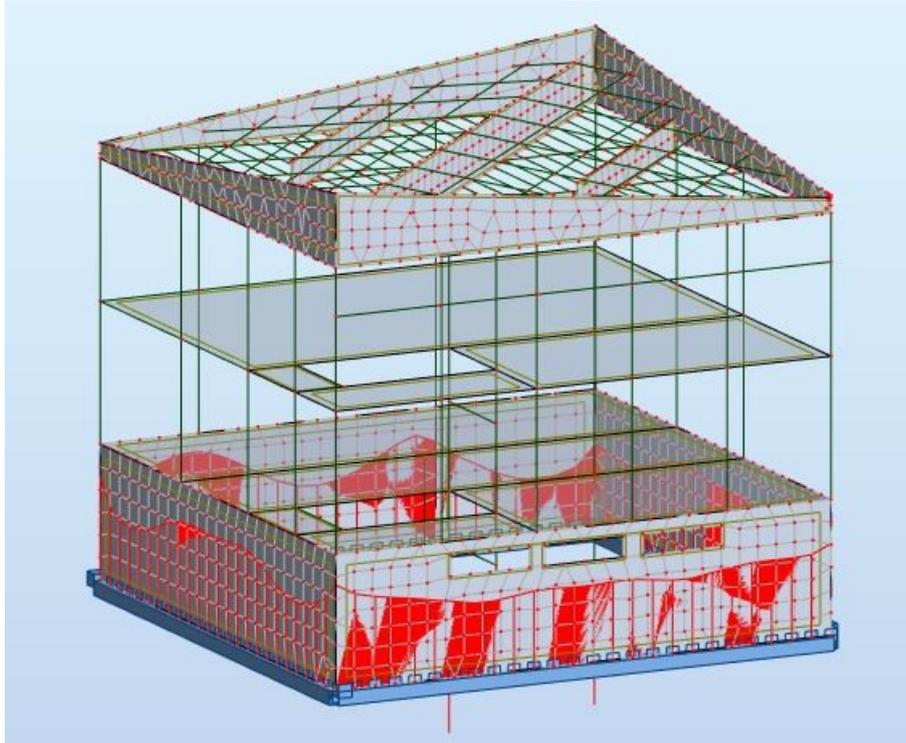


Figura 184: Andamento reazioni vincolari blocco centrale.

Allego nel seguito il confronto tra il calcolo del peso della struttura in Revit e in Robot.

	[KN]	Differenza Peso [%]
peso travi	190.11	\
peso pilastri	125.45	\
peso solai	1065.91	\
peso complessivo Revit	1381.47	2.27
peso complessivo Robot	1413.58	

Figura 185: Verifica peso proprio blocco centrale Revit-Robot.

La differenza percentuale è dello 2.27%, in linea con i risultati ottenuti nei test per i modelli elementari.

7.2. Operazioni post esportazione

Una volta che è stato verificato il peso proprio della parte del complesso studiato, si è proceduto a:

- Impostare il giusto modello di calcolo per i solai.
- Generare i nodi in prossimità delle intersezioni tra i due sistemi di travi del tetto.
- Cambiare il tipo di sezione per i travetti del solaio dell'ultimo piano.

7.2.1. Impostazione del modello di calcolo per solai

solai

Robot consente di calcolare i pannelli con diversi modelli di calcolo. Se si considera un solaio poggiante su quattro travi di cui 2 principali e due secondarie, Il mio obiettivo era quello di fare in modo che il suo peso si ridistribuisse per l'80% sulle prime e il restante 20% sulle seconde.

In seguito all'esportazione i pannelli sono tutti calcolati con il modello di default guscio:

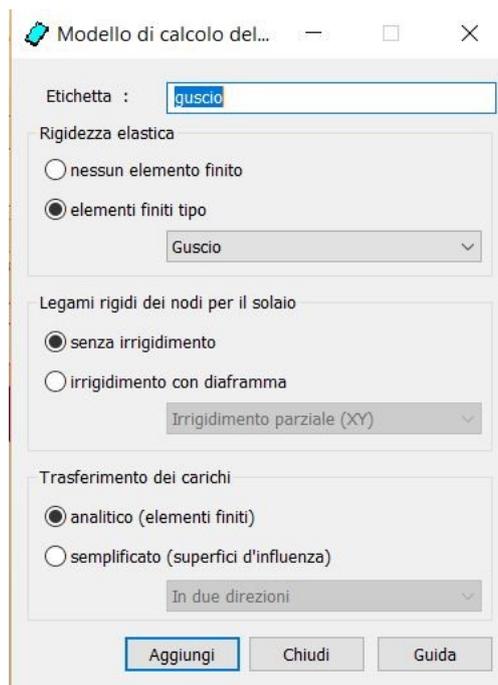


Figura 186: Modello di calcolo dei pannelli di default guscio.

Come si può vedere nell'immagine precedente genera la mesh nel pannello e ne utilizza la geometria per il trasferimento dei carichi. Il risultato che si ricava con tale modello porta ad un valore di momento flettente sulle travi principali estremamente inferiore rispetto a quello atteso dal calcolo analitico.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso	M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [KNm]	Differenza M _{campata} [%]
Analitico	23.58	10.02	42.49
Modello guscio	13.56		

Figura 187: Differenza momento flettente in campata tra modello e guscio e calcolo analitico.

L'errore che si commetterebbe è di quasi il 50%: assolutamente non accettabile.

Cambiare il modello è un passaggio rapido e di facile realizzazione. Alla voce mesh EF- opzioni di generazione, si seleziona modello di calcolo del pannello, evidenziato in verde nella prossima figura.

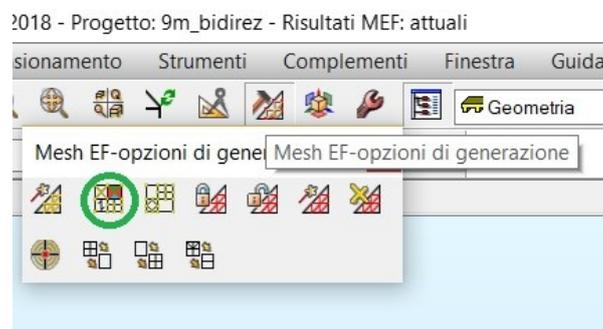


Figura 188: Modello di calcolo del pannello.

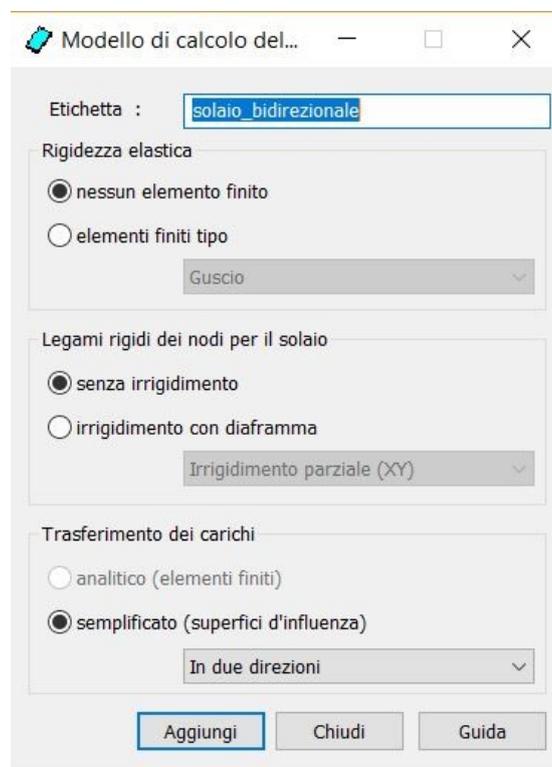


Figura 189: Impostazione caratteristiche solaio bidirezionale.

Le impostazioni per il solaio bidirezionale sono state:

- Nessun elemento finito.
- Senza irrigidimento alla voce legami rigidi dei nodi per il solaio.
- Trasferimento dei carichi bidirezionale.

La direzione dell'orditura del solaio è un'informazione che viene esportata direttamente da Revit.

Per comprendere a fondo in che modo Robot creasse le aree di influenza delle travi siamo andati ad analizzare tre telai con geometrie diverse ma proporzionali: quattro pilastri da 3 m ciascuno, quattro travi con sezione 30 cm per 30 cm ed un solaio di spessore 20 cm. Le travi principali hanno lunghezza di 3 m nel primo caso, di 6 m nel secondo e di 9 m nel terzo.

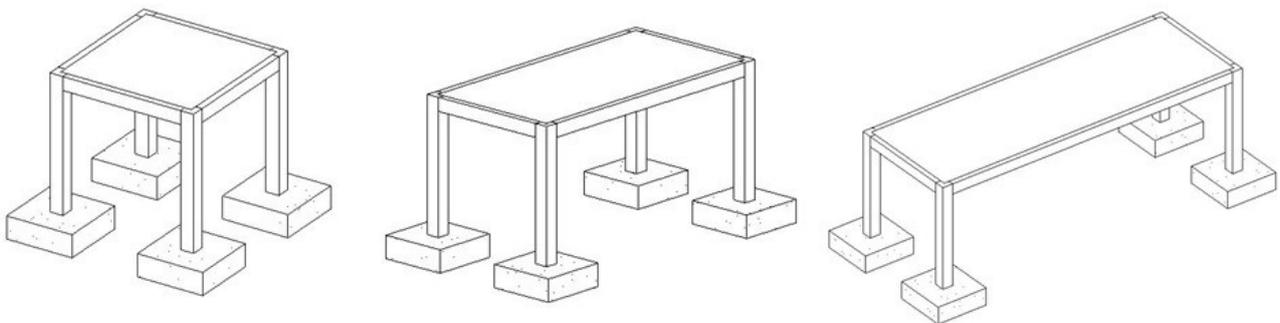


Figura 190: Caso 1, caso 2 e caso 3.

L'area di influenza con il modello di calcolo bidirezionale viene generata a partire dai vertici del solaio seguendo la bisettrice dell'angolo retto: nei casi due e tre poi, si estende sul lato parallelo alla trave lunga.

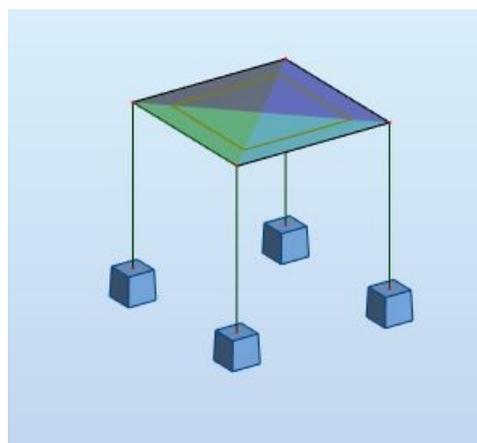


Figura 191: Ripartizione dei carichi solaio-trave caso 1

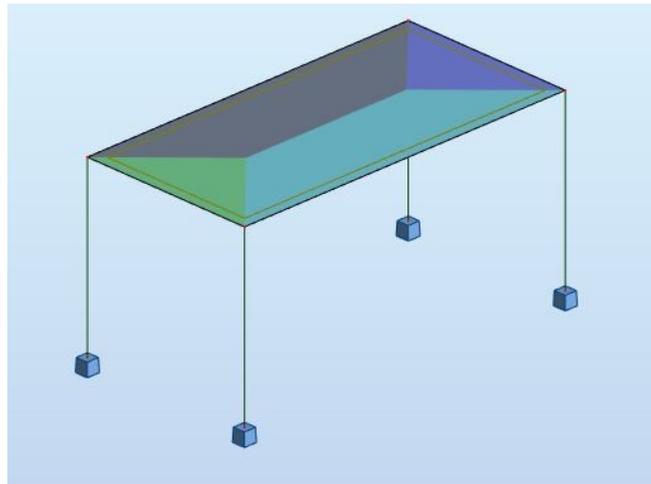


Figura 192: Ripartizione dei carichi solaio-trave caso 2.

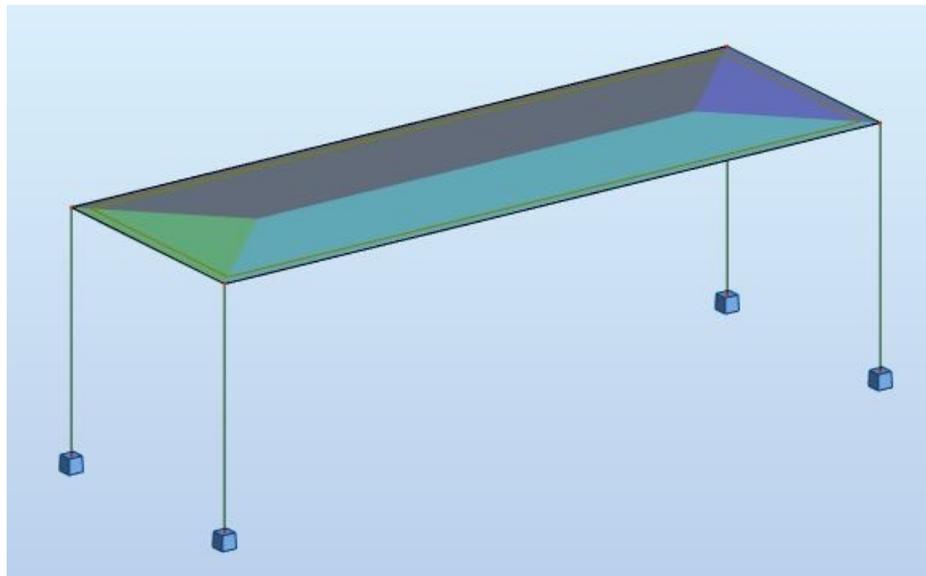


Figura 193: Ripartizione dei carichi solaio-trave caso 3.

I risultati di momento flettente nei tre casi sono allegati nelle seguenti figure.

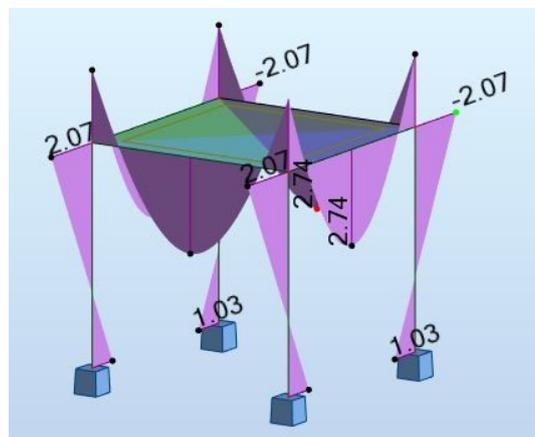


Figura 194: Momento flettente caso 1.

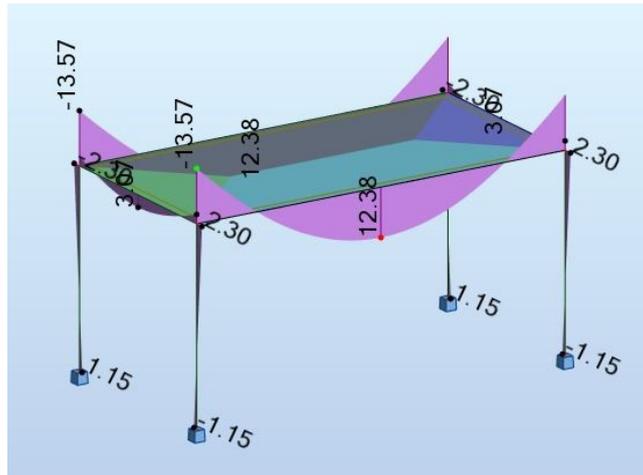


Figura 195: Momento flettente caso 2.

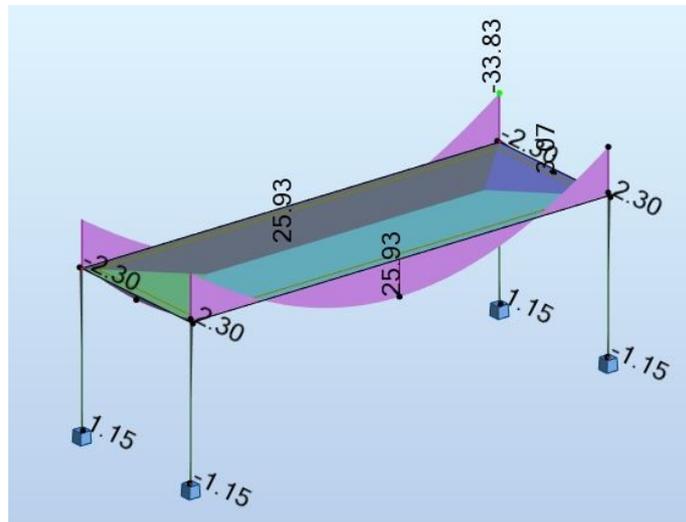


Figura 196: Momento flettente caso 3.

Se si prende in considerazione il caso 3 di cui avevamo fatto il confronto tra i risultati ottenuti con il modello di calcolo guscio ed il calcolo analitico possiamo ora confrontare il valore di momento in campata con il solaio bidirezionale rispetto a quello ottenuto dalle formule analitiche.

DIFFERENZA PERCENTUALE MOMENTO MASSIMO IN CAMPATA[%]			
Caso	$M_{campata}$ [KNm]	Differenza $M_{campata}$ [KNm]	Differenza $M_{campata}$ [%]
Analitico	23.58	2.35	9.97
Modello solaio bidirezionale	25.93		

Figura 197: Differenza momento flettente calcolo analitico e con il modello bidirezionale.

Come si può osservare nell' ultima immagine, il calcolo tramite il modello di calcolo bidirezionale restituisce un valore di momento flettente in campata a favore di sicurezza del 9.97%.

L'area di carico per il calcolo analitico del momento flettente in mezzera delle travi principali è stata calcolata geometricamente a partire dalla bisettrice degli angoli retti ai vertici del solaio.



Figura 198: Definizione geometrica dell'area di influenza delle travi.

- $A_{blu} = b \cdot \frac{h}{2} = 3m \cdot \frac{1.5m}{2} = 2.25 m^2$
- $A_{tot} = 2 \cdot (A_{blu} + A_{griglia}) = 27 m^2$
- $A_{griglia} = \frac{A_{tot}}{2} - A_{blu} = 11.25 m^2$
- $q = \frac{\gamma_{solaio} \cdot h_{solaio} \cdot A_{griglia}}{l_{trave}} = 13.24 \frac{KN}{m^3} \cdot 0.2 m \cdot 11.25 \frac{m^2}{9m} = 14.36 KN/m$

Il peso del solaio viene ripartito al 15% sulle travi secondarie e al 35% su quelle principali, tale risultato è del tutto in linea con quello che ci eravamo preposti.

7.2.2. Generazione intersezioni sistemi di travi del tetto

Un aspetto di rilevante importanza è stato la modellazione del tetto e dei suoi componenti. Infatti per i due sistemi di travi su cui poggia la copertura è stato necessario applicare il comando correzione della struttura alla voce modifica.

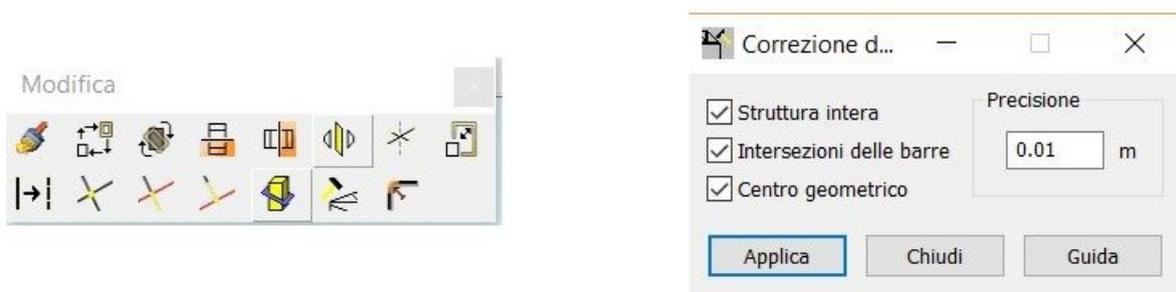


Figura 199: Creazione intersezione delle barre.

Senza questo comando, come si vede nella prossima immagine, la deformata del sistema di travi del tetto non era unica ma ogni singola trave si infletteva senza tener conto delle altre adiacenti.

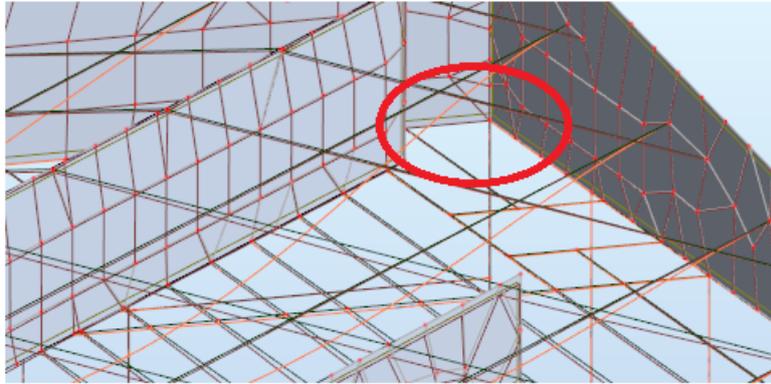


Figura 200: Travi inflesse in maniera separata.

Invece, nella prossima figura, si può osservare come i due sistemi di travi si muovano in maniera solidale in quanto le intersezioni fanno in modo che si deformi come un unico corpo.

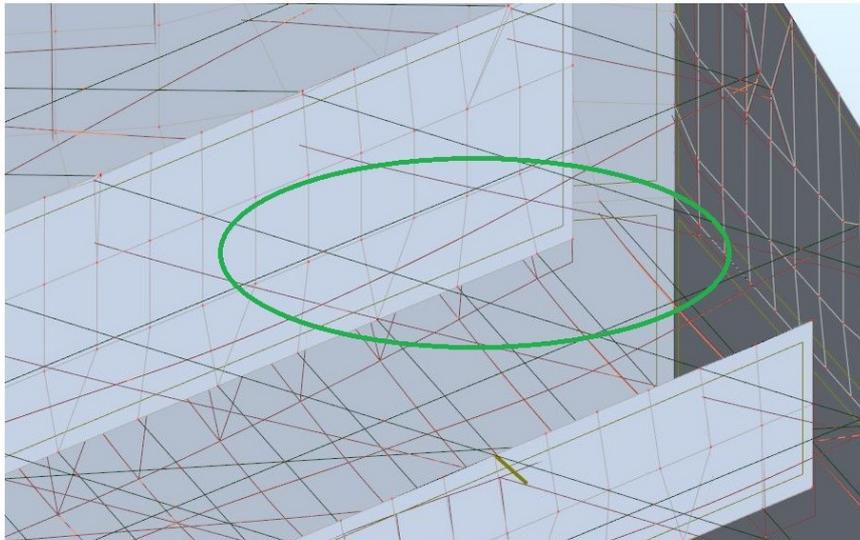


Figura 201: Visualizzazione deformata sistema di travi del tetto.

7.2.3. Modifica sezione travetti del solaio

Per osservare in maniera chiara la deformata dei travetti che costituiscono il solaio dell'ultimo piano in modo da comprendere il loro grado di sollecitazione, si sono modellati con una sezione a T la cui altezza complessiva coincide con quella del solaio.

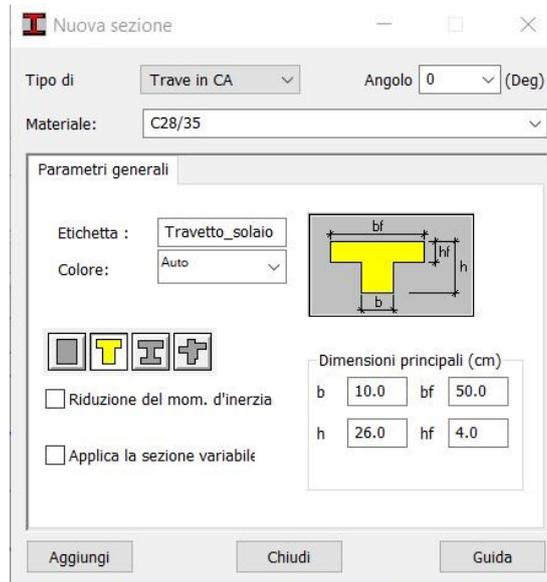


Figura 202: Sezione travetto solaio ultimo piano.

Nell'immagine precedente si può vedere la geometria della sezione:

- b : base tesa del travetto = 10 cm.
- b_f : base compressa del travetto = 50 cm. Questa dimensione coincide con l'interasse tra i travetti.
- h : altezza complessiva della trave.
- H_f : altezza flangia della sezione.

Il calcestruzzo impiegato è stato quello la cui resistenza caratteristica è stata definita nel capitolato speciale d'appalto pari a 28 MPa.

7.2.4. Applicazione dei carichi

Come si è già approfondito al capitolo 4.2, Revit consente di definire i carichi, sia in modulo sia l'area di applicazione nel caso di carichi superficiali e di gestirne le combinazioni. Tuttavia l'applicazione dei pesi in Robot conserva una serie di vantaggi. Innanzitutto i carichi per unità di superficie vengono applicati direttamente all'oggetto bidirezionale selezionato: non è quindi più necessario disegnare il perimetro di applicazione come succedeva in Revit.

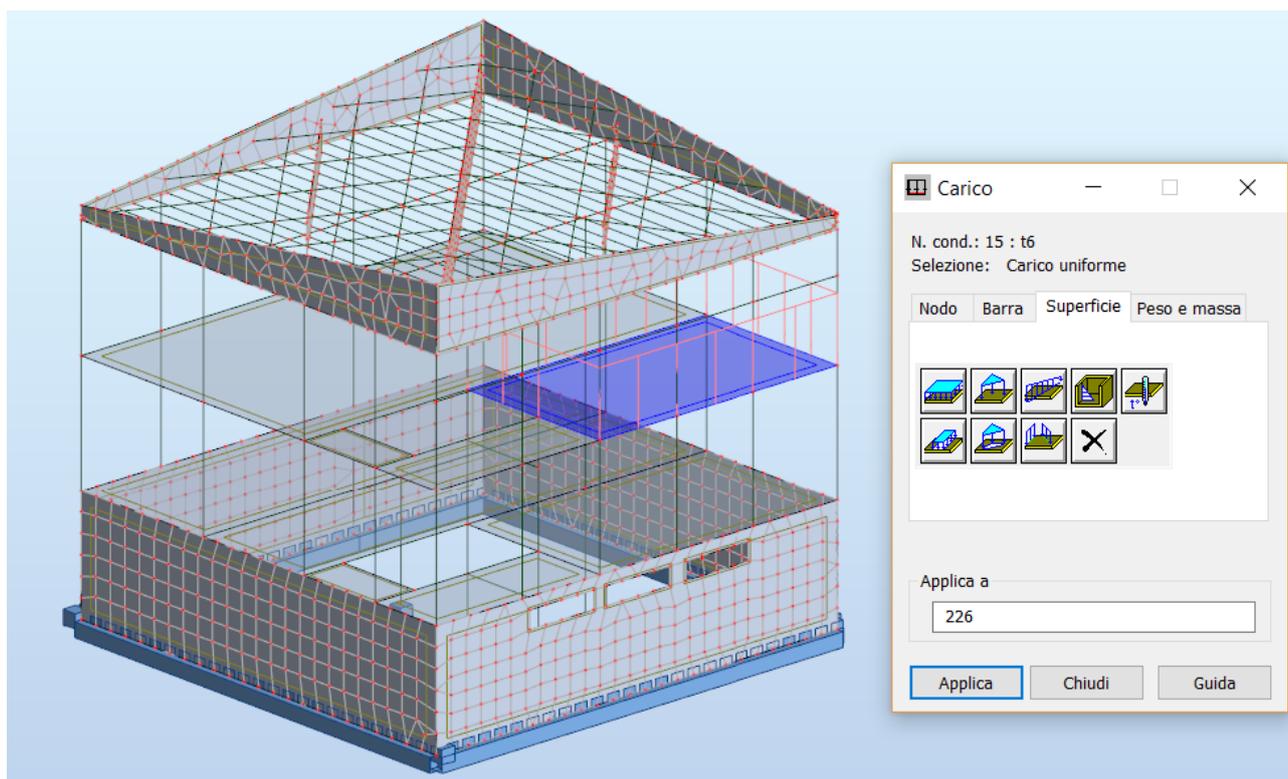


Figura 203: Applicazione carico superficiale al pannello 226.

Inoltre, per il carico del vento, il suo effetto viene calcolato in maniera estremamente precisa attraverso la simulazione del flusso di aria che investe l'edificio. A partire dalla direzione del flusso, dal suo modulo e dal livello del terreno si ricavano le sollecitazioni sull'intera struttura. Le sollecitazioni così ottenute sono visibili nella combinazione di carico specifica. Per la definizione della velocità del vento ci si è serviti delle norme tecniche per le costruzioni del 2008 ed andrò a definirne gli step al paragrafo 7.3.4.

Un altro aspetto importante è proprio la migliore visualizzazione dei carichi di Robot rispetto a Revit: in quest'ultimo non è possibile osservare una condizione di carico alla volta.

7.3. Analisi dei carichi

Nel seguente capitolo vengono definiti i carichi applicati alla struttura: il loro modulo è stato calcolato sulla base della NTC del 2008. Le azioni così ottenute sono state poi combinate allo Stato Limite Ultimo (SLU) e si sono osservate le sollecitazioni e la configurazione deformata della struttura. La procedura è stata implementata sul solo edificio centrale in quanto, avendo un piano in più, presentava sollecitazioni maggiori.

ANALISI DEI CARICHI		valore	
Condizioni di carico	Nome condizione	[KN/m ²]	[KN/m]
peso proprio elementi strutturali	DL1	software	/
peso proprio tramezzi	DL2	1.2	/
peso proprio copertura	DL3	0.15	0.23
carichi variabili categoria C	V1	3	
carico manutenzione categoria H	V2	0,5	/
carico neve H<1000 m	V3	1.23	1.85
carico vento	V4	software	/

Figura 204: Riassunto carichi applicati.

7.3.1. Cenni teorici

La classificazione delle azioni secondo la variazione della loro intensità nel tempo è definita al capitolo 3.3.1. del D.M. 14 Gennaio 2008 ed individua:

- **Azioni permanenti (G):** agiscono durante tutta la vita nominale di progetto della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è molto lenta. In questa categoria sono presenti:
 - Peso proprio di tutti gli elementi strutturali (G_1): le azioni permanenti gravitazionali associate ai pesi propri degli elementi strutturali sono ricavati a partire dalle dimensioni geometriche e dai pesi per unità di volume del materiale di cui è composto.
 - Peso proprio di tutti gli elementi non strutturali (G_2).
- **Azioni variabili (Q):** agiscono con valori istantanei che possono subire grandi variazioni durante la vita nominale della struttura. Tra questi ricordiamo:
 - Sovraccarichi;
 - Carico del vento;
 - Carico della neve;
 - Azione della temperatura.

- **Azioni eccezionali (A):** si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura. Possono essere:
 - Incendi;
 - Urti ed impatti.
- **Azioni sismiche (E):** derivanti dai terremoti.

7.3.2. Azioni permanenti

7.3.2.1. *Peso proprio elementi strutturali (G)*

Il peso proprio degli elementi strutturali viene definito in maniera automatica dal software di calcolo a partire dalla geometria e il materiale esportato da Revit.

Impostazioni strutturali

Combinazioni di carichi		Impostazioni modello analitico		Impostazioni vincoli esterni	
Impostazioni rappresentazione simbolica				Condizioni di carico	
Condizioni di carico					
	Nome	Numero condizione	Natura	Categoria	
1	DL1	1	Proprio	Carichi propri	Aggiungi Elimina
2	LL1	2	Di esercizio	Carichi di esercizio	
3	VENTO1	3	Vento	Carichi vento	
4	NEVE1	4	Neve	Carichi neve	
5	LR1	5	Tetto	Carichi di esercizio del t	
6	ACC1	6	Accidentale	Carichi accidentali	
7	TEMP1	7	Temperatura	Carichi temperatura	
8	SEIS1	8	Sismico	Carichi sismici	
9	DL1 (1)	9	Dead	Carichi propri	

Figura 205: Condizione di carico del peso proprio degli elementi strutturali di default in Revit.

Durante l'esportazione in Robot, bisogna specificare in Revit la condizione di carico che contiene il peso proprio.

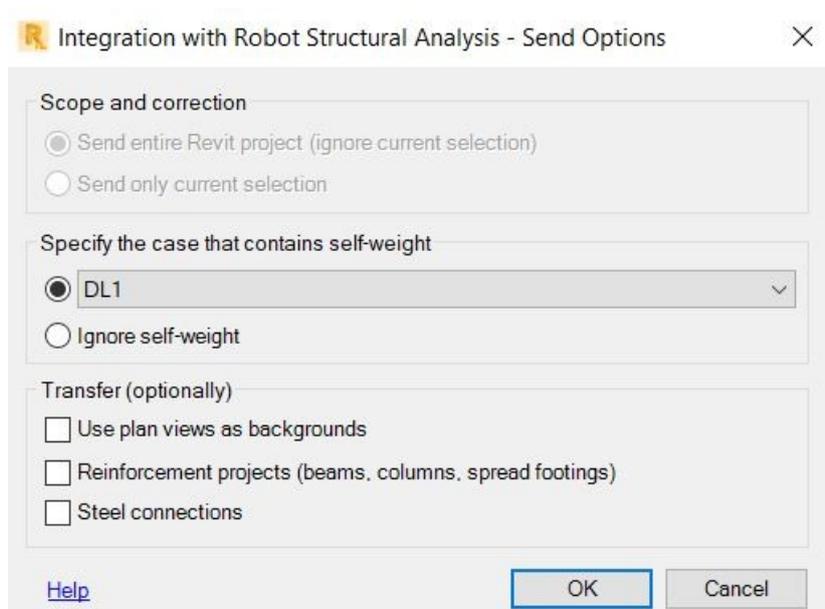


Figura 206: Condizione di carico contenente peso proprio.

7.3.2.2. *Peso proprio elementi tamponature (G_1)*

Sono considerati carichi permanenti non strutturali i carichi non rimovibili durante il normale esercizio della costruzione, quali quelli relativi a tamponature esterne, divisori interni, massetti, isolamenti, pavimenti e rivestimenti del piano di calpestio, intonaci, controsoffitti, impianti ed altro. Per gli orizzontamenti degli edifici per abitazioni e uffici, il peso proprio di elementi divisori interni può essere ragguagliato ad un carico permanente portato uniformemente distribuito g_{2k} che dipende dal peso proprio per unità di lunghezza G_{2k} delle partizioni nel seguente modo:

- per elementi divisori con $G_2 \leq 1,00 \text{ kN/m}$: $g_2 = 0,40 \text{ kN/m}^2$;
- per elementi divisori con $1,00 < G_2 \leq 2,00 \text{ kN/m}$: $g_2 = 0,80 \text{ kN/m}^2$;
- per elementi divisori con $2,00 < G_2 \leq 3,00 \text{ kN/m}$: $g_2 = 1,20 \text{ kN/m}^2$;
- per elementi divisori con $3,00 < G_2 \leq 4,00 \text{ kN/m}$: $g_2 = 1,60 \text{ kN/m}^2$;
- per elementi divisori con $4,00 < G_2 \leq 5,00 \text{ kN/m}$: $g_2 = 2,00 \text{ kN/m}^2$.

Figura 207: Carichi permanenti non strutturali, peso proprio elementi divisori interni.

Fonte: NTC 2008, capitolo 3.1.3.1. , pag. 12.

7.3.2.3. *Peso proprio copertura (G_2)*

Il peso della copertura è stato indicato nel capitolato speciale di appalto assieme alla stratigrafia del tetto.

La stratigrafia è la seguente:

- Lamierino interno in alluminio;
- Strato di materiale in isolante polimerico;
- Copertura esterna della falda del tetto in alluminio;

Il modulo del carico è pari a:

$$g_3 = 0.15 \frac{KN}{m^2}$$

Che ripartito tra l'interasse delle travi secondarie diventa:

$$g_{3,lineare} = g_3 \cdot l_{interasse} = 0.15 \frac{KN}{m^2} \cdot 1.5 \text{ m} = 0.23 \text{ KN/m}$$

7.3.3. sovraccarichi

Nello specifico i sovraccarichi contengono i carichi legati alla destinazione d'uso dell'opera e possono essere:

- Carichi verticali uniformemente distribuiti (q_k);
- Carichi verticali concentrati (Q_k);
- Carichi orizzontali lineari (H_k);

i valori caratteristici vengono riportati alla tabella 3.1.II del capitolo 3.1.4 del D.M. 14 gennaio 2008.

7.3.3.1. Sovraccarichi Categoria C (Q_1)

Si intende il carico variabile dovuto ad ambienti che possono subire affollamento come scuole, ospedali, ristoranti ecc.,

Il suo modulo è visibile nella seguente tabella.

Tabella 3.1.II – Valori dei carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale. Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	Uffici. Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	Ambienti suscettibili di affollamento Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	Ambienti ad uso commerciale. Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale. Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	≥ 6,00 —	6,00 —	1,00* —
F-G	Rimesse e parcheggi. Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	2,50 —	2 x 10,00 —	1,00** —
H	Coperture e sottotetti Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione Cat. H2 Coperture praticabili Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	0,50 — —	1,20 — —	1,00 — —
* non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati				
** per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere valutate caso per caso				

Figura 208: Sovraccarico per la categoria C.

Fonte: Norme tecniche per le costruzioni, Tabella 3.1.II, capitolo 3.1.4. pag. 13.

7.3.3.2. Sovraccarichi Categoria H (Q_2)

Si intende il carico variabile dovuto al carico per la manutenzione nel sottotetto.

Il suo modulo è visibile nella seguente tabella.

Tabella 3.1.II – Valori dei carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale. Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	Uffici. Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	Ambienti suscettibili di affollamento Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	Ambienti ad uso commerciale. Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale. Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	$\geq 6,00$ —	6,00 —	1,00* —
F-G	Rimesse e parcheggi. Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	2,50 —	2 x 10,00 —	1,00** —
H	Coperture e sottotetti Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione Cat. H2 Coperture praticabili Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	0,50 secondo categoria di appartenenza —	1,20 —	1,00 —
* non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati				
** per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere valutate caso per caso				

Figura 209: sovraccarico per la categoria H.

Fonte: Norme tecniche per le costruzioni, Tabella 3.1.II, capitolo 3.1.4. pag. 13.

7.3.4. Azione del vento (Q_3)

Tale azione esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici. Per le costruzioni ordinarie tali azioni sono ricondotte a forze statiche equivalenti.

Robot, per la sua implementazione ha bisogno di:

- Velocità di riferimento;
- Altezza del suolo;
- Direzione del flusso;

La velocità di riferimento è il valore caratteristico della velocità del vento v_b a 10 m dal suolo su un terreno di categoria di esposizione II, mediata su 10 minuti e riferita ad un periodo di ritorno di 50 anni.

In mancanza di specifiche ed adeguate indagini statistiche v_b è data dall'espressione:

$$v_b = v_{b,0} \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$v_b = v_{b,0} + k_a(a_s - a_0) \quad \text{per } a_0 \leq a_s \leq 1500 \text{ m}$$

I parametri $v_{b,0}$, k_a , a_s sono definiti alla tabella 3.3.I del capitolo 3.1.4 del D.M. 14 gennaio 2008 e dipendono dalla regione geografica in cui si trova l'opera.

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_a [1/s]
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,010
2	Emilia Romagna	25	750	0,015
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,020
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,020
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,015
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,020
7	Liguria	28	1000	0,015
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,010
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,020

Tabella 210: Coefficienti $v_{b,0}$, k_a , a_s secondo la NTC 2008.

Fonte: Tabella 3.3.I, Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, capitolo 3.3.2. pag. 26.

Siccome il sito in esame è ubicato nel comune di Torino ad una quota di 239 m sul livello del mare si è nella condizione in cui $v_b = v_{b,0}$. Il livello del suolo si trova a zero metro sul livello del mare.

La direzione del flusso è stata scelta in modo tale da agire in maniera parallela alla direzione delle travi del tetto.

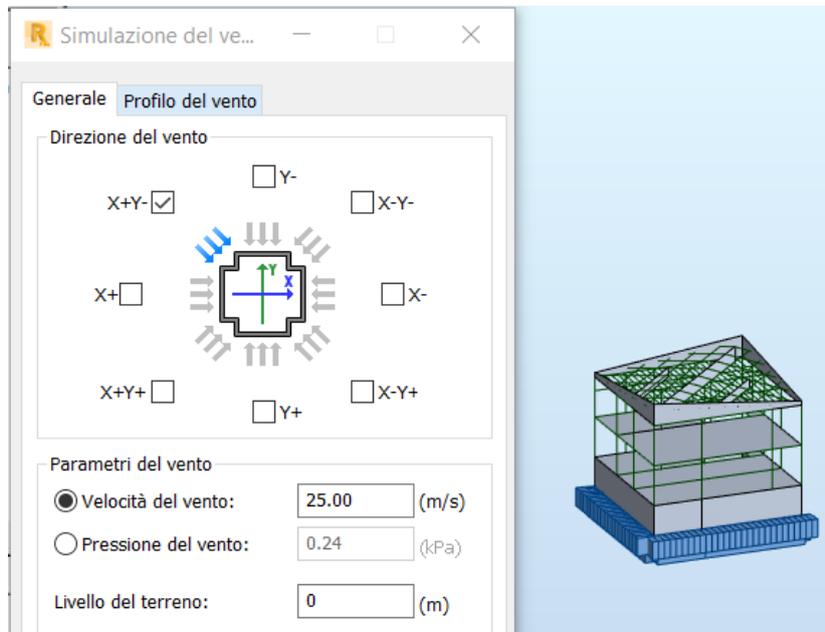


Figura 211: impostazione carico del vento sulla struttura.

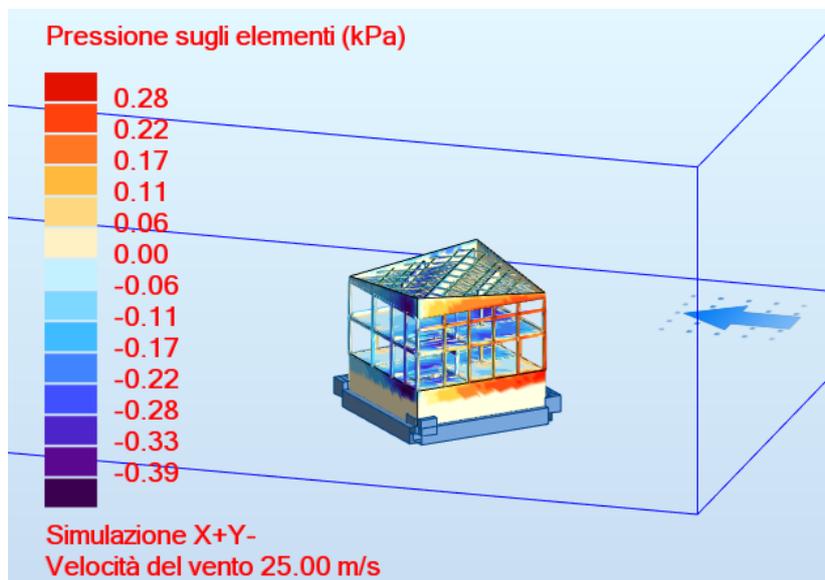


Figura 212: vista della simulazione.

E' stato poi verificato in maniera analitica che la pressione del vento fosse inferiore al peso proprio della copertura. La pressione del vento è data dalla seguente formula:

$$q_s = q_b \cdot C_{PE} \cdot C_E \cdot C_d = 390.63 \frac{N}{m^2} \cdot (-0.40) \cdot 1.48 \cdot 1 = 231 \frac{N}{m^2}$$

- Pressione cinetica del vento, q_b

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2 = 390.63 \text{ N/m}^2$$

- ρ : Densità dell'aria 1.25 Kg/m^3 ;
- v_0 : Velocità di riferimento.
- Coefficiente di forma, C_{PE}

Il coefficiente di forma dipende dall'inclinazione della falda del tetto, il suo valore può essere stimato a partire dal diagramma riportato a pagina della circolare 617 del 2 febbraio 2009.

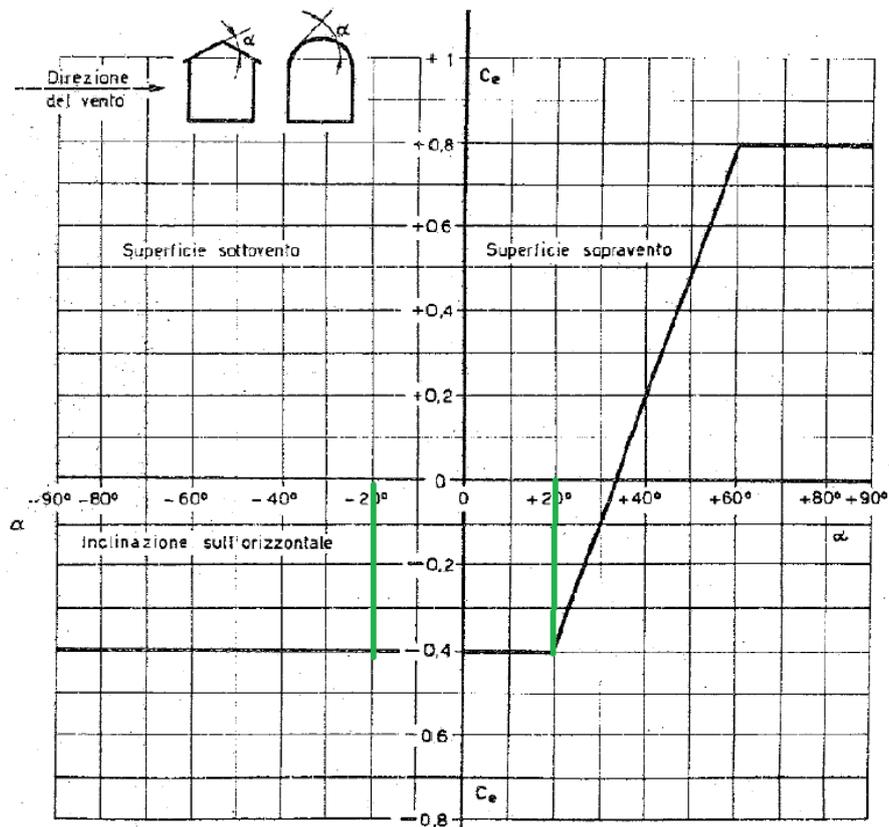


Figura 213: Figura C3.3.2 Valori assunti da c_{pe} al variare di α , C3.3.10.1, pag.23 Circolare 2 febbraio 2009, n. 617.

Per il nostro caso studio, $\alpha=20^\circ$ quindi $C_{PE} = -0.4$.

- *Coefficiente di esposizione, C_E*

Il coefficiente di esposizione c_e dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno, e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione. In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e l'effettiva scabrezza e topografia del terreno che circonda la costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di $z = 200$ m, esso è dato dalla formula:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

Dove k_r , z_0 , z_{\min} sono assegnati in Tab. 3.3.II in funzione della categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione; c_t è il coefficiente di topografia.

Tabella 3.3.II – Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

Categoria di esposizione del sito	k_r	z_0 [m]	z_{\min} [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Figura 214: Categoria di esposizione del sito.

Fonte: NTC 2008, tabella 3.3.II, pag.28, cap 3.3.7.

Tabella 3.3.III - Classi di rugosità del terreno

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi,...)

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Affinché una costruzione possa dirsi ubicata in classe A o B è necessario che la situazione che contraddistingue la classe permanga intorno alla costruzione per non meno di 1 km e comunque non meno di 20 volte l'altezza della costruzione. Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, a meno di analisi dettagliate, verrà assegnata la classe più sfavorevole.

Figura 215: Classe di rugosità del terreno.

Fonte: NTC 2008, tabella 3.3.III, pag.28, cap 3.3.7.

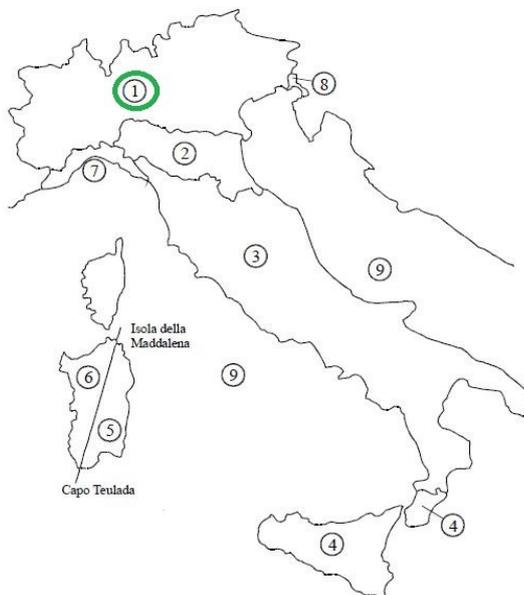


Figura 3.3.1 – Mappa delle zone in cui è suddiviso il territorio italiano

Figura 216: Mappe zone territorio italiano.

Fonte: NTC 2008, figura 3.3.1. pag. 27

ZONE 1,2,3,4,5						
	2 km	10 km	30 km	500m	750m	
A	--	IV	IV	V	V	V
B	--	III	III	IV	IV	IV
C	--	*	III	III	IV	IV
D	I	II	II	II	III	**
* Categoria II in zona 1,2,3,4 Categoria III in zona 5						
** Categoria III in zona 2,3,4,5 Categoria IV in zona 1						

Figura 217: Categoria sito caso studio.

Fonte: NTC 2008, tabella 3.3.2 pag.29

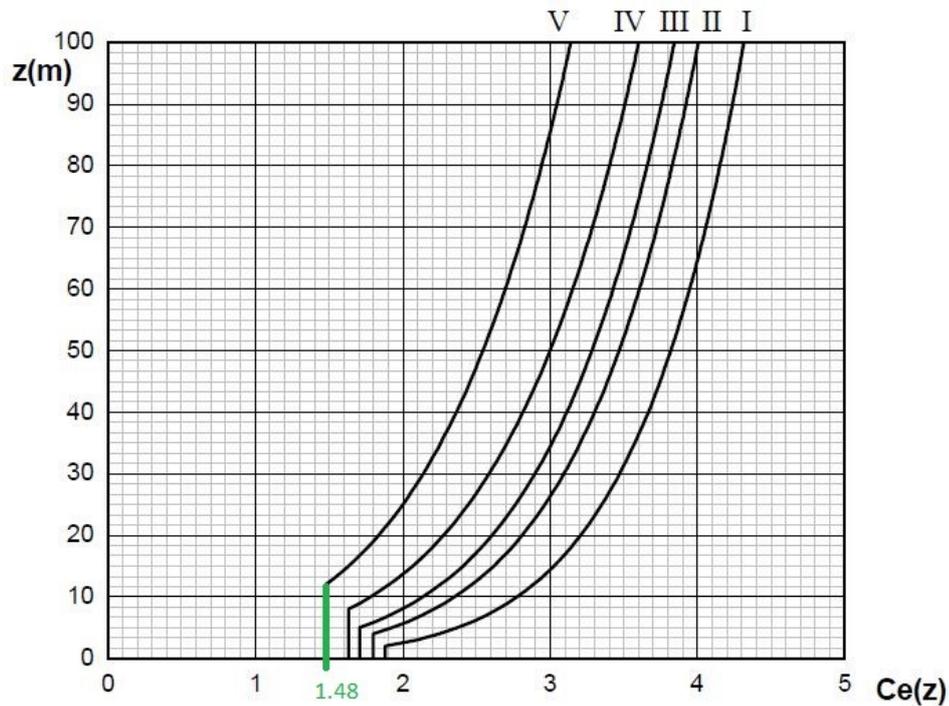


Figura 3.3.3 - Andamento del coefficiente di esposizione c_e con la quota (per $c_t = 1$)

Figura 218: Andamento coefficiente esposizione.

Fonte: NTC 2008, capitolo 3.3.7.figura 3.3.3. , pag. 30.

- *Coefficiente dinamico C_d*

Il coefficiente dinamico tiene in conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alla risposta dinamica della struttura. Esso può essere assunto cautelativamente pari ad 1 nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti 80 m di altezza ed i capannoni industriali, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità.

La spinta dovuta al vento vale quindi:

$$S_{VENTO} = q_s \cdot A_{tetto} = 0.231 \frac{KN}{m^2} \cdot 95.46 m^2 = 22.05 KN$$

- *Peso proprio copertura*

$$P_{TETTO} = G_2 \cdot A_{tetto} = 0.15 \frac{KN}{m^2} \cdot 95.46 m^2 = 14.32 KN$$

- *Verifica sollevamento*

$$S_{VENTO} = 22.05 KN > P_{TETTO} = 14.32 KN$$

Il modulo maggiore della spinta del vento rispetto al peso proprio della copertura causerebbe il sollevamento del tetto, tuttavia sono state osservate, nelle immagini raffiguranti la copertura vista dall'alto, delle file di viti in prossimità del sistema di travi secondarie che ne assicurano il vincolamento reciproco.



Figura 219: Vista viti per il vincolo tetto-travi.

7.3.5. Azione della neve (Q₄)

Il carico della neve viene affrontato al capitolo 3.4. delle Norme Tecniche per le Costruzioni. In particolare il carico provocato dalla neve sulle coperture sarà valutato mediante la seguente espressione:

$$q_s = \mu_i \cdot q_{sk} \cdot C_E \cdot C_t = 0.8 \cdot 1.54 \frac{KN}{m^2} \cdot 1 \cdot 1 = 1.23 \frac{KN}{m^2}$$

Dove:

- q_s : carico neve sulla copertura.
- μ_i : coefficiente di forma della copertura.
- q_{sk} : valore caratteristico di riferimento del carico neve al suolo $\left[\frac{KN}{m^2}\right]$.
- C_E : coefficiente di esposizione.
- C_t : coefficiente termico.

Il valore di carico neve in copertura così ottenuto è poi stato moltiplicato per l'interasse delle travi secondarie del tetto.

$$q_{s,lineare} = q_s \cdot \text{interasse travi} = 1.23 \frac{KN}{m^2} \cdot 1.5 m = 1.85 KN/m$$

➤ Valore caratteristico di riferimento del carico al suolo

Il carico neve al suolo dipende dalle condizioni locali di clima e di esposizione, considerata la variabilità delle precipitazioni nevose da zona a zona.

In mancanza di adeguate indagini statistiche e specifici studi locali, che tengano conto sia dell'altezza del manto nevoso che della sua densità, il carico di riferimento neve al suolo, per località poste a quota inferiore a 1500 m sul livello del mare, non dovrà essere assunto minore di quello calcolato in base alle espressioni riportate nel seguito, cui corrispondono valori associati ad un periodo di ritorno pari a 50 anni.

L'altitudine di riferimento a_s è la quota del suolo sul livello del mare nel sito di realizzazione dell'edificio. Per altitudini superiori a 1500 m sul livello del mare si dovrà fare riferimento alle condizioni locali di clima e di esposizione utilizzando comunque valori di carico neve non inferiori a quelli previsti per 1500 m.

I valori caratteristici minimi del carico della neve al suolo sono quelli riportati nel seguito.

Zona I - Alpina

Aosta, Belluno, Bergamo, Biella, Bolzano, Brescia, Como, Cuneo, Lecco, Pordenone, Sondrio, Torino, Trento, Udine, Verbania, Vercelli, Vicenza:

$$\begin{aligned} q_{sk} &= 1,50 \text{ kN/m}^2 & a_s &\leq 200 \text{ m} \\ q_{sk} &= 1,39 [1 + (a_s/728)^2] \text{ kN/m}^2 & a_s &> 200 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

Figura 220: Zona I per la suddivisione su base nazionale rispetto ai valori caratteristici minimi del carico della neve al suolo.

Fonte: NTC 2008, capitolo 3.4.2., pag. 32.

Siccome nel caso studio $a_s = 239 \text{ m}$, q_{sk} è stata così definita:

$$q_{sk} = 1,39 \cdot [1 + (a_s/728)^2] = 1,54 \frac{KN}{m^2}$$

➤ Coefficiente di forma della copertura

I coefficienti di forma sono definiti nella seguente tabella a partire dall'angolo di inclinazione sull'orizzontale della falda, i suddetti valori si riferiscono alle coperture ad una o due falde.

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

Figura 221: coefficienti di forma in funzione dell'inclinazione della falda.

Fonte: NTC 2008, capitolo 3.4.5.1., tabella 3.4.II, pag. 34.

➤ Coefficiente di esposizione

Il coefficiente di esposizione C_E può essere utilizzato per modificare il valore del carico neve in copertura in funzione delle caratteristiche specifiche dell'area in cui sorge l'opera. I Valori consigliati sono allegati nella seguente tabella. Se non diversamente indicato, si assumerà $C_E = 1$.

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 222: Tabella 3.4.I – Valori di C_E per diverse classi di topografia.

Fonte: NTC 2008, capitolo 3.4.3., tabella 3.4.I, pag. 34.

➤ Coefficiente termico

➤ In assenza di uno specifico e documentato studio, deve essere utilizzato $C_t = 1$.

7.3.6. Combinazione delle azioni

Una volta definiti i carichi da applicare alla struttura si è proceduto alla combinazione delle azioni da essi provocate. A tal fine si è seguita la normativa NTC del 2008 nello specifico al capitolo 2.5.3. dove viene definita la combinazione fondamentale per lo SLU:

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Fonte: NTC 2008, cap. 2.5.3., pag.7.

Dove le azioni indicate con G rappresentano le azioni permanenti mentre quelle con Q le azioni variabili, il pedice k indica il valore caratteristico dell'azione e il simbolo + indica "combinazione".

I coefficienti γ_{G1} , γ_{G2} e γ_{Qi} sono i coefficienti parziali delle azioni e hanno il compito di aumentarne o diminuirne il valore di base a se sono favorevoli o meno: qualora si proceda al calcolo delle sollecitazioni ed un'azione ha effetto sfavorevole sulla struttura, il suo modulo viene aumentato di una percentuale pari al 30% o 50% in base a se si tratti di un carico permanente o variabile. I valori dei coefficienti sono allegati nella seguente tabella definita nella NTC del 2008. Nel riquadro evidenziato in verde si leggono i coefficienti da utilizzare per lo stato limite ultimo STR ovvero lo stato limite di resistenza della struttura compresi gli elementi di fondazione.

		Coefficiente γ_F	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali ⁽¹⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Figura 223: Coefficienti parziali per le azioni.

Fonte: NTC 2008, capitolo 2.5.3., pag. 9.

Per quel che riguarda i coefficienti nominati con la lettera greca ψ indicano i coefficienti di combinazione parziale per le azioni variabili.

Il loro modulo è definito alla tabella 2.5.I. della NTC del 2008 cui allego un'immagine.

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Figura 224: Coefficienti parziali per le azioni variabili.

Fonte: NTC 2008, capitolo 2.5.3., pag. 9.

Il loro significato è il seguente: è statisticamente poco probabile che tutte le azioni variabili agiscano contemporaneamente e con il loro valore massimo, pertanto si effettuano delle combinazioni in cui una di esse ha il valore caratteristico e le restanti vengono ridotte di un coefficiente che dipende dall'azione stessa.

I coefficienti di combinazione da utilizzare sono:

- $\Psi_{0i,Sovraccarico} = 0.7$: *coefficiente di combinazione per il sovraccarico da categoria C.*
- $\Psi_{0i,Manutenzione} = 0.0$: *coefficiente di combinazione per il sovraccarico da manutenzione.*
- $\Psi_{0i,Vento} = 0.6$: *coefficiente di combinazione per il carico del vento.*
- $\Psi_{0i,Neve} = 0.5$: *coefficiente di combinazione per il carico del vento.*

Allego in seguito una tabella riassuntiva con le quattro combinazioni considerate e i coefficienti di combinazione utilizzati.

Combinazione azioni fondamentale per gli SLU									
Combinazione		Coefficienti di combinazione	Azioni						
			G	G ₁	G ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
1	Azione variabile principale: Sovraccarico categoria C	Y _{G1}	1.3	-	-	-	-	-	-
		Y _{G2}	-	1.5	-	-	-	-	-
		Y _{G3}	-	-	1.5	-	-	-	-
		Y _{Q1} Sovraccarico	-	-	-	1.5	-	-	-
		Y _{Q2} *Ψ ₀₂ Manutenzione	-	-	-	-	0	-	-
		Y _{Q3} *Ψ ₀₃ Vento	-	-	-	-	-	0.9	-
		Y _{Q4} *Ψ ₀₄ Neve	-	-	-	-	-	-	0.75
2	Azione variabile principale: Manutenzione categoria H	Y _{G1}	1.3	-	-	-	-	-	-
		Y _{G2}	-	1.5	-	-	-	-	-
		Y _{G3}	-	-	1.5	-	-	-	-
		Y _{Q1} Manutenzione	-	-	-	0	-	-	-
		Y _{Q2} *Ψ ₀₂ Sovraccarico	-	-	-	-	1.05	-	-
		Y _{Q3} *Ψ ₀₃ Vento	-	-	-	-	-	0.9	-
		Y _{Q4} *Ψ ₀₄ Neve	-	-	-	-	-	-	0.75
3	Azione variabile principale: Vento	Y _{G1}	1.3	-	-	-	-	-	-
		Y _{G2}	-	1.5	-	-	-	-	-
		Y _{G3}	-	-	1.5	-	-	-	-
		Y _{Q1} vento	-	-	-	1.5	-	-	-
		Y _{Q2} *Ψ ₀₂ Manutenzione	-	-	-	-	0	-	-
		Y _{Q3} *Ψ ₀₃ Sovraccarico	-	-	-	-	-	1.05	-
		Y _{Q4} *Ψ ₀₄ Neve	-	-	-	-	-	-	0.75
4	Azione variabile principale: Neve	Y _{G1}	1.3	-	-	-	-	-	-
		Y _{G2}	-	1.5	-	-	-	-	-
		Y _{G3}	-	-	1.5	-	-	-	-
		Y _{Q1} Neve	-	-	-	1.5	-	-	-
		Y _{Q2} *Ψ ₀₂ Manutenzione	-	-	-	-	0	-	-
		Y _{Q3} *Ψ ₀₃ Sovraccarico	-	-	-	-	-	1.05	-
		Y _{Q4} *Ψ ₀₄ vento	-	-	-	-	-	-	0.9

Figura 225: Combinazioni allo SLU con coefficienti parziali azioni.

7.3.7. Combinazione dei carichi in Robot

Le combinazioni dei carichi possono essere gestite in maniera automatica o manualmente. Per esercitare maggior controllo sui carichi applicati con i relativi coefficienti si è optato per la seconda modalità.

Una volta definiti ed applicati i carichi sulla struttura, si può procedere alla loro combinazione alla voce *Carichi- Combinazioni manuali*.

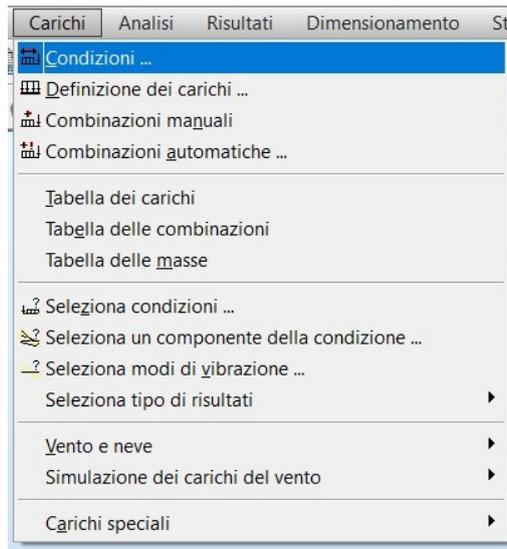


Figura 226: Combinazioni manuali in Robot.

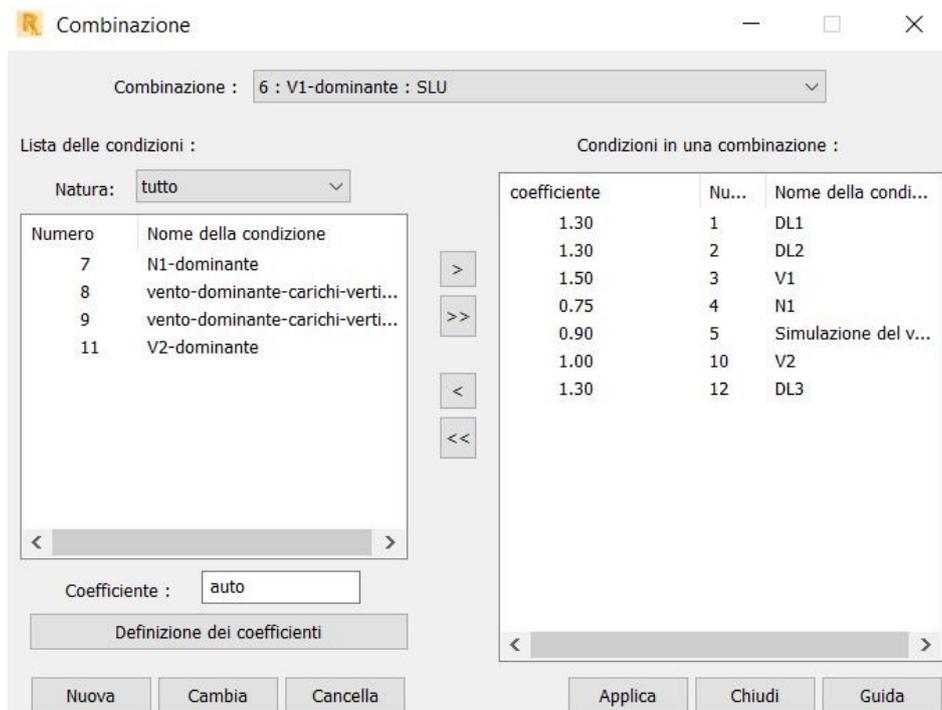


Figura 227: Coefficienti combinazione V1 dominante.

7.3.8. Diagrammi

Si è poi proceduto al calcolo delle sollecitazioni della struttura: nello specifico allego i risultati relativi al diagramma di momento M_y e la deformata.

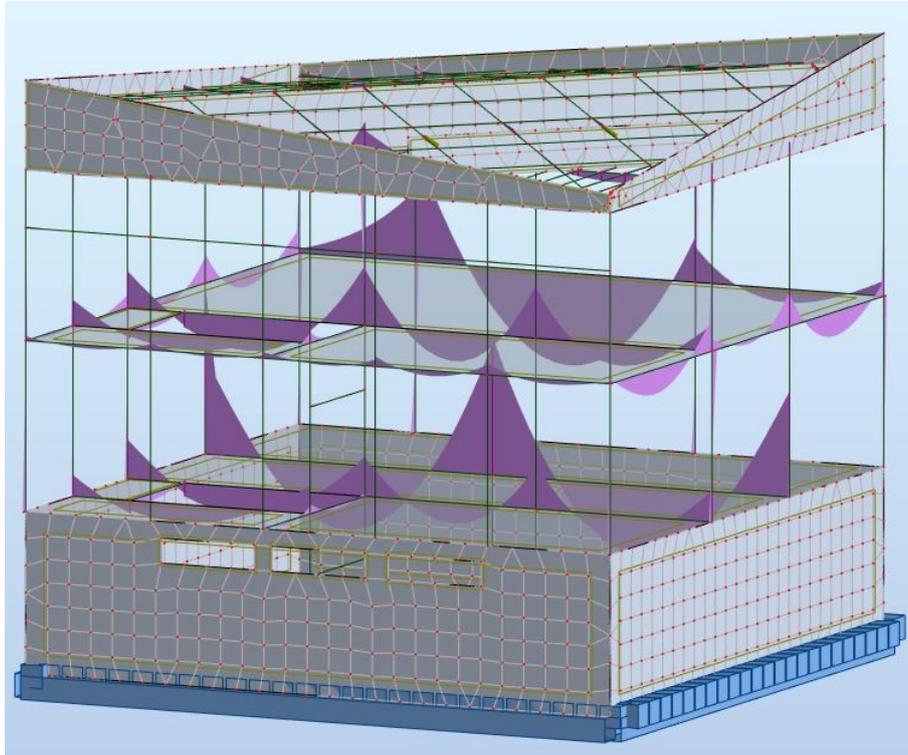


Figura 228: Diagramma di momento M_y per la combinazione di carico 1: sovraccarico categoria C dominante.

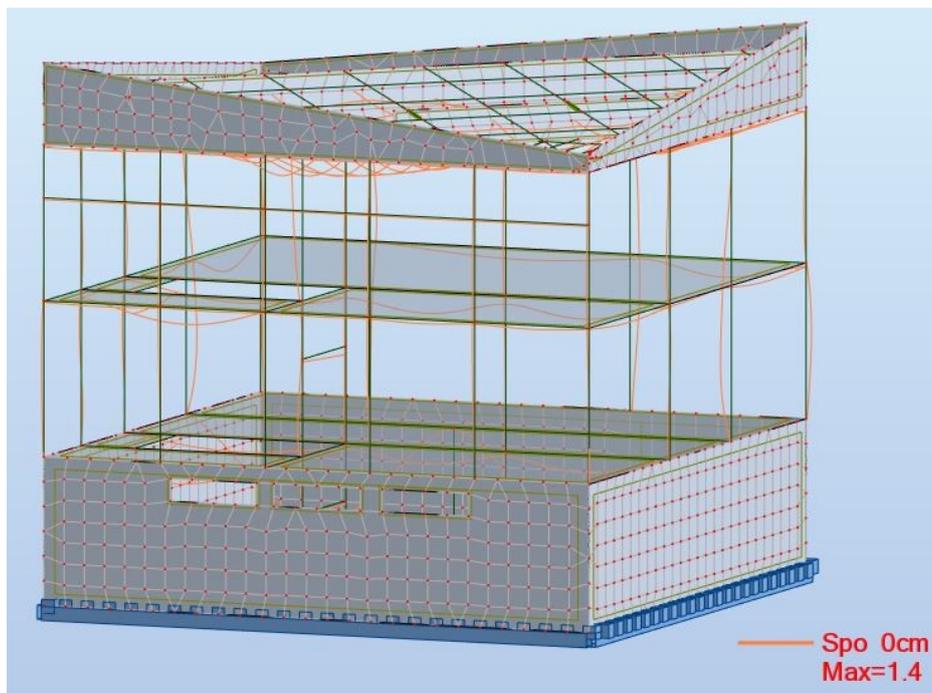


Figura 229: Deformata della struttura per la combinazione di carico 1: sovraccarico categoria C dominante.

7.4. Verifica di alcuni elementi strutturali

Prima di procedere alla descrizione delle verifiche effettuate e dei risultati ottenuti, è doveroso ricordare che sono state fatte delle assunzioni a scopo didattico e quindi le verifiche non possiedono alcuna valenza ufficiale. Per l'analisi degli elementi si sono impiegate le informazioni provenienti dal rilievo strutturale e quelle relative alle carpenterie. Sono stati accertati due travi e due pilastri eseguendo un'analisi allo SLU.

7.4.1. Cenni teorici

7.4.1.1. Verifica a pressoflessione

Per la verifica degli elementi si è fatto riferimento alla normativa NTC 2008 al Capitolo 4.1.2.

Considerando una sezione pressoinflessa, la verifica di resistenza si esegue controllando che:

$$M_{Rd} = M_{Rd}(N_{Ed}) \geq M_{Ed}$$

Dove:

- M_{Rd} : valore di momento resistente corrispondente a N_{Ed} ;
- N_{Ed} : valore di calcolo della componente assiale (sforzo normale) dell'azione;
- M_{Ed} : valore di calcolo della componente flettente dell'azione.

Nel caso di pilastri soggetti a pressoflessione deviata la verifica della sezione segue la seguente formula:

$$\left(\frac{M_{E_{yd}}}{M_{R_{yd}}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{E_{zd}}}{M_{R_{zd}}} \right)^\alpha \leq 1$$

Con:

- $M_{E_{yd}}$ e $M_{E_{zd}}$: valori di calcolo delle componenti di flessione retta dell'azione intorno agli assi z e y ;
- $M_{R_{yd}}$ e $M_{R_{zd}}$: valori di calcolo dei momenti resistenti e componenti di pressoflessione retta corrispondenti a N_{Ed} valutati separatamente intorno agli assi z e y ;

α è il fattore che dipende dalla geometria della sezione e in mancanza di informazioni si può porre in maniera cautelativa pari a 1.

Per ogni posizione notevole dell'asse neutro, il luogo dei punti di coordinate (N_{rd}, M_{rd}) forma, nel piano N-M, una curva chiusa che viene definita dominio di resistenza della sezione: la frontiera rappresenta la condizione limite di uguaglianza tra azione sollecitante e resistente, l'insieme dei punti (N_{sd}, M_{sd}) all'interno del confine sono quelli per cui la verifica è soddisfatta viceversa quelli fuori. Il dominio di resistenza dipende dalle caratteristiche geometriche della sezione in calcestruzzo, dal quantitativo di armatura presente e dalle caratteristiche meccaniche dei materiali.

7.4.1.2. Verifica a taglio

La resistenza a taglio V_{Rd} degli elementi strutturali con armatura trasversale viene affrontata tramite un modello fittizio a traliccio in cui gli elementi resistenti sono: armature trasversali, armature longitudinali, corrente compresso in calcestruzzo e puntoni d'anima inclinati.

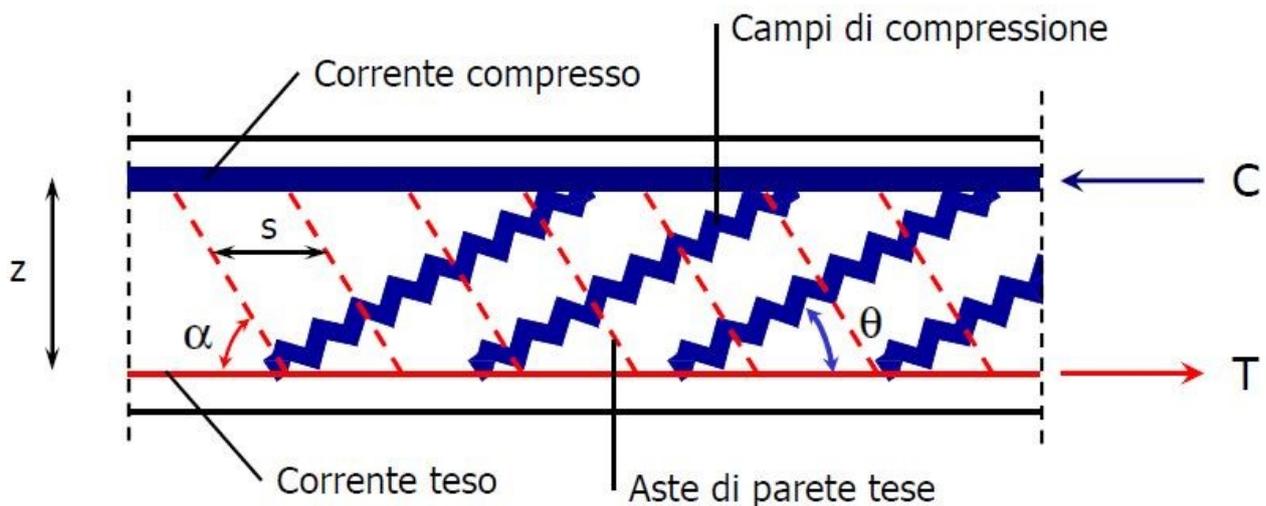


Figura 230: Comportamento a traliccio dell'elemento strutturale armato a taglio.

Fonte: corso di Teoria e progetto delle costruzioni in c.a. e c.a. precompresso.

L'inclinazione θ dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve essere compresa tra i due limiti:

$$1 \leq \text{ctg } \theta \leq 2.5$$

La verifica di resistenza SLU è soddisfatta quando:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

Dove V_{Ed} è il valore di calcolo dello sforzo tagliante mentre V_{Rd} è quello resistente.

Quest'ultimo viene definito come il minimo valore tra la resistenza di calcolo a "taglio trazione" e a "taglio compressione".

$$V_{Rd} = \min(V_{Rds}, V_{Rcd})$$

La resistenza di calcolo a "taglio trazione" si calcola come:

- $V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot \sin \alpha$

Mentre la resistenza di calcolo a "taglio compressione" come:

- $V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \frac{\cot \alpha + \cot \theta}{(1 + \cot^2 \theta)}$

Con:

- ✓ d: altezza utile della sezione [mm];
- ✓ $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$: tensione media di compressione della sezione ($\leq 0.2 f_{cd}$);
- ✓ b_w : larghezza minima della sezione [mm];
- ✓ A_{sw} : area dell'armatura trasversale;
- ✓ s: interasse tra le staffe;
- ✓ α : angolo di inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse della trave;
- ✓ f'_{cd} : resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima ($f'_{cd} = 0.5 f_{cd}$);
- ✓ α_c : coefficiente maggiorativo pari a:
 - 1 per membrane non compresse;
 - $1 + \sigma_{cp}/f_{cd}$ per $0 < \sigma_{cp} < 0,25 f_{cd}$
 - 1,25 per $0,25 f_{cd} < \sigma_{cp} < 0,5 f_{cd}$
 - $2,5(1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$ per $0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd}$

7.4.2. Elementi indagati

Si sono indagati i seguenti elementi:

1. Pilastro 43 Piano terra.
2. Pilastro 15 Piano terra.
3. Trave 85 Piano terra.
4. Trave 90 Piano terra.

Per quel che riguarda la disposizione e lo spessore delle armature sono stati utilizzati i dati ricavati dal rilievo insieme a quelli noti da carpenteria. Lo stesso procedimento è stato impiegato per il copri ferro. Nel caso in cui il numero di barre rilevato fosse maggiore rispetto a quello definito da carpenteria è stato utilizzato il numero maggiore.

1. Pilastro 43 Piano terra

Al fine di compiere la verifica del seguente pilastro sono state impiegate sia le informazioni provenienti dal rilievo strutturale sia quelle dalle carpenterie.

→ Informazioni da rilievo strutturale:

Rilievo strutturale						
N° elemento	Livello di riferimento	Numero barre	c' medio barra	c' medio staffa	s medio barra	s medio staffa
[/]	[/]	[/]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
43	PT_ED_CENTRALE	4	28 mm	22	220	150

Figura 231: Dati ottenuti tramite rilievo strutturale in situ per il pilastro 43.

Per quanto riguarda il c' medio, poiché sul software si andrà ad inserire un unico valore, è stata fatta una media tra quello delle barre e delle staffe, ottenendo 23 mm.

→ Informazioni da carpenteria:

colonne	sez.	ferri	fasce e controfasce ϕ 6 ogni 0.25	n.co.
42-43	30/30	1) 4-12-400	(26) 1) 2) 13-6-770	2

Figura 232: Armatura pilastro 43 da carpenteria.

2. Pilastro 15 Piano terra

Al fine di compiere la verifica del seguente pilastro sono state impiegate sia le informazioni provenienti dal rilievo strutturale sia quelle dalle carpenterie.

→ Informazioni da rilievo strutturale:

Rilievo strutturale						
N° elemento	Livello di riferimento	Numero barre	c' medio barra	c' medio staffa	s medio barra	s medio staffa
[/]	[/]	[/]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
15	PT_ED_CENTRALE	4	30 mm	25	220	180

Figura 233: Dati ottenuti tramite rilievo strutturale in situ per il pilastro 43.

Per quanto riguarda il c' medio, poiché sul software si andrà ad inserire un unico valore, è stata fatta una media tra quello delle barre e delle staffe, ottenendo 23 mm.

→ Informazioni da carpenteria:

colonne	sez.	ferri	fascie e controfascie ϕ 6 ogni 0.25	n. co
15-20-23	30/30	1) 4-12-450	2) 13-6-110	3

Figura 234: Armatura pilastro 43 da carpenteria.

3. Trave 85 Piano Terra

Per le travi non è stato predisposto alcun rilievo in situ pertanto, al fine della verifica, si sono utilizzate soltanto le informazioni provenienti dall'archivio.

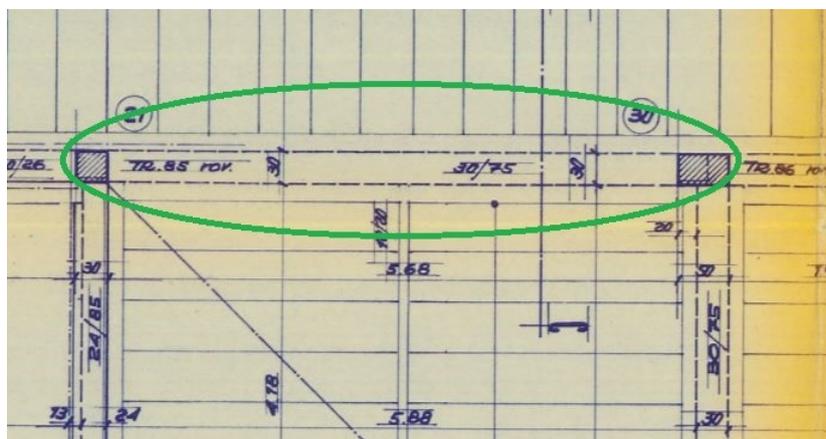


Figura 235: Posizionamento trave 85 Piano Terra.

Armatura longitudinale

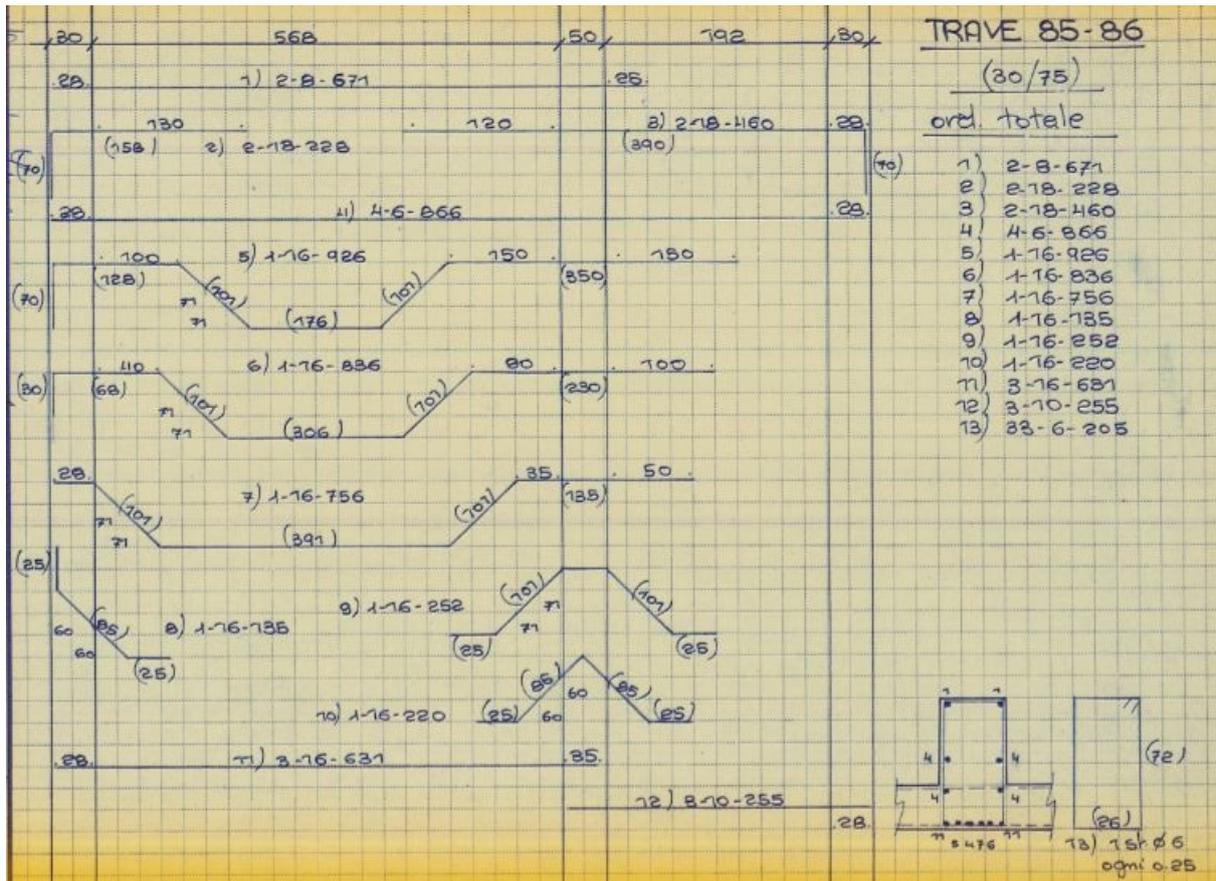


Figura 236: Armatura longitudinale trave 85.

Armatura trasversale

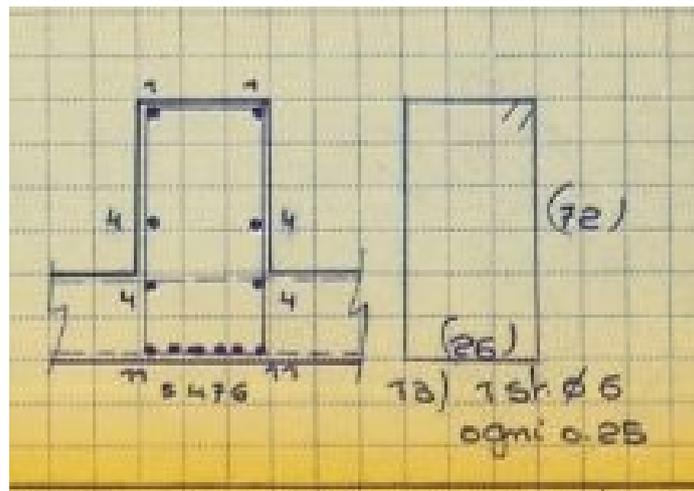


Figura 237: Armatura trasversale da carpenteria trave 85 Piano Terra.

4. Trave 90 Piano Terra

Per le travi non è stato predisposto alcun rilievo in situ pertanto, al fine della verifica, si sono utilizzate soltanto le informazioni provenienti dall'archivio.

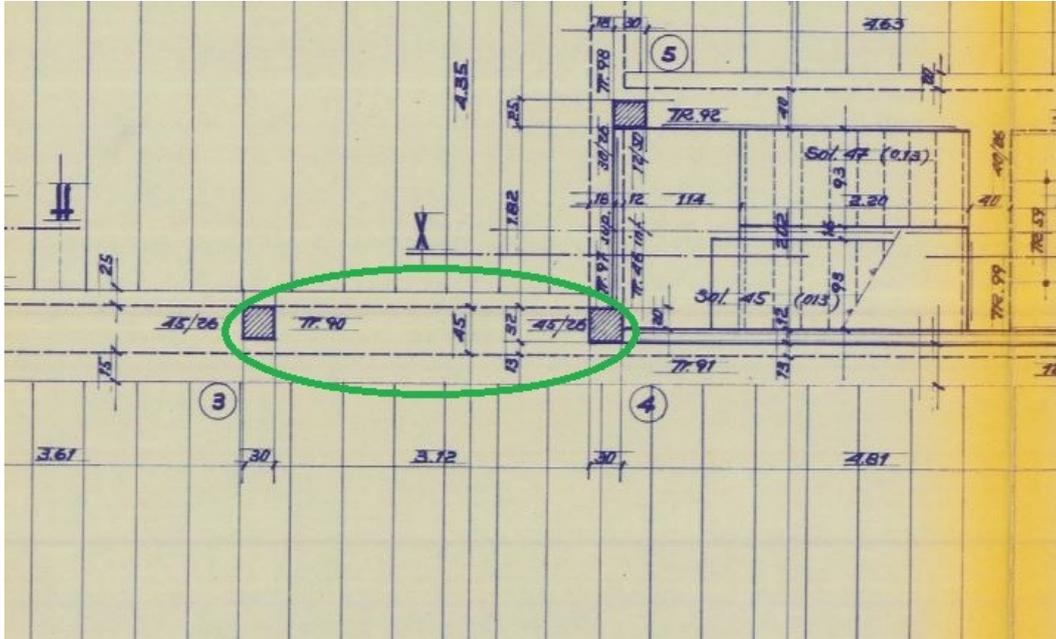


Figura 238: Posizionamento trave 90 Piano Terra.

Armatura longitudinale

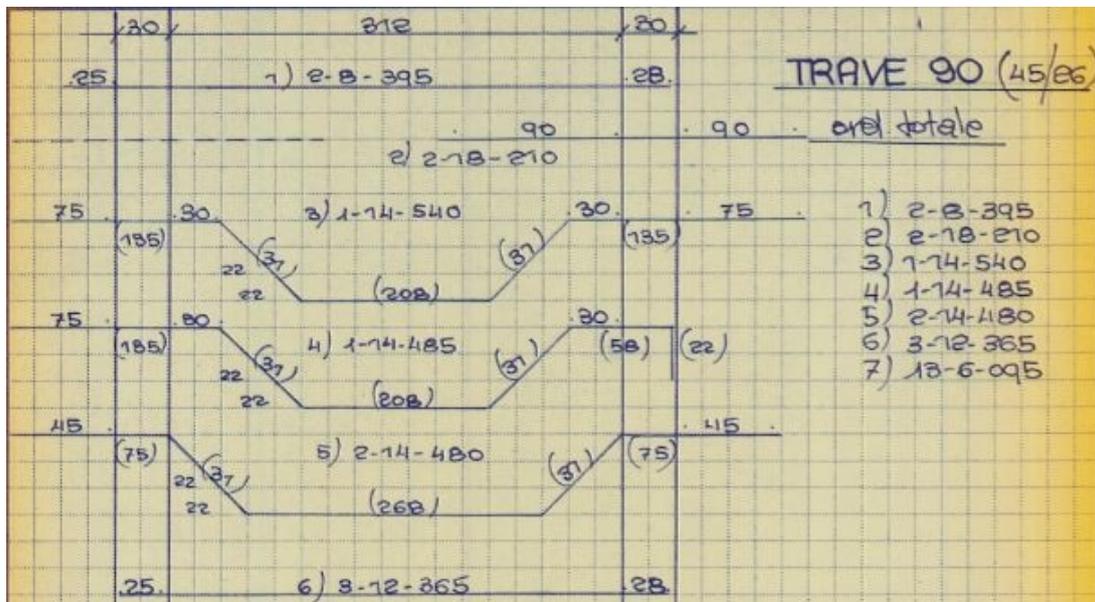


Figura 239: Armatura longitudinale trave 90.

Armatura trasversale

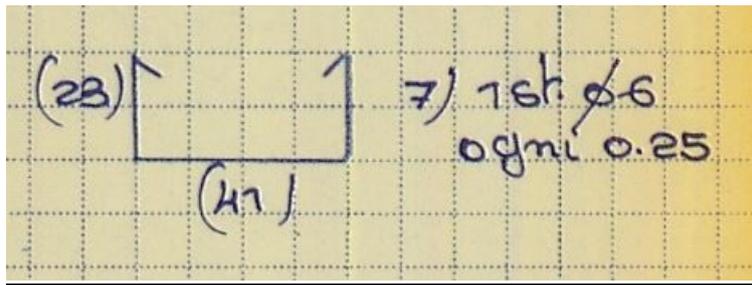


Figura 240: Armatura trasversale trave 90.

Impostazione dei materiali

I materiali impiegati al fine delle verifiche sono i seguenti:

- Calcestruzzo C28/35;
- Acciaio B450C.

VERIFICA PILASTRO 43

Per svolgere la verifica a pressoflessione del pilastro bisogna innanzitutto inserire l'armatura di progetto. A tal fine è necessario selezionare il pilastro da testare e aggiungere l'armatura con il comando *Armatura reale elementi C.A.*

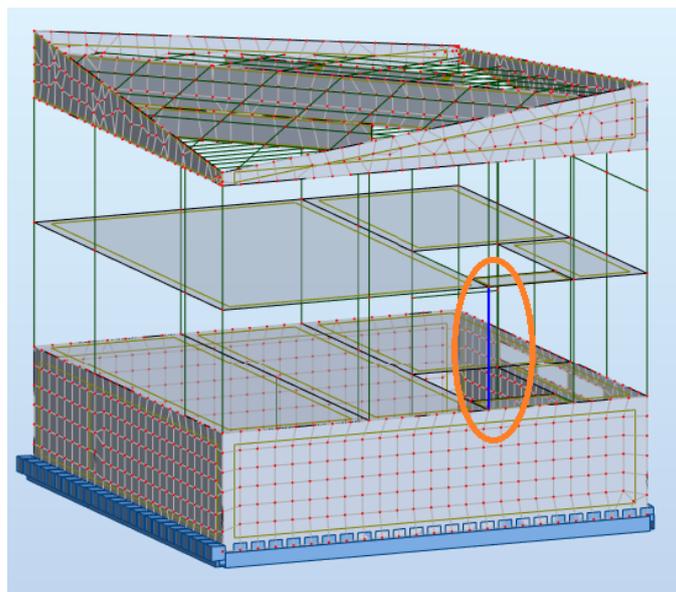


Figura 241: Selezione pilastro e inserimento armatura.

Per procedere all'inserimento dei ferri, Robot richiede le combinazioni di calcolo da considerare per svolgere la verifica. Al fine di analizzare il pilastro per i massimi valori di sollecitazione possibile

si sono spuntate tutte le condizioni manuali impostate e analizzate all'inizio del capitolo di modo da verificare la sezione per tutte quante.

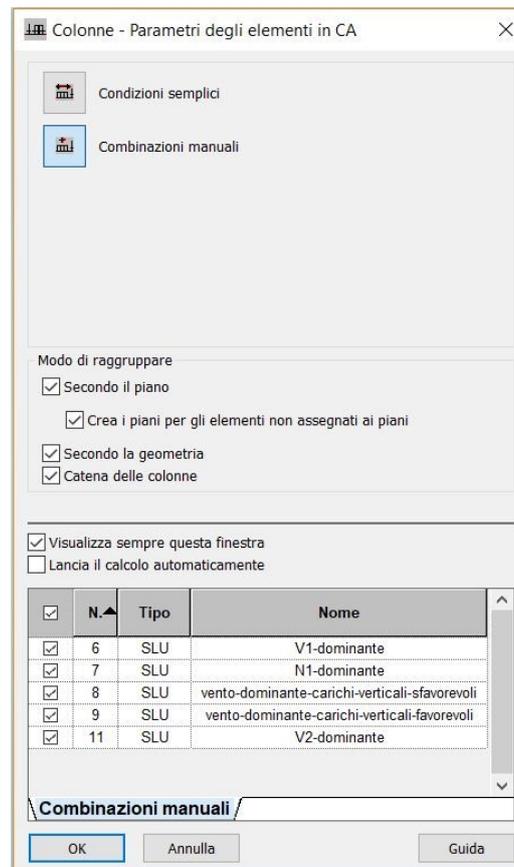


Figura 242: Combinazioni di carico considerate per la verifica.

In seguito è possibile aggiungere barre e staffe. Come si può osservare nella seguente immagine, per le prime il software richiede il diametro, il materiale e il numero di elementi.

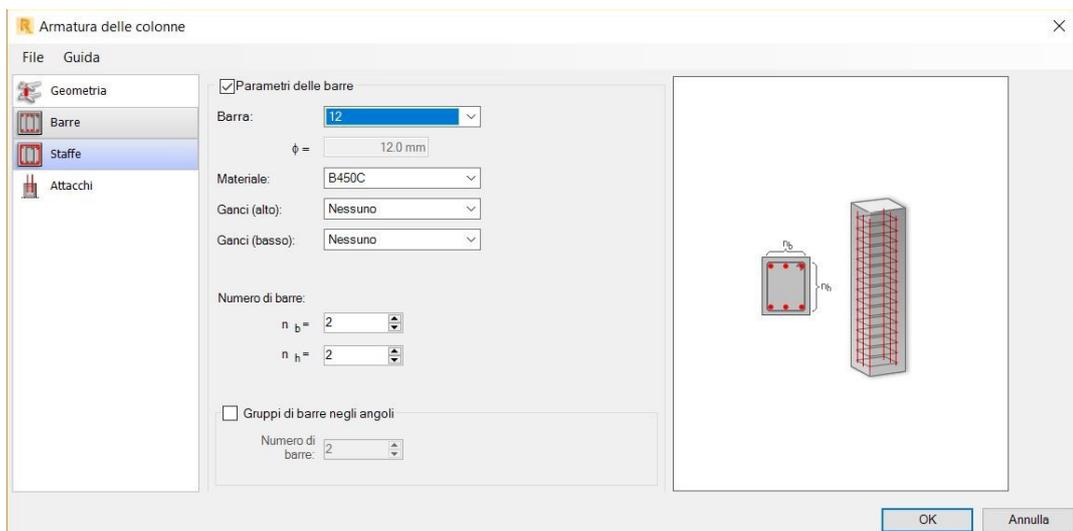


Figura 243: Inserimento barre longitudinali pilastro 43.

Per l'armatura trasversale il procedimento è simile: si imposta il diametro, il materiale e l'interasse. Si aggiungono inoltre le informazioni riguardo il copriferro, il tipo di ripartizione e il tipo di staffa.

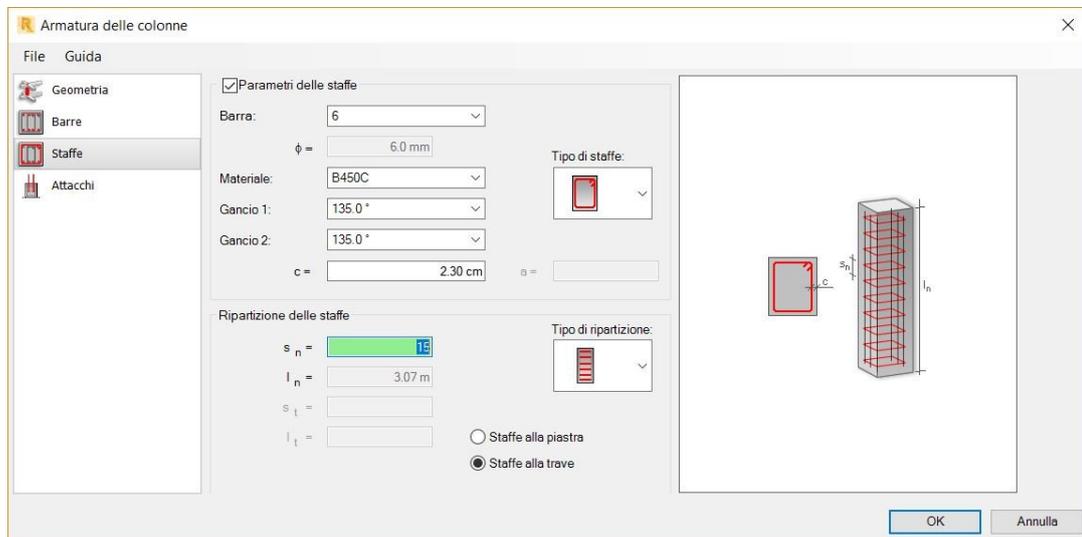


Figura 244: Inserimento staffe pilastro 43.

Lo stesso iter è stato applicato anche all'altro pilastro.

Dopo aver fatto il calcolo possiamo osservare:

a) Diagramma di interazione

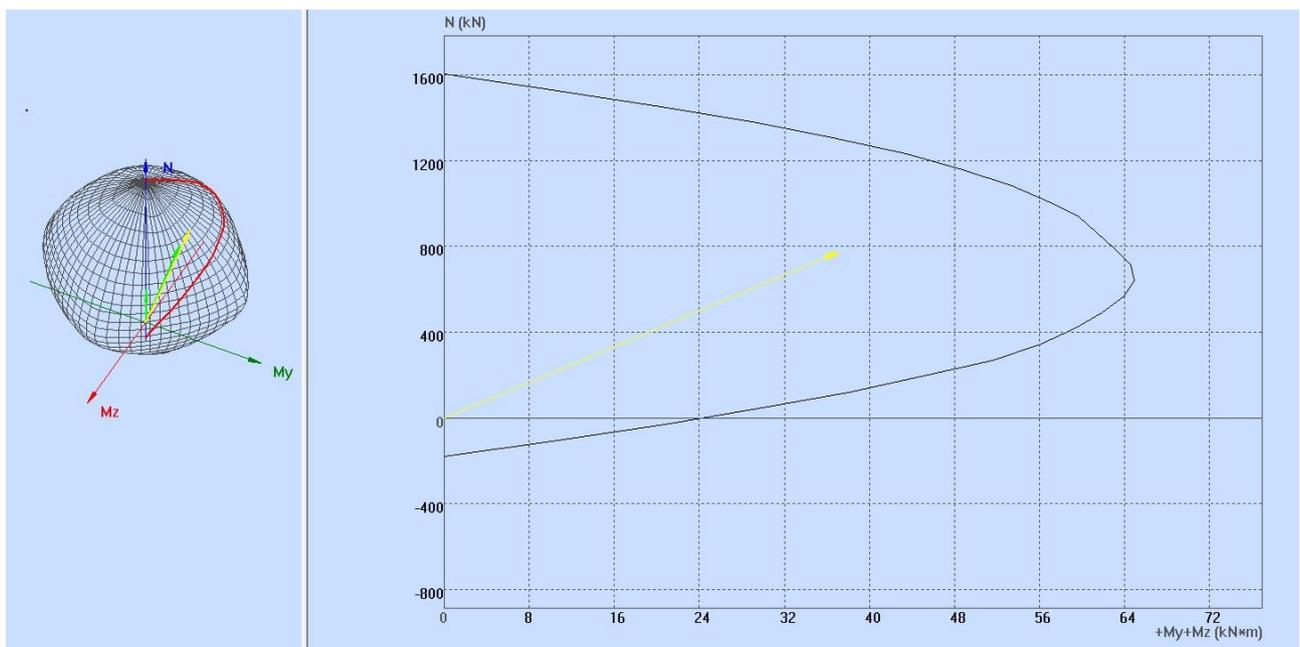
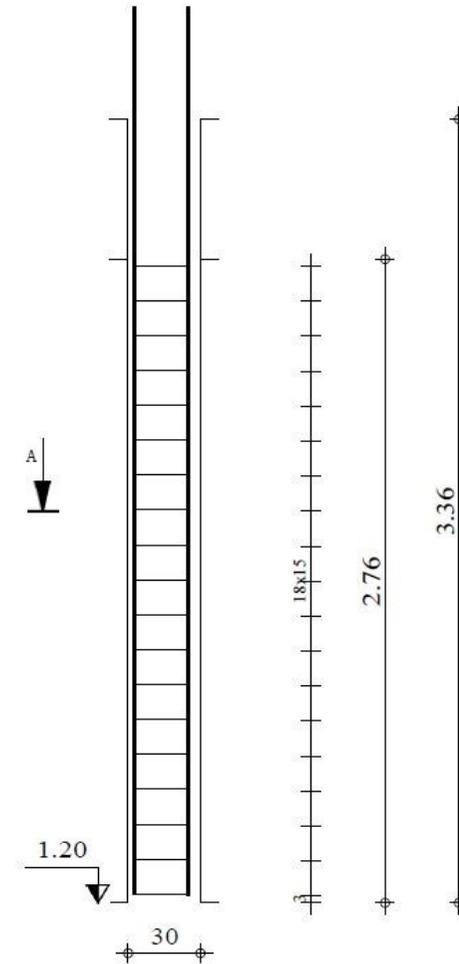
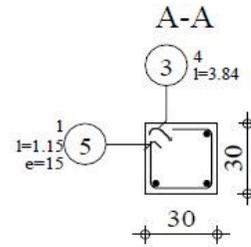


Figura 245: Diagramma di interazione P43.

b) Tavola ferri

Pos.	Armatura	Cod	Forma	Acciaio
③	4	l=3.84	00 	B450C
⑤	19	l=1.15		B450C



 Tel. _____ Fax _____

3 m
Colonna 43
 Diametro massimo inerte : 20mm Copriferro 2.3 cm
 Classe dell'ambiente : X0
 Consistenza : S1
 Numero 1 Pagina 1/1

Scala della sezione 1/25 Scala della vista 1/25

Calcestruzzo C28/35 = 0.248 m³ Acciaio B450C = 13.6 kg
 Acciaio B450C = 4.87 kg

c) Nota di calcolo

1 Livello:

- Nome : 43
- Livello di riferimento : -2.00 (m)
- Coefficiente di scorrimento del calcestruzzo : $\varphi_p = 1.70$
- Classe del cemento : N
- Classe dell'ambiente : X0

2 Colonna: Colonna 43

Numero: 11

2.1 Proprietà dei materiali:

- Calcestruzzo : C28/35 $f_{ck} = 28.00$ (MPa)
peso volumetrico : 2500 (kg/m³)
Diametro inerte : 20.0 (mm)
- Armatura longitudinale: : B450C $f_{yk} = 450.00$ (MPa)
Classe di duttilità : C
- Armatura trasversale: : B450C $f_{yk} = 450.00$ (MPa)

2.2 Geometria:

- 2.2.1 Rettangolo 30.0 x 30.0 (cm)
- 2.2.2 Altezza: L = 3.33 (m)
- 2.2.3 Spessore della piastra = 0.00 (m)
- 2.2.4 Altezza della trave = 0.3(m)
- 2.2.5 Copriferro dell'armatura = 2.3 (cm)

2.3 Opzioni di calcolo:

- Calcolo secondo : D.M. 14/01/2008
- Requisiti sismici : Nessun requisito
- Colonna prefabbricata : no
- Predimensionamento : no
- Presa in considerazione della snellezza : si
- Compressione : con flessione
- Staffe : alla piastra
- Più di 50 % dei carichi applicati: dopo 90-mo giorno
- Classe della resistenza al fuoco : Nessun requisito

2.4 Carichi:

Condizione Natura	Gruppo	γ_f	N (kN)	My(s) (kN*m)	My(i) (kN*m)	Mz(s) (kN*m)	Mz(i) (kN*m)		
V1-dominante	di calcolo(Permanenti)	1	1.00	334.62	0.27	0.25	-10.30	4.51	
N1-dominante	di calcolo(Permanenti)	1	1.00	302.22	0.31	0.21	-9.31	4.24	
vento-dominante-carichi-verticali-sfavorevoli	di calcolo(Permanenti)	1	1.00	301.87	0.67	0.13			
-9.79	6.09								
vento-dominante-carichi-verticali-favorevoli	di calcolo(Permanenti)	1	1.00	226.28	0.74	0.05			
-7.50	5.65								
V2-dominante	di calcolo(Permanenti)	1	1.00	302.22	0.30	0.21	-9.32	4.30	

γ_f - coefficiente di carico

2.5 Risultati di calcolo:

Coefficienti di sicurezza $R_d/E_d = 7.53 > 1.0$

2.5.1 Analisi SLU

Combinazione dimensionante: V1-dominante (C)

Forze sezionali:

$$N_{sd} = 334.62 \text{ (kN)} \quad M_{sdy} = 0.26 \text{ (kN*m)} \quad M_{sdz} = -4.37 \text{ (kN*m)}$$

Forze dimensionanti:

sezione al centro della colonna

$$N = 334.62 \text{ (kN)} \quad N^*etotz = 6.69 \text{ (kN*m)} \quad N^*etoty = -7.05 \text{ (kN*m)}$$

Eccentricità:	ez (My/N)	ey (Mz/N)
statica	eEd: 0.1 (cm)	-1.3 (cm)
Imperfezione	ei: 0.0 (cm)	0.8 (cm)
iniziale	e0: 0.1 (cm)	-0.5 (cm)
totale	etot: 2.0 (cm)	-2.1 (cm)

2.5.1.1. Analisi dettagliata-Direzione Y:

2.5.1.1.1 Analisi della snellezza

Struttura non scorrevole

L (m)	Lo (m)	λ	λ_{lim}	Colonna snella
3.20	3.20	42.64	32.78	

2.5.1.1.2 Analisi di instabilità

$$M_2 = 0.27 \text{ (kN*m)} \quad M_1 = 0.25 \text{ (kN*m)} \quad M_{mid} = 0.26 \text{ (kN*m)}$$

Condizione: sezione al centro della colonna, influenza della snellezza presa in considerazione

$$M_0 = M_{0e} = 0.6*M_2 + 0.4*M_1 = 0.26 \text{ (kN*m)}$$

$$M_{0emin} = 0.4*M_2$$

$$e_a = 0.0 \text{ (cm)}$$

Metodo di rigidezza nominale

$$\left[1 + \frac{\beta}{\left(\frac{N_B}{N} \right) - 1} \right] = 1.12$$

$$\beta = 1.23$$

$$N_b = (\pi^2 * EJ) / l_0^2 = 3639.03 \text{ (kN)}$$

$$EJ = K_c * E_{cd} * J_c + K_s * E_s * J_s = 3775.60 \text{ (kN*m}^2\text{)}$$

$$\varphi_{ef} = 1.70$$

$$J_c = 109850.0 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$J_s = 0.0 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$K_c = 0.13 \text{ ()}$$

$$K_s = 0.00 \text{ ()}$$

$$= 6.69 \text{ (kN*m)}$$

2.5.1.2. Analisi dettagliata-Direzione Z:

$$M_2 = 4.51 \text{ (kN*m)} \quad M_1 = -10.30 \text{ (kN*m)} \quad M_{mid} = -4.37 \text{ (kN*m)}$$

Condizione: sezione al centro della colonna, snellezza non presa in considerazione

$$M_0 = M_{0e} = 0.6*M_2 + 0.4*M_1 = -4.37 \text{ (kN*m)}$$

$$M_{0emin} = 0.4*M_2$$

$$e_a = \theta_1 * l_0 / 2 = 0.8 \text{ (cm)}$$

$$\theta_1 = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m = 0.01$$

$$\theta_0 = 0.01$$

$$\alpha_h = 1.00$$

$$\alpha_m = (0.5(1+1/m))^{0.5} = 1.00$$

$$m = 1.00$$

$$M_a = N * e_a = 2.68 \text{ (kN*m)}$$

2.5.2 Armatura:

armatura reale

$$A_{sr} = 8.04 \text{ (cm}^2\text{)}$$

Densità dell'armatura:

$$\rho = 0.41 \%$$

2.6 Armatura:

Barre principali (B450C):

- 4 ϕ 12 l = 3.97 (m)

Armatura trasversale: (B450C):

staffe: 21 ϕ 6 l = 1.96 (m)

3 Riepilogo quantitativo dei materiali:

- Volume del calcestruzzo = 0.60 (m³)
- Cassaforma = 6.20 (m²)
- Acciaio B450C
 - Peso totale = 41.28 (kG)
 - Densità = 68.96 (kG/m³)
 - Diametro medio = 10.2 (mm)
 - Riepilogo dell'armatura:

Diametro	Lunghezza	Peso	Quantità	Peso complessivo
	(m)	(kG)	(pezzi)	(kG)
6	1.96	0.77	21	16.21
12	3.97	6.27	4	25.07

Verifica pilastro 15

Si è proceduto all'inserimento dell'armatura della colonna come esplicito per la colonna 33. Allego in seguito gli step necessari:

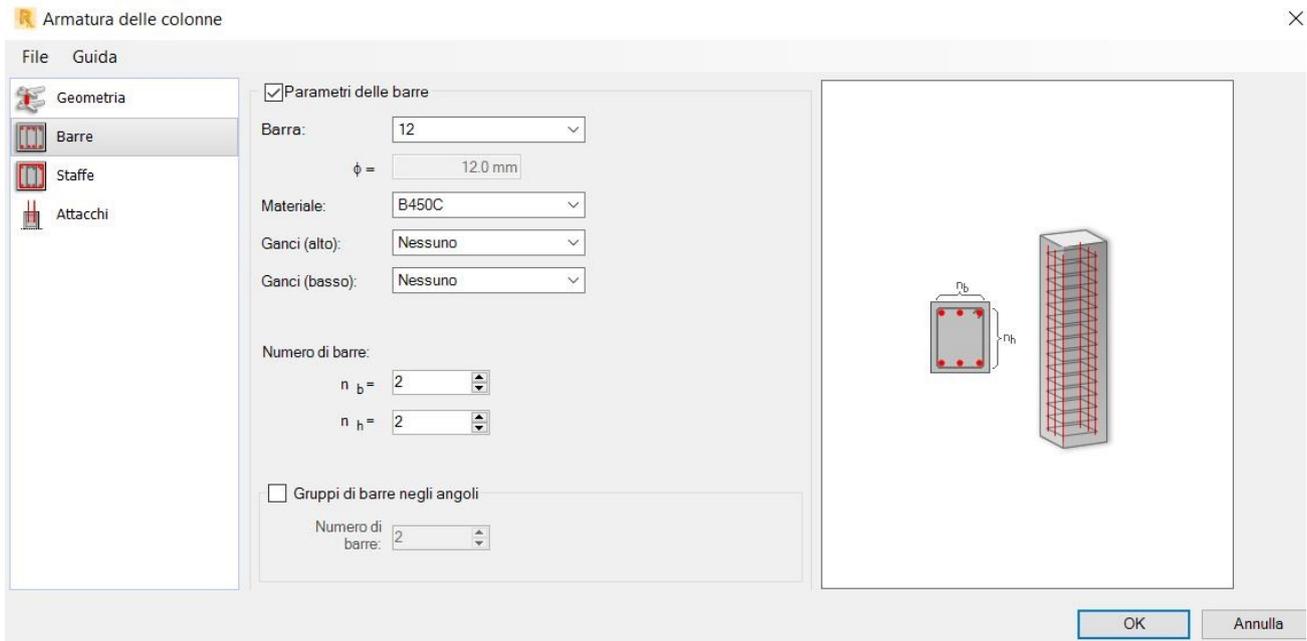


Figura 246: Inserimento armatura longitudinale.

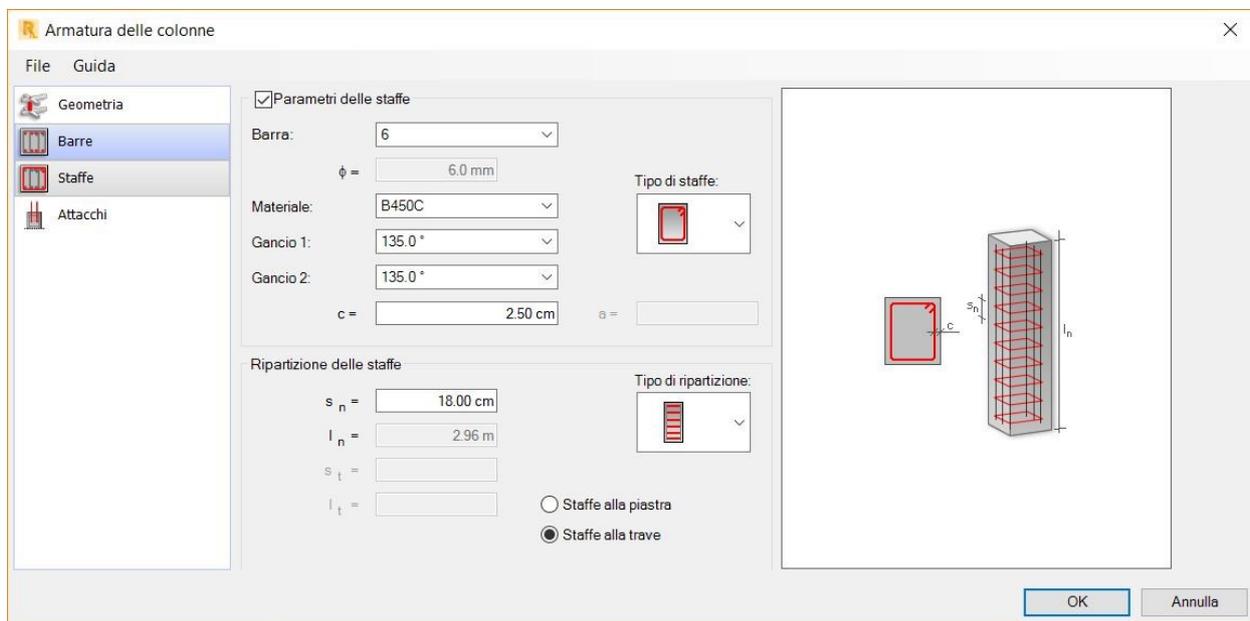


Figura 247: Inserimento armatura trasversale.

Diagramma di interazione

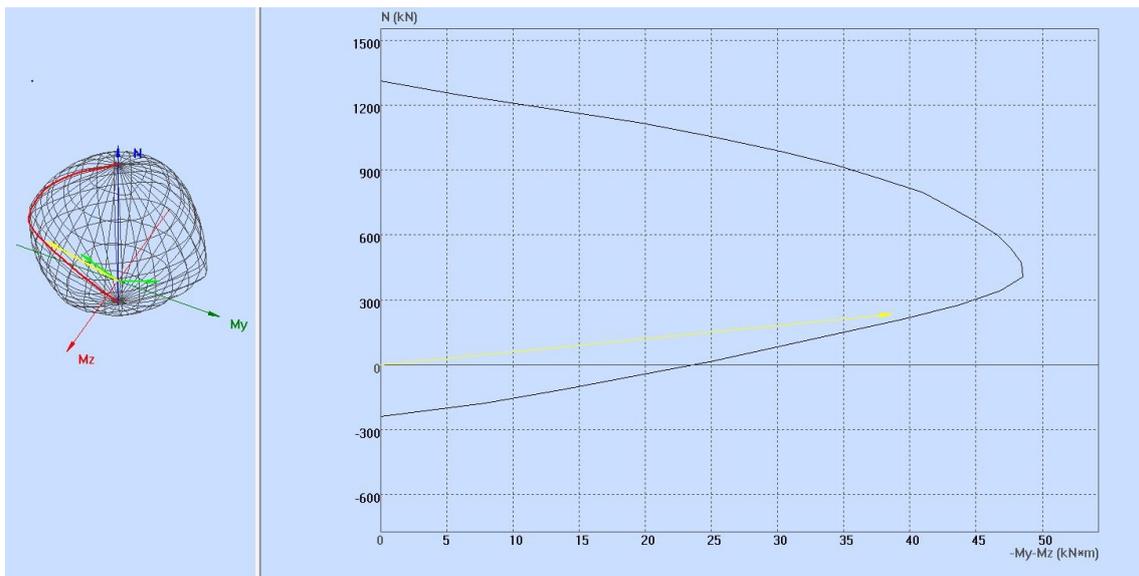


Figura 248: Diagramma interazione P15.

Verifica trave 85

- Inserimento armatura: l'inserimento dell'armatura è stato effettuato in maniera analoga a quella del pilastro.

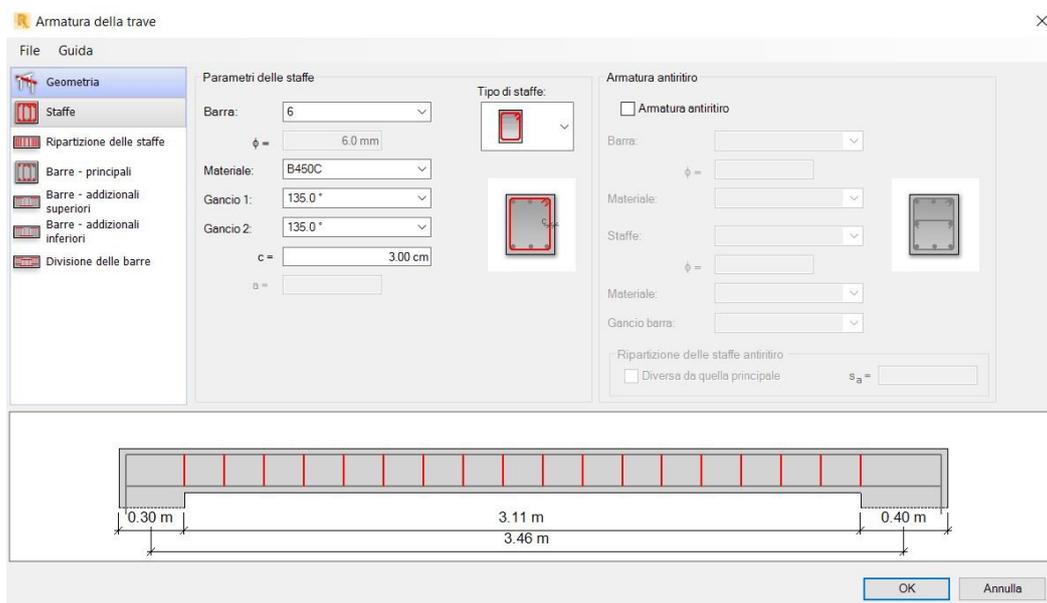


Figura 249: Inserimento armatura trasversale.

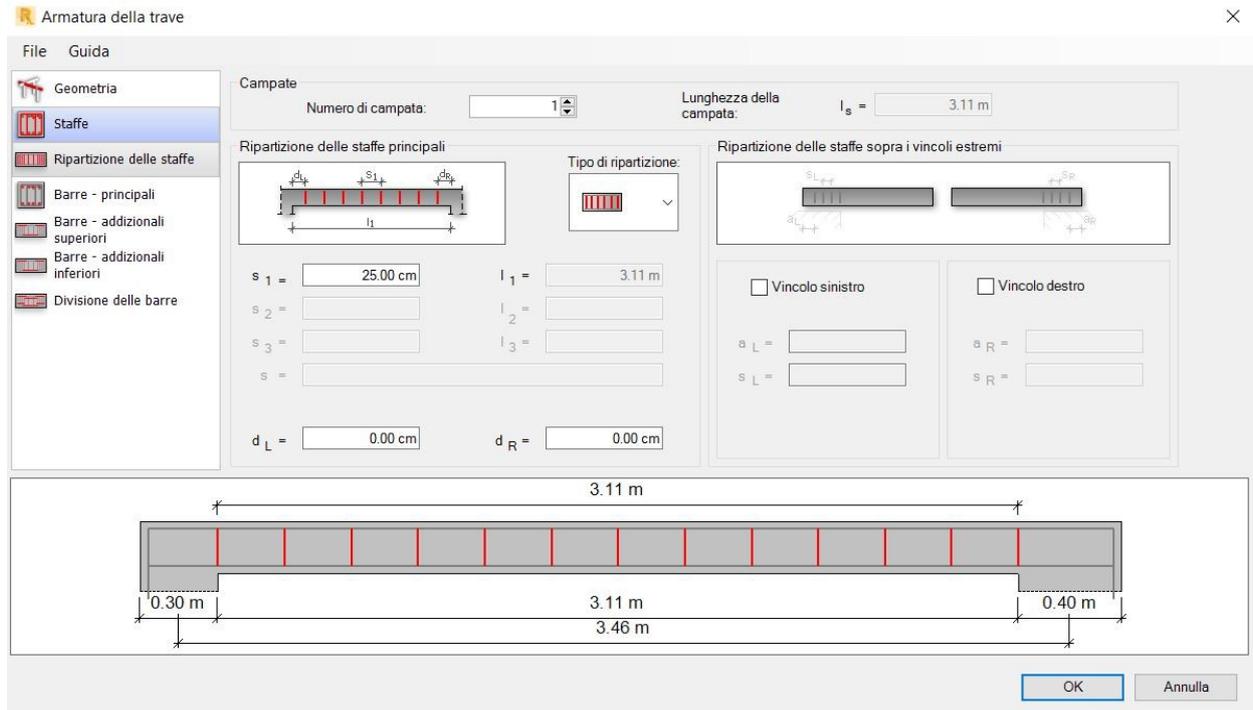


Figura 250: Impostazione ripartizione delle staffe.

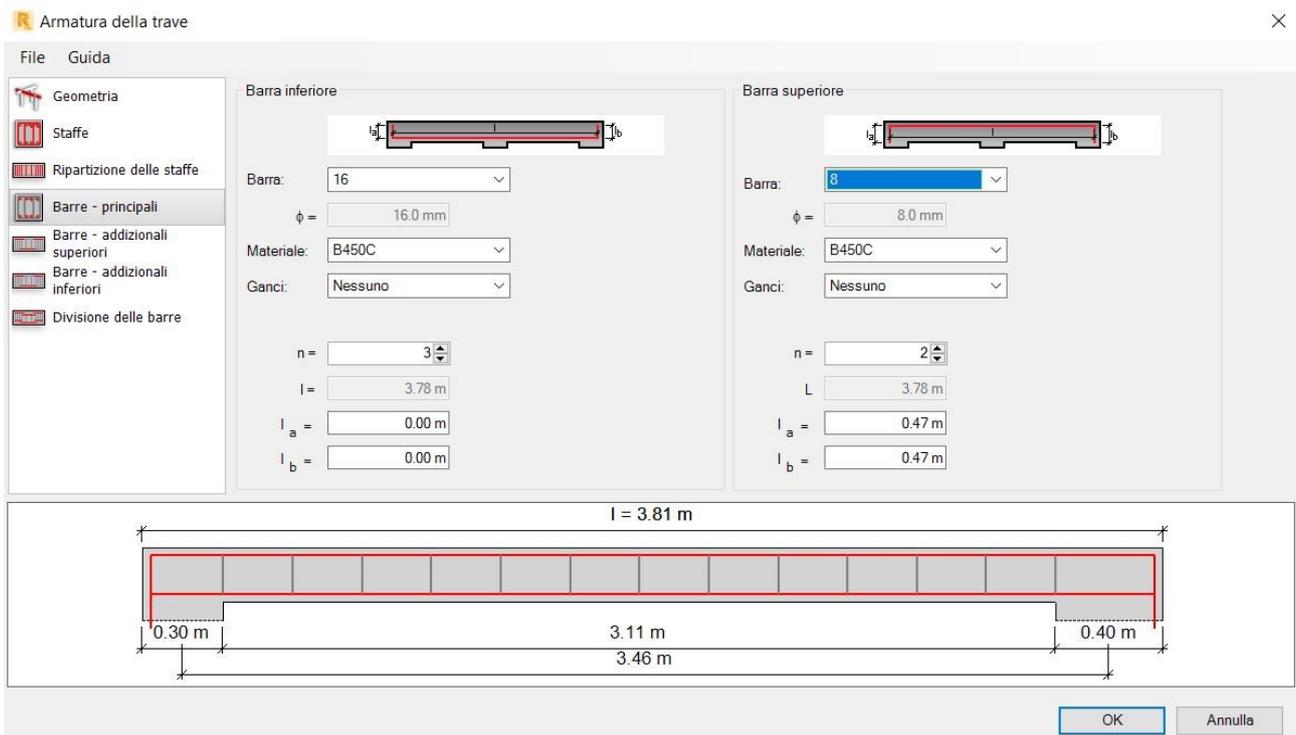


Figura 251: Definizione delle barre longitudinali di armatura principali.

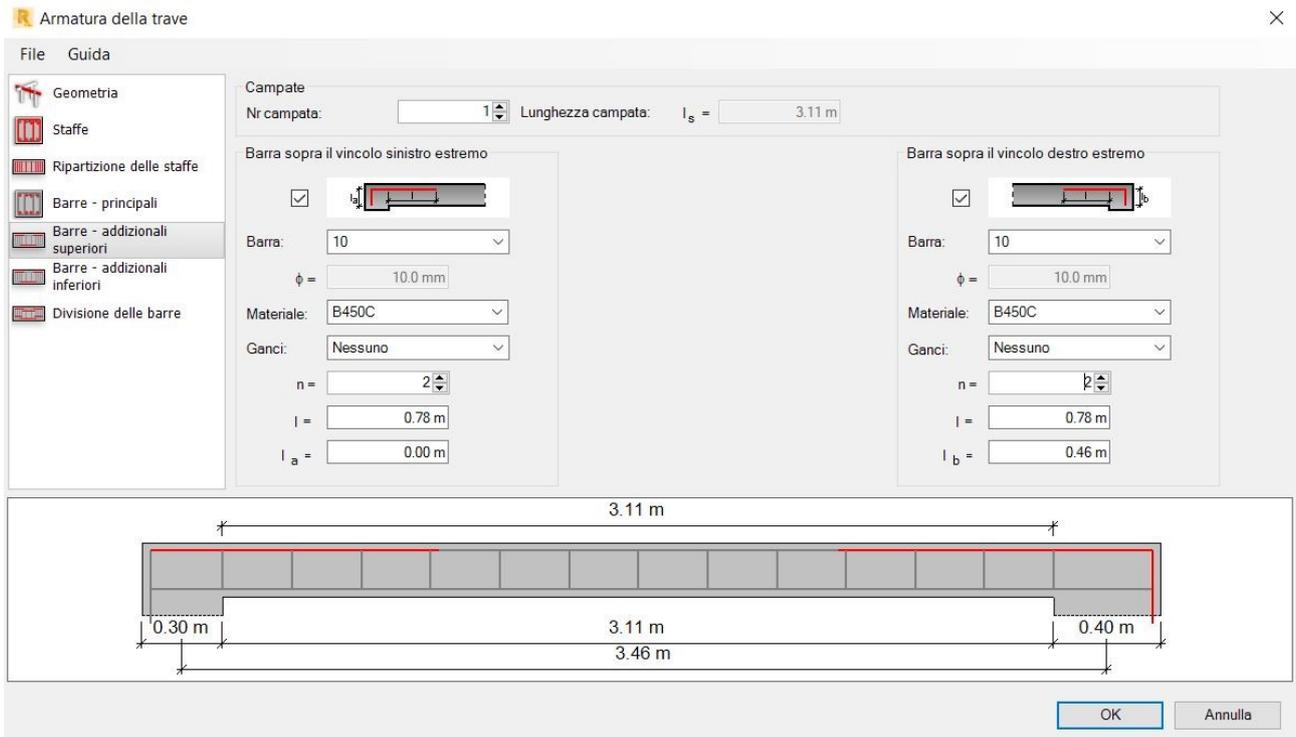


Figura 252: Inserimento barre longitudinali addizionali superiori.

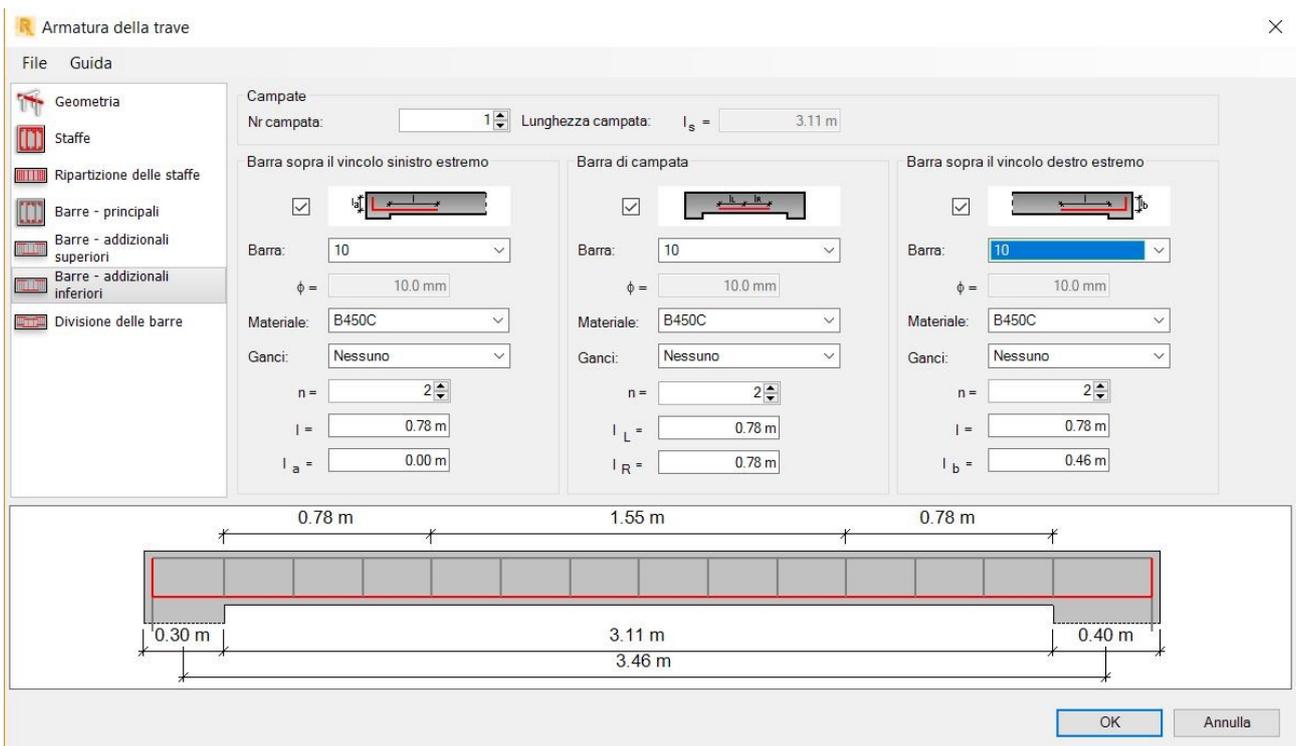


Figura 253: Inserimento barre longitudinali secondarie inferiori.

Dominio di resistenza

Nel caso delle travi la verifica viene compiuta ascissa per ascissa a partire dal valore di sollecitazione rispetto a quello resistente. Nelle seguenti diagrammi si possono osservare in colore rosso il valore resistente mentre in marrone il valore sollecitante.

La verifica di tutte le sezioni è garantita quando:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

Come si può vedere nei seguenti diagrammi tutte le sollecitazioni sono comprese nel dominio di resistenza.

- **Momento flettente**

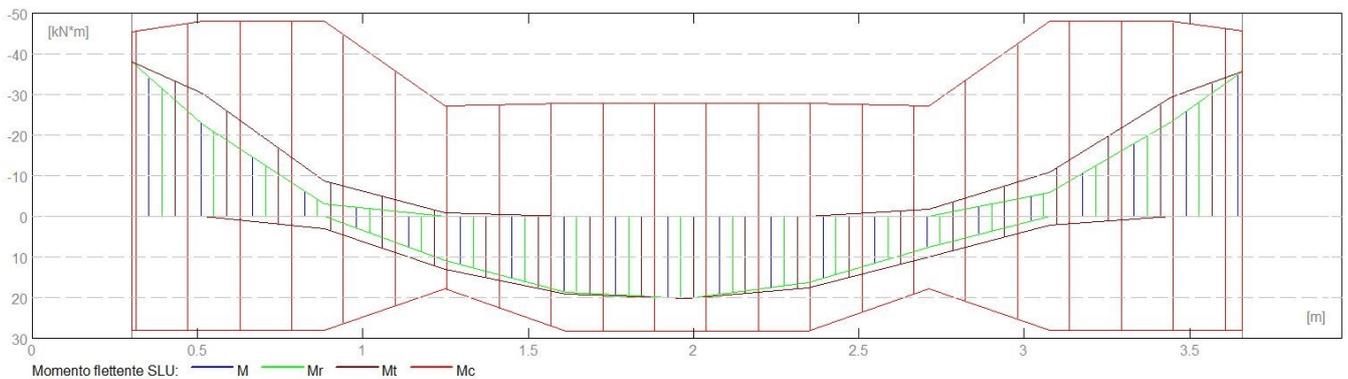


Figura 254: Dominio di resistenza a flessione della trave 85.

- **Taglio**

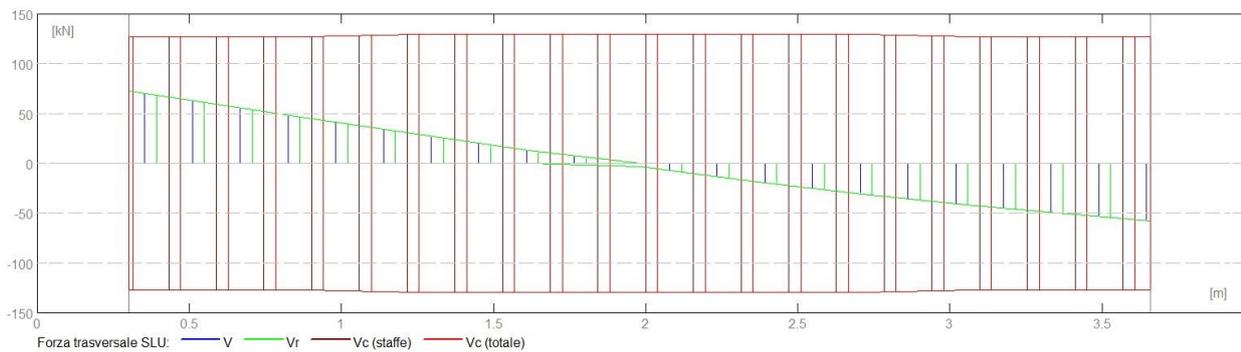


Figura 255: Dominio di resistenza a taglio della trave 85.

Verifica trave 90

anche per questa trave è stata aggiunta l'armatura e si è verificato che le sollecitazioni fossero comprese nel dominio di resistenza: entrambe sono state garantite per la sollecitazione di flessione e taglio.

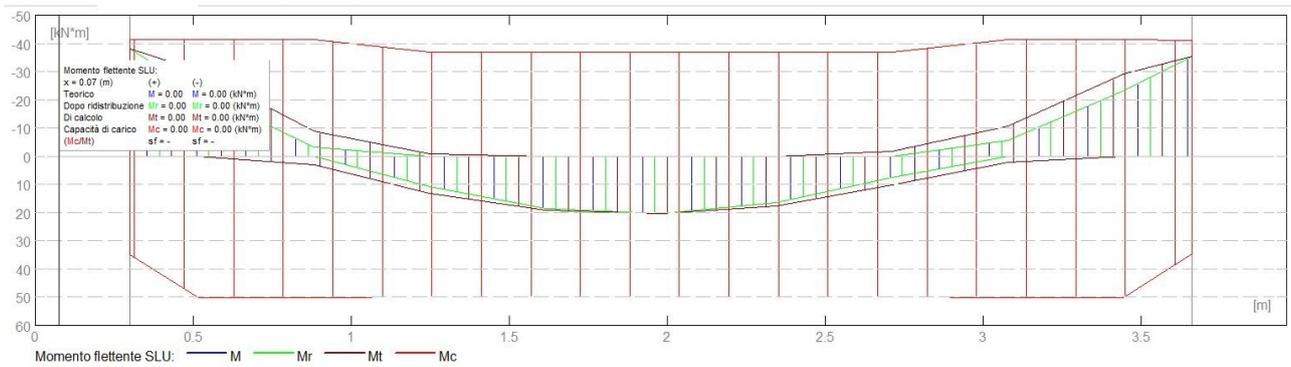


Figura 256: Dominio di resistenza a flessione della trave 90.

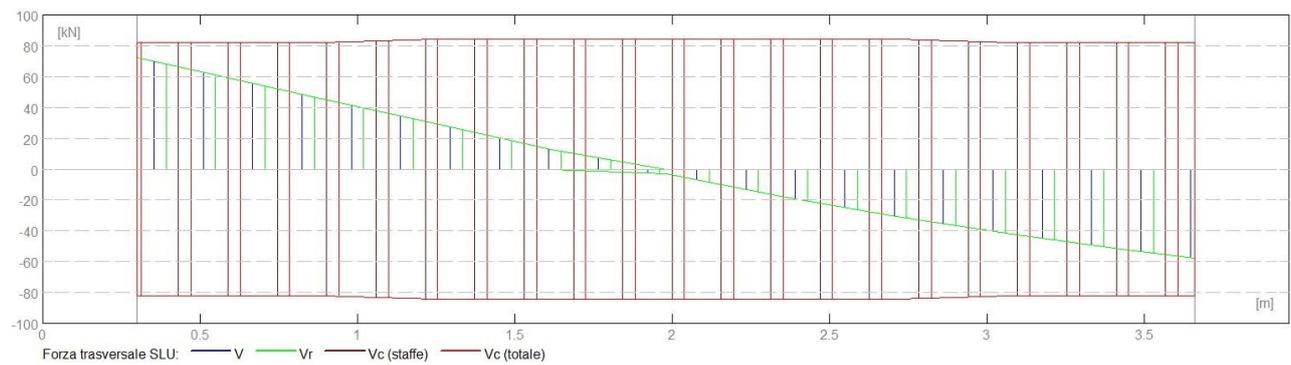


Figura 257: Dominio di resistenza a taglio della trave 90.

8. Risultati

8.1. Modellazione strutturale con metodologia BIM

Il modello BIM del caso studio è stato realizzato in due fasi successive a partire dalle informazioni architettoniche per essere completato con quelle strutturali derivanti dalle tavole di carpenteria rilevate in archivio e dal rilievo in situ.

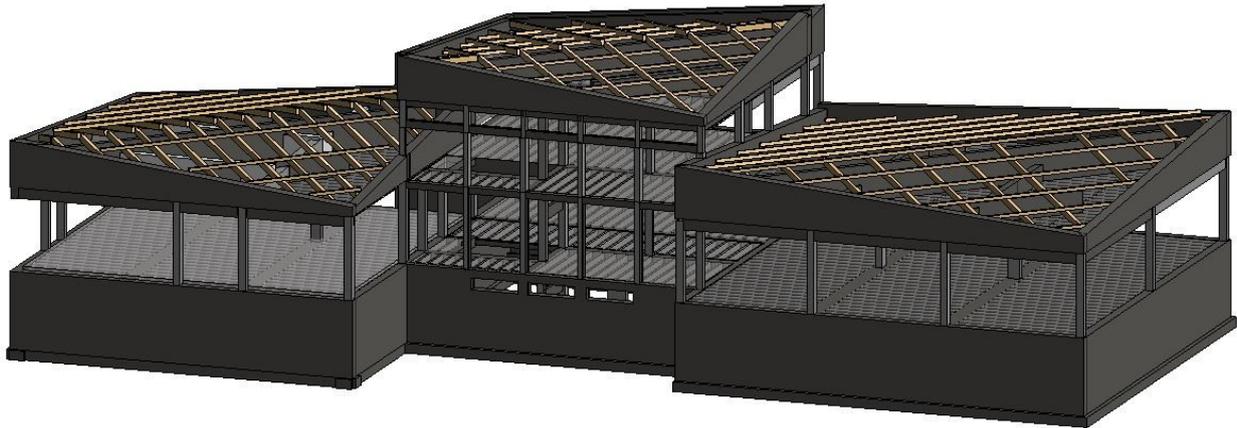


Figura 258: Modello strutturale Caso studio G. Parini.

Revit consente di inserire in maniera speditiva gli elementi strutturali come travi e pilastri con l'ausilio di livelli e griglie. Inoltre la possibilità di gestire la modellazione nella vista tridimensionale ha una potenzialità importante nella visualizzazione delle possibili interferenze tra gli elementi. Le informazioni presenti nei parametri, poi, possono essere gestite e visualizzate con l'ausilio degli abachi. Al fine di impiegare il minor tempo possibile in fase di controllo del modello analitico è importante adottare alcune accortezze in fase di modellazione:

- Posizionare in maniera estremamente minuziosa le griglie in modo tale che i pilastri e le travi inserite in prossimità delle intersezioni per i primi e lungo la sua linea per le seconde siano nella posizione giusta.
- Utilizzare, in fase di modellazione, una doppia vista: quella in pianta e quella tridimensionale in modo da poter osservare eventuali impostazioni sbagliate in maniera preventiva.

8.2. Prove strutturali in situ

Si è osservato come, pianificare e gestire il rilievo strutturale tramite la metodologia BIM abbia fornito numerosi vantaggi in termini di tempo e chiarezza del dato assunto. A partire dalle informazioni raccolte e dal materiale ottenuto dal Comune di Torino si è raggiunto un Livello di Conoscenza LC2 che consente di impiegare un coefficiente di confidenza di 1.20 sulle caratteristiche meccaniche dei materiali.

Il valore di resistenza caratteristica media tra tutti i pilastri ricavato dai risultati della prova sclerometrica è di 30 MPa ma, avendo testato solo una piccola percentuale degli elementi strutturali, non può essere considerato rappresentativo dell'intera struttura ed è stato impiegato un calcestruzzo di classe C28/35 come da progetto originario.

L'armatura è stata inserita interamente nel programma Robot Structural Analysis in quanto questo passaggio è estremamente più agevole rispetto all'introduzione in Revit dove è necessario inserire ogni barra singolarmente dopo una macchinosa selezione del piano in cui lavorare. Nel software di calcolo, invece, armare gli elementi strutturali è rapido ed intuitivo e alla fine dell'operazione si può stampare la tabella ferri e tutte le informazioni relative all'analisi come si può osservare per il primo pilastro verificato al precedente capitolo.

8.3 interoperabilità con il software di calcolo

Si riporta nel seguito una tabella riepilogativa per la gestione dei diversi punti di attenzione considerati nello studio dell'interoperabilità.

punti di attenzione	Robot Structural Analysis
Eccentricità	Utilizzare collegamenti analitici esportati come elastic link
Solaio	esportazione del solaio con peso proprio ridotto
Applicazione carichi	Esportazione completa

Figura 259: Riassunto gestione punti di attenzione interoperabilità.

Le conclusioni relative alle singole tematiche sono le seguenti.

→ **Eccentricità:**

in Revit l'eccentricità tra gli elementi strutturali viene gestita con l'inserimento dei collegamenti analitici. come si è descritto nel capitolo sei si sono effettuati dei test su modelli semplificati per comprenderne il funzionamento e le possibilità ottenute sono due:

- a) Utilizzare i collegamenti analitici che vengono esportati in Robot come Elastic link.
- b) Impostare un offset del modello analitico rispetto all'elemento architettonico.

Robot supporta entrambe le possibilità pertanto è stato impiegato in maniera intensiva il collegamento analitico e, per quegli elementi in cui l'eccentricità coincideva con un lato dell'elemento strutturale, la seconda.

→ **Solaio:**

Poiché l'informazione relativa alla direzione dell'orditura definita in Revit viene mantenuta in Robot si è riusciti a usufruire al massimo dell'interoperabilità per gli orizzontamenti. Questo consente una notevole diminuzione dei tempi necessari per le azioni post esportazione.

E' stato quindi necessario modellare i solai lungo la linea media delle travi per poi applicare un coefficiente di riduzione al suo peso specifico dovuto al fatto che l'area effettiva dello stesso in esecuzione parte dal lato interno delle travi.

→ **Applicazione dei carichi:**

Revit consente la definizione dei carichi e di impostare la loro combinazione: queste due informazioni vengono esportate entrambe in Robot. Tuttavia dato che:

- a) il carico del vento è stato inserito direttamente nel software di calcolo;
- b) Robot consente di applicare i carichi areali direttamente agli elementi solaio senza dover definirne il perimetro;
- c) Robot presenta una visualizzazione dei carichi più chiara separata in base alla condizione selezionata;

Si è scelto di aggiungere e combinare i carichi direttamente nel software di calcolo.

→ **Tamponature:**

La differenza tra il valore di momento flettente ricavato con le formule analitiche e quello calcolato da Robot a partire dalla geometria della parete è del 44% in cui quello del software di calcolo è a sfavore di sicurezza. Pertanto il carico dei pannelli perimetrali è stato inserito insieme a quello dei tramezzi come carico superficiale.

9. Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo della tesi è stato quello di indagare l'interoperabilità tra un software con metodologia BIM come Revit e un software di calcolo strutturale, nel mio caso specifico Robot Structural Analysis. Si è cercato di sfruttare al massimo lo scambio di informazioni tra i due programmi ricercando soluzioni che fossero il più possibile automatizzabili e che minimizzassero il lavoro post esportazione.

Si sono sperimentate le potenzialità del Building Information Modelling per la pianificazione e la realizzazione del rilievo strutturale definendo un iter di lavoro che potrà essere implementato per le future indagini. Per quel che riguarda l'utilizzo dei dati ottenuti dalle prove non invasive, il BIM consente di avere il riferimento della zona esatta di ispezione con la precisione del centimetro: risultato del tutto impensabile con la metodologia tradizionale.

Il risultato finale del periodo di tesi è un database tridimensionale del caso studio che potrà essere la base di partenza per studi futuri riguardo altre tematiche relative all'edificio come l'analisi energetica, la gestione e realizzazione di un intervento di manutenzione o il piano antincendio.

Osservando la tematica da un punto di vista un po' più lontano rispetto al singolo caso analizzato si scorge la potenzialità enorme dell'impostazione BIM per la gestione delle strutture. Si consideri per esempio il cambio di una destinazione d'uso di uno stabile: a partire dal modello digitalizzato è possibile poter effettuare delle modifiche architettoniche degli spazi per poi passare al software di calcolo per verificare che tale configurazione sia ammissibile con i carichi gravanti. Se tale modifica risulta compatibile con gli standard dettati dalla norma tecnica si può procedere con altre analisi necessarie come quella di efficienza energetica, altrimenti scegliere una configurazione alternativa e rifare le analisi allo SLU. Di qui in avanti si apre un ventaglio di possibili applicazioni e flussi di lavoro che starà alla volontà ed inventiva di tutti gli addetti ai lavori saper indagare ed approfondire.

Allegato: Relazione tecnica del piano di indagini e prove in situ

1. Introduzione

E' stata predisposta una campagna di indagini conoscitive da eseguirsi sulla struttura predetta a supporto e verifica della documentazione fornitaci dal Comune di Torino.

Questo al fine di consentire il raggiungimento del livello di conoscenza prefissato come previsto dalla procedura di valutazione della sicurezza secondo il D.M 14/1/2008 "Norme tecniche per le Costruzioni" e circolare esplicativa n°617 del 2 febbraio 2009.

La campagna di prove ha interessato i soli pilastri in quanto gli unici accessibili e ha definito i seguenti parametri:

- spessore medio del copriferro tramite prova pacometrica.
- disposizione dell'armatura tramite prova pacometrica
- valutazione della resistenza meccanica del calcestruzzo tramite prova sclerometrica
-

2. Descrizione della struttura

Le caratteristiche geometriche del sistema strutturale dell'edificio sono state ricavate dalla documentazione acquisita oltre che da un rilievo geometrico architettonico in situ degli elementi in vista. Le planimetrie dell'edificio utilizzati per le verifiche in questione sono riprodotti nell'allegato alla presente relazione.

L'edificio è uno stabile risalente agli anni '70 costituito da quattro blocchi: uno centrale con il corpo scala e gli altri tre adiacenti al primo tramite il quale vi si accede.

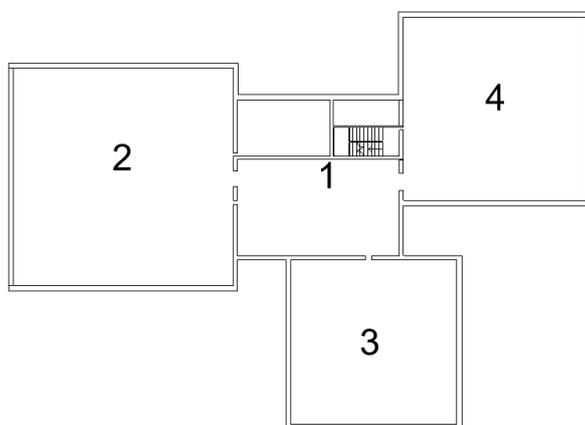


Figura 1: planimetria dell'edificio.

La struttura si sviluppa su tre livelli: interrato, piano terra e piano primo. I primi due presentano la planimetria descritta dalla figura 1 mentre il terzo mantiene soltanto il corpo centrale. La struttura portante è costituita da telai spaziali formati da pilastri in c.a. gettato in opera a sezione quadrata o rettangolare di diverse dimensioni e da travi del medesimo materiale in parte in spessore e in parte ribassate. Il solaio del piano interrato è realizzato in laterocemento con blocchi di altezza 17cm e 3cm di soletta per uno spessore totale di 20 cm. Sono stati impiegati travetti del tipo SAP come è stato possibile riscontrare durante il sopralluogo e di cui allego un'immagine. I solai dei piani successivi sono anch'essi in laterocemento ed hanno spessore 16+4 cm nei tre blocchi laterali e 22+4 cm nel corpo centrale.

3. Riferimenti normativi

Si adottano le indicazioni presenti nelle NTC 2008 e relativa Circolare applicativa n°617 del 2 febbraio 2009, in particolare al capitolo **C8A.1.B** della seconda " **COSTRUZIONI IN CALCESTRUZZO ARMATO O IN ACCIAIO: DATI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE** " .

Nel testo vengono definiti i tre livelli di conoscenza:

- LC1: Conoscenza Limitata;
- LC2: Conoscenza Adeguata;
- LC3: Conoscenza Accurata.

Gli aspetti che su cui si basano sono:

4. **Geometria**, ossia le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali.
5. **Dettagli strutturali**, ossia la quantità e disposizione delle armature, compreso il passo delle staffe e

la loro chiusura

6. **Materiali**, ossia le proprietà meccaniche dei materiali.

Il livello di conoscenza acquisito determina il metodo di analisi e i fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali.

La relazione tra livelli di conoscenza, metodi di analisi e fattori di confidenza è illustrata nella Tabella C8A.1.2 di cui allego l'immagine.

Tabella C8A.1.2 – Livelli di conoscenza in funzione dell’informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell’epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell’epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con estese prove in situ oppure esaustive prove in-situ	Tutti	1.00

Figura 3: Tabella C8A1.2

La percentuale di elementi strutturali da verificare per i vari livelli è definita nella tabella C8A.1.3a di cui segue un’immagine.

Tabella C8A.1.3a – Definizione orientativa dei livelli di rilievo e prove per edifici in c.a.

	Rilievo (dei dettagli costruttivi)(a)	Prove (sui materiali) (b)(c)
Per ogni tipo di elemento “primario” (trave, pilastro...)		
Verifiche limitate	La quantità e disposizione dell’armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m2 di piano dell’edificio, 1 campione di armatura per piano dell’edificio
Verifiche estese	La quantità e disposizione dell’armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m2 di piano dell’edificio, 2 campioni di armatura per piano dell’edificio
Verifiche esaustive	La quantità e disposizione dell’armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m2 di piano dell’edificio, 3 campioni di armatura per piano dell’edificio

Figura 4: Tabella C8A.1.3a

4. Conoscenze disponibili

- **Geometria e dettagli strutturali**: abbiamo avuto a disposizione le carpenterie degli elementi strutturali e le piante di solaio del piano terra e del piano primo. La tavola relativa all'orizzontamento del piano interrato non è stata trovata pertanto non è stato possibile definire con precisione la posizione delle travi dello spesso piano. Si può dunque affermare che i disegni costruttivi risultano incompleti. Durante il rilievo geometrico architettonico preliminare si sono potute osservare alcune discrepanze con le planimetrie: al piano interrato sono stato aggiunti degli elementi verticali con la probabile funzione di diminuire l'inflessione dei solai.

- **Caratteristiche dei materiali**: Sono disponibili dai disegni costruttivi dell'epoca. Poiché l'edificio risulta utilizzato, al fine di ridurre l'impatto sulle attività insediate si propone il seguente livello di conoscenza obiettivo:

livello di conoscenza obiettivo LC2

raggiungibile effettuando:

- **limitate verifiche** in situ
- **limitate prove** in situ

Tabella C8A.1.2 – Livelli di conoscenza in funzione dell’informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1		Progetto simulato in accordo alle norme dell’epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell’epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con estese prove in situ oppure esaustive prove in-situ	Tutti	1.00

Figura 5: Livello di conoscenza LC2.

5. Descrizione indagini

Le indagini previste per ciascun elemento da analizzare sono:

a) Localizzazione dell’elemento

Si è provveduto, in fase di preparazione delle prove, alla localizzazione degli elementi da indagare attraverso le planimetrie e le fotografie scattate durante il rilievo geometrico architettonico. Sono stati indagati i pilastri aventi una o più facce in vista: sono stati scartati quelli tra i tamponamenti in quanto non di facile individuazione al di sotto dell’intonaco. Per le tavole con i dettagli degli elementi analizzati si rimanda agli allegati.

b) Rilievo delle armature e verifica del copriferro medio

Per definire la griglia di armatura e dello strato di copriferro medio si è impiegata la prova pacometrica tramite pacometro a riluttanza magnetica. Si è provveduto a coprire gli elementi da analizzare con dei fogli di carta in modo da non lasciare traccia dell’armatura rilevata in quanto non rappresenta un’indagine certificata. Gli schizzi prodotti sono comunque stati fotografati e conservati in modo da poterli confrontare con le tavole di carpenteria e consultare durante la fase di modellazione.

c) Prove sul calcestruzzo

Data l'impossibilità di compiere prove distruttive ci siamo limitati alla sola prova sclerometrica.

La circolare a tal proposito ricorda:

“Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità, che non possono essere impiegati in completa sostituzione di quelli sopra descritti, ma sono consigliati a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti con prove distruttive. Nel caso del calcestruzzo, è importante adottare metodi di prova che limitino l'influenza della carbonatazione degli strati superficiali sui valori di resistenza.”

La prova sclerometrica fa parte di quelle i cui risultati sono influenzati dalla carbonatazione degli strati superficiali tuttavia ci consente di avere una conferma della resistenza media del calcestruzzo in opera. Al fine di avere il minor grado di interferenza possibile con l'armatura si è predisposta prima la prova pacometrica e in secondo luogo quella sclerometrica. I risultati ottenuti sono stati trascritti in loco su un tabella avente come campi il codice dell'elemento analizzato, le coordinate del baricentro della griglia di indagine e i valori degli indici di rimbalzo delle dodici battute.

6. Piano delle indagini

Si prevede la necessità di eseguire le seguenti indagini, allo scopo di validare le informazioni acquisite dalla documentazione di supporto e dai rilievi visivi effettuati:

- Rilievo della gabbia d'armatura tramite prova pacometrica.

<u>PROVA PACOMETRICA</u>	
Percentuale di elementi da indagare	15%
N° pilastri esistenti	112
N° minimo pilastri da rilevare	17
N° pilastri analizzati	33
Percentuale effettiva	29,4%

- Stima della resistenza del calcestruzzo tramite prova sclerometrica.

<u>PROVA SCLEROMETRICA</u>	
Percentuale di elementi da indagare	15%
N° pilastri esistenti	112
N° minimo pilastri da rilevati	17
N° pilastri analizzati	20
Percentuale effettiva	18%

Bibliografia

- *Osello, A. & Ugliotti, F.M. (2017): “ BIM verso il catasto del futuro”. Conoscere, digitalizzare, condividere. Il caso studio della città di Torino (A. Osello, & F.M. Ugliotti, Eds.) Roma, Italy: Gangemi Editore spa.*
- *Ugliotti, F.M. (2015). La raccolta dei dati ed il rilievo speditivo degli edifici esistenti per la gestione dei grandi patrimoni immobiliari. In A. Osello, Building Information Modelling, Geographic Information System, Augmented Reality per il Facility Management (p. 14,50-63). Palermo, Italy: Dario Flaccone Editore.*
- *Revit 2018 per l'Architettura, Guida complete per la progettazione BIM, Simone Pozzoli, Marco Bonazza, Werner Stefano Villa, Tecniche Nuove.*
- *Indagini non invasive in edilizia ed impiantistica, Juan Pedro Grammaldo, Francesco Mazziotti. Tipografia del genio civile.*
- *Tagliabue L.C., Villa V. (2017). Il BIM per le scuole. Analisi del patrimonio scolastico e strategie di intervent, Milano, Italy: Ulrico Hoepli Editore S.p.A.*
- *Repubblica Italiana (2008). Decreto Legislativo 14 Gennaio 2008, Norme tecniche per le costruzioni.*
- *Repubblica Italiana (2009). Circolare Allegata n. 617 del 2 Febbraio 2009, Allegato alle Norme Tecniche per le costruzioni.*

Sitografia

- <https://www.bimportale.com/software/strutture/> (ultima consultazione 18/03/2018).
- <https://www.acca.it/> (ultima consultazione 30/03/2018).
- <https://www.csiamerica.com/products/sap2000> (ultima consultazione 24/03/2018).
- https://www.logical.it/software_travilog.aspx?id=171 (ultima consultazione 23/03/2018).
- <http://biblus.acca.it/azioni-del-vento-sulle-costruzioni-esempio-calcolo-parte-2/> (ultima consultazione 20/11/2018).
- <https://forum.dynamobim.com/> (ultima consultazione 5/05/2018).
- <https://www.flickr.com/> (ultima consultazione 18/06/2018).
- <http://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2018/ITA/?guid=GUID-E897B81F-4F86-402E-9194-5EF4E44EB73E> (ultima consultazione 10/11/2018).
- <http://help.autodesk.com/view/RVT/2016/ITA/?guid=GUID-AE790838-3D5A-4823-8E77-0B4F4FFBAC18> (ultima consultazione 11/11/2018).
- <http://www.simonecaffè.it/> (ultima consultazione 15/11/2018).
- <http://biblus.acca.it/come-il-bim-cambia-il-nostro-modo-di-lavorare/> (ultima consultazione 20/11/2018).
- <https://www.ingegneriamilano.com/2017/01/30/bim-diventa-norma-uni-113372017/> (ultima consultazione 24/11/2018).