

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DEI
MATERIALI E DELLE STRUTTURE

COORDINATORE PROF. GIUSEPPE MENSITIERI
XXVII CICLO



ANTONIO SALZANO

TESI DI DOTTORATO

METODOLOGIE BIM PER LA PROGETTAZIONE
INTEGRATA DI INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE E
RINFORZO STRUTTURALE ORIENTATI ALLA
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

TUTOR: CH.MO PROF. GAETANO MANFREDI

Co-TUTOR: PROF.ING. ANDREA PROTA
DOTT. ING. DOMENICO ASPRONE

TUTOR AZIENDA: ARCH. BARBARA RUBERTELLI

ANNO 2015

INDICE

Premessa	1
Introduzione	3
Capitolo 1.	7
Building Information Modeling (BIM)	7
1.1 Scenario di riferimento	7
1.2 La metodologia bim	12
1.2.1 L'interoperabilità.....	15
1.2.2 BIM Maturity Levels.....	16
1.2.3 Modello 4D: la gestione dei tempi.....	18
1.2.4 Modello 5D: la gestione dei costi.....	18
1.2.5 Il Modello 6D: facility Management.....	19
1.2.6 Levels of Detail (LOD).....	23
1.3 Il bim nel processo edilizio.....	26
Capitolo 2.	31
Implementazione di oggetti BIM	31
2.1 Implementazione di oggetti non strutturali in BIM.....	33
2.2 Implementazione di oggetti strutturali.....	38
2.3 Conclusioni	40
Capitolo 3.	41
Caso studio: la Cassa Edile di Napoli	41
3.1 Introduzione al caso studio	41
3.1.1 Finalità dell'applicazione al caso studio.....	42
3.1.2 Metodologia di implementazione BIM	43
3.2 Descrizione del progetto.....	46
3.3 Risultati dello studio	54
3.4 Conclusioni	57
Capitolo 4.	58
Il BIM a supporto della progettazione sostenibile mediante l'integrazione di analisi LCA	58
4.1 Introduzione	58
4.2 LCA nel settore delle costruzioni	61
4.3 Life Cycle Assessment: metodologia	63
4.3.1 Definizione degli obiettivi (Goal and scope definition) ..	66
4.3.2 Analisi dell'inventario (LCI)	68
4.3.3 Valutazione degli impatti ambientali potenziali	70

4.3.4 Interpretazione dei risultati	72
4.4 Integrazione di LCA nel BIM applicata ad un caso studio ...	73
4.4.1 Complessità delle LCA nel settore delle costruzioni	73
4.4.2 Metodologia, scopo dello studio ed integrazione di LCA nel BIM.....	74
4.4.3 Caso studio.....	76
4.5 Conclusioni	81
Capitolo 5.	83
Life Cycle Assessment di strategie di adeguamento sismico di strutture esistenti 83	
5.1 Introduzione	83
5.2 Definizione della struttura	84
5.2.1 Modellazione dell'edificio	88
5.2.2 Analisi della capacità strutturale.....	91
5.3 Strategie di Consolidamento Strutturale	96
5.3.1 Miglioramento sismico con FRP	99
5.3.2 Adeguamento sismico con FRP ($I_R=100\%$)	103
5.3.3 Adeguamento con pareti sismoresistenti	107
5.3.4 Adeguamento sismico misto con incamiciatura in c.a. ed FRP.....	116
5.4 LCA delle strategie di consolidamento.....	123
5.4.1 Definizione degli obiettivi (Goal and scope definition)	123
5.4.2 Inventario (Inventory Analysis)	128
5.4.3 Analisi di impatto ambientale (Impact Assessment) ..	132
5.5 Conclusioni	138
Conclusioni	143
Bibliografia	148
Appendice A.	154
Analisi dei carichi e progetto per tensioni ammissibili	154
A.1 Analisi dei carichi.....	154
A.2 Progetto armatura longitudinale.....	157
A.3 Progetto e verifica armatura a Taglio	161
A.4 Progetto e verifica armatura dei pilastri per sforzo normale centrato	166
Appendice B.	169
Valutazione di vulnerabilità sismica	169
B.1 Valutazione dell'azione sismica.....	169
B.1.1 Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche.....	170

B.1.2 Spettri di risposta.....	171
B.1.3 Analisi statica non lineare	174
B.1.4 Valutazione della sicurezza	184
B.1.5 Verifiche di sicurezza	197
B.1.6 Verifica della capacità deformativa.....	197
B.1.7 Verifiche di resistenza a taglio degli elementi.....	198
B.1.8 Verifiche a taglio secondo le NTC 2008.....	199
B.1.9 Verifiche a taglio secondo l'Eurocodice 8.....	201
B.1.10 Verifiche di resistenza nei nodi	202
B.1.11 Calcolo Indice di rischio	203

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Percentuale di utenti BIM con più di tre anni di esperienza (Fonte: McGraw Hill Construction 2013).....	9
Figura 1.3 Benefici derivanti dall'utilizzo della metodologia BIM	12
Figura 1.4 Maturity levels per l'utilizzo del BIM (Fonte: BSI PAS 1192-2)	17
Figura 1.5 Confronto approcci di lavoro – Tradizionale vs BIM Standards (fonte: BD – WhitePaper – BIM)	27
Figura 1.6 Individuazione interferenze tre elementi del modello BIM (Clash Detection).....	28
Figura 1.7 Il BIM e la Sicurezza in cantiere	30
Figura 2.1 Modellazione di un solido in piani 2D	33
Figura 2.2 Modellazione geometrica infisso esterno.....	34
Figura 2.3 Modellazione 3D oggetto finestra	35
Figura 2.4 Parametri oggetto “finestra” BIM.....	36
Figura 2.5 Confronto tra particolare costruttivo CAD e Oggetto BIM: (a) Particolare costruttivo pavimentazione in progetto definitivo CAD; (b) Oggetto pavimentazione BIM; (c) Dettaglio informazioni per oggetti BIM	37
Figura 2.6 Modellazione geometrica di un elemento strutturale.....	38
Figura 2.7 Proprietà meccaniche dell'elemento pilastro	39
Figura 3.1 Progettazione CAD-oriented	44
Figura 3.2 Progettazione BIM-oriented.....	46
Figura 3.3 Rappresentazione gerarchica del concetto di famiglia di oggetti BIM	48
Figura 3.4 Stralcio di Capitolato d'appalto	49
Figura 3.5 Oggetto BIM Parete in cartongesso Tipo PC-01	50
Figura 3.6 Integrazione tra livello di progettazione strutturale ed architettonico.....	50
Figura 3.7 Modelli per l'analisi strutturale.....	51
Figura 3.8 Modello FEM per il calcolo strutturale e riconoscimento caratteristiche elementi	51
Figura 3.9 Elaborati progettuali piante parcheggio interrato	53
Figura 3.10 Elaborati progettuali: sezioni dell'immobile Cassa Edile.....	53
Figura 3.11 Elaborati architettonici di progetto	54
Figura 3.12 Distribuzione del tempo nelle fasi progettuali (CAD Project)..	56
Figura 3.13 Distribuzione del tempo nelle fasi progettuali (BIM Project) ..	56

Figura 4.1 Triple Bottom Line Theory.....	60
Figura 4.2 Fasi analisi LCA.....	65
Figura 4.3 Fase di definizione di input/output.....	69
Figura 4.4 Fase LCIA.....	70
Figura 4.5 Categorie previste dal metodo Impact2002.....	71
Figura 4.6 Categorie intermedie e di danno, sostanze di riferimento, e unita di danno usate in Impact2002+.....	72
Figura 4.7 Utilizzo della metodologia LCA [33].....	74
Figura 4.8 Modello BIM 3D dell'edificio oggetto del caso di studio.....	77
Figura 4.9 Inventory Analysis mediante le schede del Prezzario.....	79
Figura 4.10 Integrazione dei dati di LCA nel processo BIM.....	80
Figura 4.11 Risultati di impatto ambientale del software Primusv100d – Beta LCA 1.00.....	81
Figura 5.1 Pianta con dimensioni dell'edificio.....	86
Figura 5.2 Pianta con nomenclatura travi e pilastri.....	87
Figura 5.3 Viste 3D del modello BIM dell'edificio.....	88
Figura 5.4 Modello strutturale SAP2000 dell'edificio.....	89
Figura 5.5 Meccanismi di collasso di colonne per edifici in c.a. colpiti dal terremoto dell'Aquila, (fonte Reluis 2009).....	94
Figura 5.6 Schema di pilastro tozzo dovuto alla presenza della trave d'interpiano (a); telaio della struttura in esame con modellazione del pilastro tozzo (b).....	94
Figura 5.7 Quadro sintetico numero di elementi non verificati per meccanismi di rottura duttili/fragili per IR=76%.....	95
Figura 5.8 Quadro sintetico numero di elementi non verificati per meccanismi di rottura duttili/fragili per IR=100%.....	96
Figura 5.9 Rappresentazione della capacità di un edificio esistente del piano (Capacità Resistente; Capacità Deformativa).....	97
Figura 5.10 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.).	100
Figura 5.11 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.).	101
Figura 5.12 Scheda tecnica MAPEWRAP C QUADRI-AX (Mapei S.P.A.)	103
Figura 5.13 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.).	104
Figura 5.14 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.).	105
Figura 5.15 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.).	106
Figura 5.16 Scheda tecnica MAPEWRAP C QUADRI-AX (Mapei S.P.A.)	107
Figura 5.17 Costruzione di parete all'interno della maglia strutturale	108
Figura 5.18 Modello SAP2000 tridimensionale con pareti sismoresistenti	109

Figura 5.19 Modellazione della parete con collegamento mediante link rigidi alla struttura esistente	109
Figura 5.20 Distinta di armatura longitudinale e trasversali	112
Figura 5.21 Quadro sintetico numero di elementi non verificati per meccanismi di rottura duttili/fragili per IR=100%	114
Figura 5.22 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)	115
Figura 5.23 Scheda tecnica MAPEWRAP C QUADRI-AX (Mapei S.P.A.)	116
Figura 5.24 Quadro sintetico numero di elementi non verificati per meccanismi di rottura duttili/fragili per IR=100%	120
Figura 5.25 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)	121
Figura 5.26 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)	122
Figura 5.27 Scheda tecnica MAPEWRAP C QUADRI-AX (Mapei S.P.A.)	123
Figura 5.28 Confini del sistema C-FRP	127
Figura 5.29 Confini del sistema parete in c.a.	128
Figura 5.30 Confini del sistema ringrosso in c.a.	128
Figura 5.31 Risultati LCA FRP in carbonio (1 m ²)	132
Figura 5.32 Risultati LCA fase produzione materiali FRP in carbonio (1 m ²)	133
Figura 5.33 Risultati LCA parete in c.a.	133
Figura 5.34 Risultati LCA fase produzione materiali parete in c.a.	134
Figura 5.35 Risultati LCA ringrosso in c.a. pilastrata	134
Figura 5.36 Risultati LCA fase produzione materiali ringrosso in c.a. pilastrata	135
Figura 5.37 Risultati LCA adeguamento sismico con pareti in c.a.	136
Figura 5.38 Risultati LCA adeguamento sismico misto con ringrossi in c.a. ed FRP	136
Figura 5.39 Risultati LCA comparativa tra le tre strategie di adeguamento sismico	137
Figura 5.40 Risultati LCA comparativa tra miglioramento e adeguamento sismico	138
Figura 5.41 Analisi comparativa tecniche di adeguamento sismico	140
Figura 5.42 Analisi comparativa tra miglioramento e adeguamento sismico	140
Figura 5.43 Andamento dell'indice di rischio in funzione delle crisi strutturali	141
Figura A.1 Armature trasversali nelle travi	165
Figura B.1 Spettro elastico in accelerazione allo SLV	173
Figura B.2 Spettro elastico in spostamento allo SLV	173

Figura B.3 Modello cerniera plastica trilineare incrudente	178
Figura B.4 Modello cerniera plastica bilineare incrudente	178
Figura B.5 Modello cerniera plastica bilineare plastico	179
Figura B.6 Sedici combinazioni applicate alla struttura	184
Figura B.7 Distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%y_g$), positiva e negativa.....	185
Figura B.8 Distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%y_g$), positiva e negativa.....	185
Figura B.9 Distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%x_g$), positiva e negativa.....	186
Figura B.10 Distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%x_g$), positiva e negativa.....	186
Figura B.11 Distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%y_g$), positiva e negativa.....	187
Figura B.12 Distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%y_g$), positiva e negativa.....	187
Figura B.13 Distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%x_g$), positiva e negativa.....	188
Figura B.14 Distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%x_g$), positiva e negativa.....	188
Figura B.15 Sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%y_g$)	191
Figura B.16 Sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%y_g$).....	191
Figura B.17 Sistema bilineare equivalente in direzione trasversale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%x_g$)	192
Figura B.18 Sistema bilineare equivalente in direzione trasversale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%x_g$).....	192
Figura B.19 Sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%y_g$)	193
Figura B.20 Sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%y_g$).....	193

Figura B.21 Sistema bilineare equivalente in direzione trasversale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità positiva (+5%yg)	194
Figura B.22 Sistema bilineare equivalente in direzione trasversale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità negativa (-5%yg)	194
Figura B.23 Valutazione del taglio resistente t_{rd} per diversi valori della $\cot\theta$	200
Figura B.24 Bilinearizzazione relativa alla curva di capacità della prima rottura della struttura	205
Figura B.25 Rappresentazione nel piano ADRS	206
Figura B.26 Individuazione della PGA_c nel piano ADRS	206

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 Analogia tra LOD e normativa italiana	26
Tabella 3.1 Team di progettazione per il Caso della Cassa Edile di Napoli	44
Tabella 3.2 Elaborati progetto Cassa Edile	47
Tabella 4.1 Computo metrico dei materiali	78
Tabella 5.1 Minimi rapporti di I_R per meccanismi fragili e duttili	93
Tabella 5.2 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e miglioramento	101
Tabella 5.3 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e miglioramento	102
Tabella 5.4 Confronto rotazione capace tra stato di fatto e adeguamento	104
Tabella 5.5 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e adeguamento	105
Tabella 5.6 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e adeguamento	106
Tabella 5.7 Periodi dei 12 modi di vibrare e massa partecipante al modo	111
Tabella 5.8 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	112
Tabella 5.9 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	113
Tabella 5.10 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	113
Tabella 5.11 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	113
Tabella 5.12 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e adeguamento	115
Tabella 5.13 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	118
Tabella 5.14 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	118
Tabella 5.15 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	119
Tabella 5.16 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	119
Tabella 5.17 Confronto capacità rotazionale tra stato di fatto e adeguamento	121

Tabella 5.18 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e adeguamento	122
Tabella 5.19 Dati di inventario per la fase produzione materiali per un m ² di rinforzo.....	129
Tabella 5.20 Dati di inventario per la fase di preparazione per un m ² di rinforzo.....	129
Tabella 5.21 Dati di inventario per la fase di applicazione per un m ² di rinforzo.....	130
Tabella 5.22 Dati di inventario per la fase produzione materiali per la singola parete	130
Tabella 5.23 Dati di inventario per la fase di preparazione per la singola parete	130
Tabella 5.24 Dati di inventario per la fase di applicazione per la singola parete	131
Tabella 5.25 Dati di inventario per la fase produzione materiali per la singola pilastrata.....	131
Tabella 5.26 Dati di inventario per la fase di preparazione per la singola pilastrata	131
Tabella 5.27 Dati di inventario per la fase di applicazione per la singola pilastrata	132
Tabella A.1 Carichi derivanti dai pesi propri strutturali e non strutturali	155
Tabella A.2 Peso delle tamponature interne/esterne.....	156
Tabella A.3 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanze y=0.....	158
Tabella A.4 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanza y=4,8m	158
Tabella A.5 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanza y=10,8m	159
Tabella A.6 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanza y=15,3m	159
Tabella A.7 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanza y=17,55m	160
Tabella A.8 Armatura Pilastrati	167
Tabella B.1 Parametri di pericolosità sismica di base.....	171
Tabella B.2 Parametri per il calcolo dello spettro elastico all'SLV	172
Tabella B.3 Masse e pesi sismici.....	180
Tabella B.4 Variazione rigidezza laterale direzione Y.....	180

Tabella B.5 Variazione rigidezza laterale direzione X.....	180
Tabella B.6 Distribuzione di forze proporzionali al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrazione.....	181
Tabella B.7 Distribuzione di forze proporzionali alle masse	182
Tabella B.8 Distribuzione di forze proporzionale ai tagli di piano.....	182
Tabella B.9 Distribuzione di forze proporzionali alle masse	183
Tabella B.10 Definizione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà	191
Tabella B.11 Definizione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà	192
Tabella B.12 Definizione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà	193
Tabella B.13 Definizione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà	194
Tabella B.14 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	196
Tabella B.15 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	196
Tabella B.16 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	196
Tabella B.17 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita	196
Tabella B.18 Valutazione dell'indice di rischio per i vari meccanismi di crisi	207

PREMESSA

L'attività di ricerca descritta nella presente tesi di dottorato nasce dalla prima esperienza in Regione Campania di Dottorati in Azienda, finanziata con fondi Por Fse 2007-2013. In particolare, l'azienda che ha accolto con fervente entusiasmo e altrettanta professionalità l'attività di dottorato è l'Associazione Costruttori Edili di Napoli (ACEN).

L'ACEN è un'associazione tra aziende private che opera nel settore delle costruzioni con finalità di salvaguardia e tutela dell'imprenditoria, di sviluppo e progresso dell'industria delle costruzioni, di qualificazione professionale delle imprese del settore e del loro avanzamento tecnologico. Date le finalità dell'Associazione, gli obiettivi dell'attività di dottorato sono stati definiti durante diversi mesi di confronto e collaborazione tra il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura e l'ACEN.

Perseguendo il fine di un progetto vasto e comune, i costruttori hanno manifestato l'esigenza di implementare e indagare nuovi metodi e procedure che potessero rendere più efficiente il processo edilizio e che fornissero strumenti per il monitoraggio e il controllo dei tempi e dei costi degli interventi edilizi.

Il Dipartimento universitario, d'altro canto, seguendo il crescente interesse scientifico riferito allo sviluppo sostenibile nel settore delle costruzioni, hanno diretto le scelte verso lo studio e l'approfondimento di materiali e tecniche per l'edilizia con basso impatto ambientale.

Pertanto si è cercato di interpretare le esigenze dei diversi soggetti coinvolti, stabilendo di approfondire alcune tematiche che, attualmente, governano la scena mondiale del settore delle costruzioni, quali la progettazione integrata e lo sviluppo sostenibile.

Quest'ultimi principi rappresentano, appunto, i due fili conduttori che hanno ispirato le diverse attività descritte nei capitoli di cui la tesi si compone nonché, chiaramente, il titolo del presente lavoro: "Metodologie BIM per la progettazione integrata di interventi di riqualificazione e rinforzo strutturale orientati alla sostenibilità ambientale".

INTRODUZIONE

Il Building Information Modeling (BIM), è una metodologia di progettazione e gestione delle opere civili che permette l'integrazione in un modello 3D, unico e condiviso, di tutti i livelli di progettazione quali architettonico, strutturale ed impiantistico, mediante una modellazione parametrica ad oggetti.

Ogni oggetto non è più una mera rappresentazione grafica, riconoscibile per mezzo di dettagli o legende, ma un elemento 3D ricco di informazioni di vario genere che descrivono il comportamento meccanico, termico e funzionale dell'oggetto fino ad arrivare a dettagli specifici come il costo, il produttore, la provenienza e lo stato manutentivo dello stesso.

Le forti potenzialità del BIM nell'archiviazione e gestione delle informazioni generate durante tutto il processo edilizio, dalla fase di ideazione di un'opera, passando per la progettazione e la realizzazione fino alla sua fase di uso, identifica tale metodologia come strumento a supporto della gestione di tutto il ciclo di vita delle opere civili.

Il BIM risponde a pieno alle esigenze delle imprese di costruzioni che oggi si trovano ad affrontare realizzazioni di opere sempre più complesse con una richiesta di prestazioni sempre più elevata in uno scenario di crisi del settore. Pertanto, il controllo accurato delle quantità, dei costi e il monitoraggio contestuale dei tempi, tramite la gestione del cronoprogramma integrata con il modello BIM, sono le potenzialità che maggiormente hanno catturato l'interesse da parte di ACEN nell'affrontare questo tema di ricerca.

L'attività di studio e ricerca sul BIM è stata integrata al tema dello sviluppo sostenibile del settore delle costruzioni, incentrato sull'implementazione di strumenti a supporto dei professionisti per facilitare il processo di *decision making* in un'ottica di riduzione degli impatti ambientali delle opere civili. La sostenibilità e l'eco-compatibilità dei materiali e dei processi produttivi dell'edilizia, sono oggi criteri che influenzano tutto il settore, a partire dalle strategie politiche di investimento fino a diventare parametri di preferenza per l'aggiudicazione di gare d'appalto. Da alcuni anni si sono infatti sviluppati diversi strumenti per la valutazione e la certificazione della sostenibilità nel campo dell'edilizia, come i sistemi di *rating* (es. LEED e Itaca), che risultano molto

utilizzati anche nella pratica professionale. Un'altra metodologia che sta avendo una forte affermazione nel settore edilizio, soprattutto nell'industria di prodotto, è il Life Cycle Assessment (LCA). Tale strumento permette di valutare gli impatti sull'ambiente di un prodotto o un processo, durante tutto il suo ciclo di vita, tenendo conto della fase di estrazione dei materiali, della fase di produzione e/o realizzazione, della fase di uso e, infine, della fase di dismissione o riciclo. Tale approccio alla valutazione degli impatti ambientali è anche noto come *"from cradle to grave"*, espressione anglosassone che evidenzia in maniera esaustiva la filosofia *life cycle-oriented*. La metodologia LCA è dunque molto diffusa per la valutazione degli impatti sull'ambiente dei singoli materiali o dei processi produttivi industriali, ma non è ancora molto utilizzata per valutare gli impatti di sistemi complessi come le opere civili. Quest'aspetto, approfondito durante la trattazione, è determinato dalla forte complessità nel condurre tali analisi e dall'enorme quantità di dati e di informazioni da reperire e gestire.

La gestione della complessità delle analisi LCA attraverso gli strumenti offerti dalla progettazione integrata BIM rappresenta sicuramente il minimo comune denominatore di tutte le attività seguite, svolte ed infine rappresentate nel presente elaborato. L'obiettivo di gestire valutazioni di impatto ambientale LCA-based con la metodologia BIM è quello di ampliare il campo delle ipotesi progettuali e del decision making degli operatori del settore delle costruzioni in modo tale da progettare e realizzare opere volte al minor impatto sull'ambiente.

Un altro caso applicativo, di tale integrazione, è stato trattato con riferimento al consolidamento degli edifici esistenti ed in particolare alla valutazione di LCA di diverse tecniche di intervento per il rinforzo sismico per il raggiungimento del miglioramento e adeguamento sismico.

E' ben noto che in Italia il patrimonio edilizio è caratterizzato da un'elevata vulnerabilità e gli ultimi eventi sismici, che hanno interessato il territorio nazionale, hanno confermato tale stato di degrado.

Sebbene alcune aree italiane siano state classificate come sismiche già dalle ultime decadi del ventesimo secolo, negli edifici esistenti, si riscontrano sistematicamente regole sismiche di progetto obsolete che non sono in grado di assicurare un adeguato livello di sicurezza.

Le strutture in cemento armato, realizzate prima delle moderne norme antisismiche, che rappresentano una parte significativa dell'edilizia italiana, sono state progettate per resistere primariamente ai carichi verticali, il che comporta scarsa qualità dei materiali, mancanza di cura nei

dettagli costruttivi e soprattutto una ridotta quantità di armatura trasversale.

I dati ISTAT del 14° censimento della popolazione e degli edifici hanno rilevato che per il solo costruito in cemento armato il 35% degli edifici sono stati costruiti prima dell'emanazione della Legge 2/2/74 n.64, in cui compaiono le prime disposizioni in materia antisismica. Il dato diventa ancora più allarmante se si considera che solo nel 2003, con l'emanazione dell'O.P.C.M. 3274, è stata effettuata una riclassificazione sismica del territorio italiano e sono comparse prescrizioni sismiche di moderna concezione. E' lecito ritenere che la maggior parte delle strutture esistenti soffrono di carenze strutturali e quindi necessitano di interventi di rinforzo sismico.

Tuttavia il forte interesse per la riqualificazione degli edifici esistenti non nasce solo da una spingente necessità strutturale ma anche dall'andamento degli investimenti nell'industria delle costruzioni.

In Italia, infatti, l'industria delle costruzioni mostra una diminuzione degli investimenti di circa il 32,1% dal 2008 al 2014 destinati alla realizzazione di nuove opere; di contro, si registra un aumento di investimenti per il recupero delle costruzioni esistenti di circa il 17% dal 2008 al 2014 [1] (CRESME ricerche SPA, 2014).

Per tali motivi si è scelto di dedicare una particolare attenzione allo studio della vulnerabilità sismica di un edificio esistente che rispecchia le caratteristiche di una parte del costruito presente sul territorio italiano; lo studio è stato corredato da valutazione di LCA delle tecniche di rinforzo sismico con l'obiettivo di condurre un'analisi comparativa delle stesse.

Quest'ultimo aspetto ha conferito alla parte di adeguamento e miglioramento sismico una connotazione innovativa e assolutamente in linea con le nuove necessità di protezione e controllo dell'ambiente.

L'elaborato di tesi si articola, quindi, in cinque capitoli di cui si riporta una breve discussione del contenuto.

Il **Capitolo 1** illustra nel dettaglio la metodologia BIM, le sue potenzialità e i campi di applicazioni nella gestione della progettazione, nella realizzazione dell'opera, nell'organizzazione del cantiere e nella fase di gestione *post operam* (Facility Management). Si affrontano, inoltre, i diversi livelli di dettaglio della modellazione BIM comparandoli con i livelli di progettazione previsti dalla normativa italiana.

Il **Capitolo 2** affronta la modellazione di oggetti BIM, in particolare, della categoria di elementi strutturali e non strutturali. Per i primi si

illustra come caso applicativo quello di un pilastro caratterizzato dai parametri relativi alle caratteristiche meccaniche e geometriche; mentre per gli elementi non strutturali si descrive la modellazione di un serramento per esterni e stratigrafia di una pavimentazione.

Il **Capitolo 3** descrive un caso di studio rappresentato da un'opera di nuova costruzione progettata in maniera tradizionale mediante un approccio CAD-oriented e riprogettata mediante un approccio BIM-oriented. Il progetto fa riferimento alla costruzione della Cassa Edile di Napoli inserita nel contesto della Cittadella dei Servizi degli Enti Paritetici di Napoli. Tale intervento prende vigore dalle intuizioni di Luigi Cosenza che progettò la Cittadella circa cinquant'anni fa, ma che fu realizzata solo in parte. Il progetto e tutta la documentazione sono stati messi a disposizione da ACEN.

Il **Capitolo 4** descrive un framework per integrare nella metodologia BIM analisi di impatto ambientale LCA-oriented. Dopo un'articolata disamina della procedura LCA, è descritta la metodologia d'interpretazione dei risultati IMPACT2002+. In tale attività si è sviluppato un prototipo di *tool software* che permette di effettuare analisi di LCA direttamente dal computo metrico dei materiali e delle lavorazioni necessarie per la realizzazione di un'opera. Tale attività nasce dalla collaborazione tra il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università Federico II di Napoli, il Consorzio TRE (Tecnologie per il Recupero Edilizio), il centro di ricerca AMRA (Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale) e la società ACCA Software nell'ambito del progetto VINCES (Valutazione Integrata del Ciclo di vita per l'Edilizia Sostenibile).

Nel **Capitolo 5** si presenta una metodologia BIM-based di valutazione degli impatti ambientali relativi a diverse strategie progettuali di rinforzo sismico su una struttura esistente. La metodologia è applicata ad un caso di studio, per il quale, si è condotto preliminarmente un progetto simulato per ottenere tutti i dati necessari alla valutazione di vulnerabilità sismica di un edificio tipo mediante analisi statica non lineare. Note le crisi strutturali è stato realizzato il progetto di consolidamento strutturale mediante l'utilizzo di diverse tecniche di rinforzo sismico volte all'ottenimento sia del miglioramento sia dell'adeguamento sismico. Una volta noti gli interventi di rinforzo necessari, sono state condotte analisi di LCA degli stessi e sono state effettuate analisi comparative che hanno consentito di individuare, tra tutte le tipologie di intervento, quella con il minor impatto ambientale.

Capitolo 1.

BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)

1.1 SCENARIO DI RIFERIMENTO

L'industria delle costruzioni è tra i principali settori che incidono sulla sostenibilità del pianeta e tra le principali cause dell'inquinamento globale.

Tale aspetto è determinato dall'enorme e complesso sistema che gira intorno alla realizzazione di un manufatto o di un'opera civile in termini di produzione dei materiali, di consumo di risorse primarie, di occupazione del suolo e di impatti sull'ambiente generati da tutte le operazioni di produzione e realizzazione dei diversi processi edilizi [2].

E' per tale motivo che i governi, il mondo scientifico e quello delle professioni stanno sviluppando strategie di investimento e normative sempre più volte alla mitigazione dello spreco delle risorse e degli impatti sull'ambiente [3].

Il settore delle costruzioni è, quindi, in continuo fermento sia dal punto di vista dello sviluppo di nuovi prodotti che di nuovi processi entrambi volti all'incremento della sostenibilità delle opere civili.

Questo contesto di riferimento ha determinato una sempre maggiore complessità delle realizzazioni dell'industria delle costruzioni, una crescente domanda prestazionale delle opere in campo impiantistico ed energetico nonché una crescente richiesta di opere sostenibili.

Tutto ciò ha generato un'enorme mole di informazioni, dati e regole difficili da gestire che, forti anche dell'avanzamento tecnologico hardware, ha portato allo sviluppo di nuovi strumenti a supporto della progettazione e gestione delle opere civili.

Tra questi, il *Building Information Modeling* (BIM) è la metodologia più consolidata e di ampia diffusione che ha cambiato tutto il settore delle costruzioni, partendo dall'industria dei prodotti edili, alla progettazione, alla costruzione, alla gestione dell'opere durante la fase di esercizio fino alla loro demolizione o dismissione.

E' proprio per gli enormi vantaggi che riesce a garantire a tutta la filiera delle costruzioni che il BIM si sta diffondendo sempre in maniera più decisa

in tutto il mondo, spingendo alcuni paesi ad implementare strategie di sviluppo di tale metodologia.

Dall'esigenza di standardizzare i processi e regolamentare tutte le procedure previste dal BIM, nasce *BuildingSMART*, un'organizzazione internazionale che sviluppa gli *standard open BIM* ed effettua politiche di sviluppo e divulgazione in merito all'uso del BIM. Tale organizzazione raggruppa ventisette Paesi in quindici Chapter regionali o nazionali; tra questi i principali stati industrializzati che ne fanno parte sono: USA, Canada, China, Giappone, Korea, Singapore, Australia, Mideast, Benelux, Francia, Germania, Spagna, Norvegia, Svezia, Inghilterra e Italia.

BuildingSMART, come si vedrà nell'ambito di questa trattazione, ha l'obiettivo principale di standardizzare in un formato unico, i dati fruibili con la metodologia BIM in modo tale da garantire l'interoperabilità tra le diverse discipline e tra i diversi dati. Ogni singolo Paese sta, però, sviluppando le proprie strategie di inserimento del BIM nella filiera delle costruzioni seguendo le direttive stabilite nel BuildingSMART.

In Australia, il BIM è già uno strumento largamente diffuso per le opere sul territorio nazionale e, di conseguenza, è utilizzato dalle società australiane per lavori all'estero. Inoltre, è stato istituito, con lo scopo di migliorare i processi di costruzione, un gruppo di lavoro denominato *National Specification System* (NATSPEC) al quale partecipano ordini professionali, costruttori, proprietari e gruppi governativi. Nell'ambito del NATSPEC si è sviluppato un ramo dell'organizzazione completamente dedicato ai processi di implementazione BIM, lo *Standardised Australian Practice for the Exchange of Digital Building Information* il quale ha il compito di redigere linee guida [4] [5], casi studio e tutorial con lo scopo di supportare l'implementazione del BIM nel mercato delle costruzioni. Il NATSPEC, infatti, tra i diversi lavori eseguiti, di notevole rilievo, ha redatto e pubblicato la *National BIM Guide Documents*, come punto di riferimento per gli stakeholder nell'ambito del BIM.

Uno studio che analizza il BIM nel mercato delle costruzioni in Australia e Nuova Zelanda mostra chiaramente la continua crescita che tale metodologia sta avendo tra gli architetti e gli ingegneri e mette a confronto tali dati con il resto del mercato mondiale, fornendo un quadro chiaro sull'effettivo utilizzo del BIM nel mondo [6]

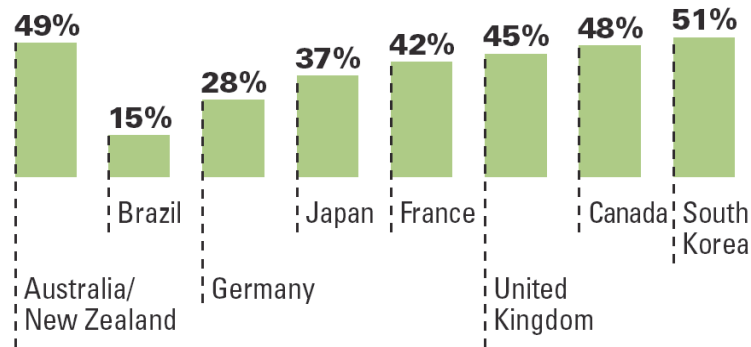


Figura 1.1 Percentuale di utenti BIM con più di tre anni di esperienza
(Fonte: McGraw Hill Construction 2013) [6]

Allo stesso modo anche in Canada, per mezzo del *National Reserch Council Canada*, si sta cercando di diffondere la cultura del BIM e sono state sviluppate diverse ricerche; tra queste una denominata “*The inevitable shift towards buildings information modelling (BIM) in Canada’s construction sector*” che chiarisce l’inevitabile utilizzo del BIM nel settore delle costruzioni.

In Cina, analogamente, è stato istituito il *BIM Union* che ha lo scopo di promuovere e coordinare lo sviluppo del BIM e, già dal 2013, è stato approvato dal Ministro delle Scienze e Tecnologia il *China Industry Technology Innovation Strategic Alliance* incentrato sullo sviluppo nel BIM nel mercato delle costruzioni.

Ad Hong Kong è stato fondato l’HKIBIM (*Hong Kong Institute of Building Information Modelling*) che, insieme al CIC (*Construction Industry Council*), ha l’obiettivo di divulgare linee guida e formare esperti all’interno di ogni disciplina ingegneristica nell’ambito del BIM.

Molto fermento si registra anche in Repubblica Ceca dove tutti gli esponenti del mondo delle costruzioni si confrontano in diversi incontri ufficiali per effettuare strategie di avanzamento tecnologico in ambito BIM. Anche in Repubblica Ceca è stata pubblicata la Guida *Czech BIM* durante il *Czech BIM Council’s Conference BIM Day* del 2013.

In Finlandia, il BIM è ad uno stadio molto avanzato e già sono presenti aziende che lo utilizzano per la gestione dell’intero ciclo di vita dell’opera. In particolare è stato pubblicato uno studio sulla diffusione del BIM nel settore delle costruzioni finlandesi che dimostra la larga diffusione di tale metodologia.

Diverse sono le opere in Finlandia condotte con la metodologia BIM, tra queste c'è il *Music Centre* di Helsinki, per il quale sono stati implementati in ambiente BIM oltre 100 modelli (tra prodotti utilizzati e modelli di progetto): in questo caso la metodologia BIM ha consentito di integrare e verificare contemporaneamente tutti i modelli nonché risolverne agevolmente i conflitti.

Ancora oggi i modelli sono aggiornati attraverso le diverse modifiche effettuate durante l'utilizzo della struttura. Anche su opere esistenti sono state sfruttate le potenzialità del BIM, come nel caso della riqualificazione del *National Opera*, per il quale sono stati modellati tutti gli impianti.

Vale la pena ricordare anche il caso del *Tampere University of Technology, HOAS* (Student Housing Helsinki), sebbene l'elenco sarebbe, senza dubbio, ancora lungo.

Tra le società leader nel settore delle costruzioni a livello internazionale vi è proprio un'azienda finlandese, la *Skanska*, che utilizza il BIM per il 100 % delle loro attività.

Anche la Norvegia e la Danimarca stanno adottando strategie di incentivazione del BIM per la progettazione e gestione delle opere con la pubblicazione di linee guida; in tali paesi sono spesso richiesti requisiti BIM per alcune opere di rilevante importanza.

Il Governo di Singapore, invece, sta stanziando diversi contributi economici con la finalità di utilizzare il BIM in accordo con le direttive della *Building and Construction Authority*, ente che regola l'attività edilizia a Singapore. A tal proposito è in corso un progetto completamente finanziato dal Governo per lo sviluppo e per l'implementazione del BIM nei progetti governativi.

I due paesi che, più degli altri, stanno puntando sul Building Information Modeling sono gli Stati Uniti ed il Regno Unito.

Gli Stati Uniti a livello governativo, attraverso il *Public Building Service* (PSBS) e il *General Service Administration* (GSA), hanno stabilito il programma nazionale per il 3D e 4D BIM, che saranno approfonditi nei capitoli seguenti. Tale programma ha influito in maniera significativa sul mercato delle costruzioni americano; infatti, una ricerca pubblicata dalla *McGraw – Hill Construction* nel 2012 indica un'utilizzazione sempre maggiore del BIM da parte di ingegneri, architetti e costruttori nell'ordine del 17% nel 2007 e del 49% nel 2009 per arrivare al 71% nel 2012 [7].

Nel Regno Unito, invece, è stato istituito a livello governativo un *BIM Task Group* con l'obiettivo di portare al Livello 2 di utilizzo del BIM nelle

costruzioni. Tale livello, come si vedrà più approfonditamente di seguito, permette di gestire sia tempi che costi di una commessa in maniera integrata. La dimostrazione del forte impegno che il Regno Unito sta impiegando per fare in modo che il BIM sia utilizzato come strumento comune per la progettazione e gestione delle opere è dato da due segnali importanti. Il primo è determinato dalla volontà a livello governativo di imporre il BIM per la progettazione delle opere pubbliche entro il 2016; il secondo è stato l'utilizzo della metodologia BIM nella gestione di tutto il progetto del *Crossrail* che rappresenta il più grande progetto infrastrutturale d'Europa ed è uno degli investimenti più grandi mai affrontati dal Regno Unito.

In Italia il BIM è utilizzato dalle grandi società di ingegneria e di costruzioni e, quindi, soprattutto per le grandi opere. Tuttavia non è ancora molto diffuso nel tessuto delle PMI sia di professionisti che di costruttori.

Il capitolo italiano di BuildingSMART è costituito dalle principali università italiane (tra cui il Politecnico di Milano, il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università Federico II di Napoli) e da diverse aziende impegnate nel settore delle costruzioni, le quali per mezzo di tale associazione svolgono attività di divulgazione a supporto del BIM.

Esistono, inoltre, già alcuni casi di opere da realizzare in Italia dove sono stati richiesti dei criteri di progettazione BIM, come nel caso della nuova sede Eni a San Donato Milanese (progetto di circa 140 milioni di euro), il Teatro Lirico di Milano e l'Ospedale di Trieste; per queste ultime due opere non è stato richiesto specificamente l'utilizzo del BIM ma entrambi gli approcci progettuali sono *BIM-based*.

Tale scenario di riferimento dimostra il forte interesse di tutti i paesi industrializzati ad ottimizzare tutto il processo edilizio in termini sia di sostenibilità ambientale sia di riduzione degli sprechi di risorse economiche.

Anche la Comunità Europea si sta muovendo in questa direzione, approvando il 15 Gennaio 2014 la *European Union Public Procurement Directive* (EUPPD), la nuova direttiva europea in tema di appalti pubblici che introduce il metodo BIM in maniera chiara.

Tale direttiva, infatti, spinge i ventotto Stati membri ad incoraggiare, richiedere o obbligare l'utilizzo del BIM nella progettazione e costruzione di opere finanziate con fondi pubblici entro il 2016 asserendo: “ *For public works contracts and design contests, Member States may require the use of*

specific electronic tools, such as of buinding information electronic modelling tools or similar”[8].

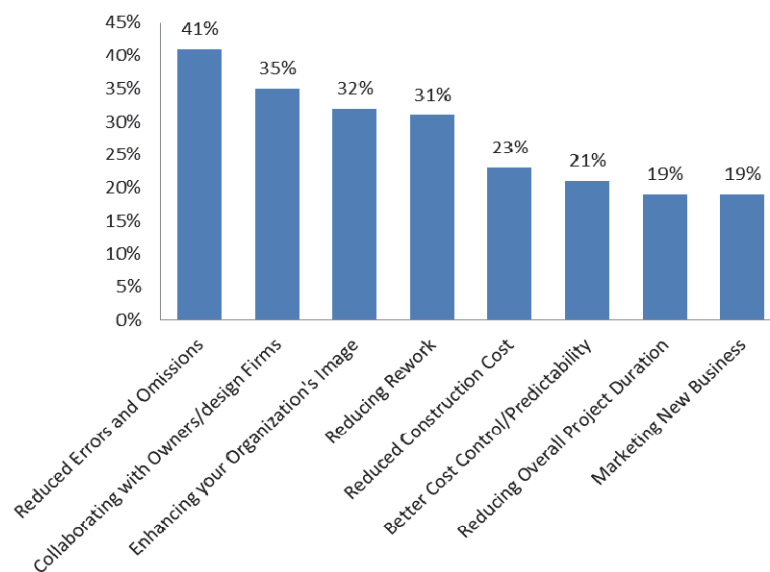


Figura 1.2 Benefici derivanti dall'utilizzo della metodologia BIM [9]

Questo scenario mostra il cambiamento epocale che il settore delle costruzioni sta subendo in questi anni in tutto il mondo. Il BIM, infatti, ha sancito l'avvento di nuove frontiere nei processi di *“Decision-Making”* e nella gestione del processo edilizio, impensabili in passato con i tradizionali strumenti a disposizione dei progettisti, delle imprese di costruzioni e della Pubblica Amministrazione.

La forte affermazione che sta avendo il BIM è determinata dai diversi benefici che tale metodologia sta introducendo all'interno delle società di ingegneria e di costruzioni. A tal proposito, nell'ultimo report del *“Business Value of BIM in Global Market 2014”* [9] sono stati riportati i maggiori benefici riscontrati dalle aziende che utilizzano il BIM (Figura 1.2).

1.2 LA METODOLOGIA BIM

In letteratura non esiste una definizione univoca ed esaustiva della metodologia BIM. La difficoltà di definire il BIM nasce anche dai tanti campi che esso riesce a gestire nell'ambito del settore delle costruzioni.

Due delle definizioni meritevoli di nota sono quelle fornite da C. Eastman nel 1999 che descrive il BIM come: *“Una rappresentazione digitale*

del processo costruttivo che facilita lo scambio e l'interoperabilità delle informazioni in formato digitale" e quella dell'AIA (American Institute of Architects) che invece definisce il BIM come *"Una tecnologia di modellazione collegata ad un database di informazioni di progetto"* [10].

Entrambe le definizioni, tuttavia, non riescono ad esprimere a pieno tutti gli aspetti di tale metodologia.

La definizione che forse, meglio di altre, spiega cosa rappresenta il BIM è quella del National BIM Standards Project Committee of the BuildingSMART Alliance, il quale afferma che: *"Il Building Information Modeling è una rappresentazione digitale di caratteristiche fisiche e funzionali di un edificio, e in quanto tale funge da sorgente di conoscenza condivisa per le informazioni riguardo la creazione di un edificio e una base affidabile per le decisioni durante il suo ciclo di vita, partendo dall'idea che l'ha originata in poi. Il BIM è una rappresentazione digitale comune basata sull'interoperabilità"*. [11]

Per dare una definizione chiara di tale metodologia è necessario chiarire che l'acronimo BIM è utilizzato sia per descrivere un'attività, Building Information Modeling, sia per descrivere un oggetto, Building Information Model.

Come attività il BIM è la metodologia per la gestione dell'insieme dei processi e delle informazioni utilizzate da tutti i partecipanti al processo edilizio al fine di realizzare un'opera civile e di gestire e monitorare la stessa durante il suo intero ciclo di vita.

Come oggetto, invece, il BIM è inteso come le componenti, che compongono il modello virtuale dell'opera, complete di tutte le caratteristiche fisiche, meccaniche e funzionali come ad esempio massa, conducibilità termica e calore specifico fino ad arrivare a marche, modelli di produzione e relative indicazioni di costo.

Il modello BIM, quindi, restituisce il modello 3D "reale" dell'opera, cioè un modello in cui ogni oggetto non è solo una mera rappresentazione grafica, come nel caso della progettazione CAD, bensì una effettiva modellazione tridimensionale solida che contiene tutti gli attributi ed informazioni che definiscono l'oggetto stesso.

Il BIM riesce ad integrare, in un modello unico e condiviso, l'insieme dei processi e delle informazioni utilizzate per la progettazione, realizzazione e gestione, utilizzando modelli creati da tutti i partecipanti al processo edilizio, in tempi diversi e anche per scopi non uguali tra loro al fine di garantire qualità ed efficienza durante l'intero ciclo di vita del manufatto.

Quest'ultimo aspetto è assicurato dall'**interoperabilità** tra il modello BIM ed i vari ambienti software sia di calcolo ingegneristico che di Facility Management (FM). Il concetto di interoperabilità, che sarà approfondito in seguito, è alla base del BIM e permette la completa condivisione delle informazioni dei diversi campi specialistici consentendo di poter esportare, dal modello unico BIM, i diversi modelli delle varie discipline nei propri ambienti di calcolo per effettuare analisi ed eventuali modifiche progettuali. Il modello creato in BIM è un "file sorgente" per i diversi professionisti coinvolti nella progettazione e, più in generale, per tutti gli operatori del settore AEC (Architecture, Engineering, Construction) e FM che, con estrema semplicità, possono attingere da suddetto file sorgente, unico e condiviso, tutte le caratteristiche necessarie al loro campo specialistico. Ogni modifica o integrazione effettuata al progetto, dai singoli operatori, viene contestualmente trasferita al modello unico centrale in modo tale da minimizzare la perdita di informazioni, durante la fase di progettazione, e di valutare eventuali criticità tra la congruenza dei dati e tra i diversi livelli progettuali.

Date tali peculiarità e potenzialità, non è possibile definire il BIM come una nuova tecnologia né tantomeno come un contenitore di software bensì come una nuova metodologia di lavoro a supporto di tutto il processo edilizio e per tutti i partecipanti al settore delle costruzioni civili.

A tal proposito, il BIM mostra le sue potenzialità, generando dei forti vantaggi, in tutte le fasi del ciclo di vita di un'opera, quali, la fase di ideazione (studio di fattibilità), la fase di progettazione (architettonica, strutturale ed impiantistica), la fase di realizzazione e cantiere, la fase di gestione della fase di uso e manutenzione fino a gestire la fase di demolizione o riutilizzo dell'opera [12].

La corretta applicazione del BIM, in ognuna delle fasi del ciclo di vita di un'opera, è strettamente legata a due aspetti che sono alla base della metodologia: (i) l'interoperabilità tra le diverse applicazioni software ed (ii) il Level of Detail (LOD) del modello dell'opera raggiunto; è dall'unione e dall'ottimizzazione di entrambi che il BIM può fornire un supporto globale alla realizzazione e gestione dell'opera.

Il BIM, infatti, è un approccio progettuale e di gestione di un'opera civile basato sull'implementazione parametrica, la quale cresce in funzione della fase del processo edilizio da raggiungere.

In sintesi, laddove il BIM fosse interpretato come un semplice software, si rischierebbe di incorrere nell'errore di utilizzarlo come modellatore 3D

per poi sviluppare gli elaborati progettuali con l'approccio tradizionale 2D, incrementando notevolmente tutti i costi ed i tempi di progettazione di un'opera. Quando il BIM è, invece, compreso ed integrato, sotto tutti i punti di vista, come protocollo di progettazione e come strumento di gestione dei flussi di lavoro (*Workflow*), riesce a fornire supporto a tutto il processo edilizio.

Dati i diversi livelli di utilizzo del BIM è stato necessario definire dei *Maturity Levels*, i quali definiscono il livello di dettaglio raggiunto (LOD), il grado di interoperabilità e di conseguenza la potenziale fase del processo edilizio da poter gestire.

1.2.1 L'interoperabilità

La possibilità del BIM di gestire tutti gli aspetti descritti nel paragrafo precedente, è garantita dall'interoperabilità tra il modello BIM e le varie applicazioni software di calcolo strutturale e architettonico, di impianti e di facility management.

L'interoperabilità si definisce come la capacità di condividere e scambiare rapidamente ed accuratamente i dati e le informazioni di prodotti e di processi tra i sistemi utilizzati dal team di progettazione migliorando l'efficacia e l'efficienza del processo edilizio.

L'interoperabilità dei diversi modelli progettuali con gli ambienti di calcolo ingegneristico è resa possibile grazie all'estrazione, dal modello unico BIM, di file in formato standard, denominato *IFC (Industry Foundation Classes)*.

L'IFC rappresenta un formato file, basato sullo standard ISO 16739:2013, che racchiude e descrive le informazioni ed i parametri dell'industria delle costruzioni ed è a supporto del Building Information Modeling garantendo l'interoperabilità e lo scambio di dati ed informazioni con i diversi ambienti software. Le ISO 16739:2013 rappresentano lo standard internazionale per i dati BIM che vengono scambiati e condivisi tra le applicazioni software utilizzate dai vari partecipanti al progetto di un'opera o per le attività di Facility Management.

Il sistema BIM garantisce un'elevata efficienza nella fase di gestione delle attività di manutenzione durante tutta la vita utile del complesso grazie alla possibilità di archiviazione e di estrazione di file *COBie (Construction Operations Building Information Exchange)* nel formato IFC o in altro formato.

I COBie sono file di dati che catturano informazioni di specifico interesse per le attività di Facility Management nella fase di esercizio. Tali informazioni possono essere di vario genere come:

- definizione delle zone di manutenzione e classificazione in funzione delle priorità;
- date di installazione di componenti o impianti;
- elenchi attrezzature;
- schede tecniche dei prodotti utilizzati, attrezzature e impianti;
- contatti dei produttori e dei venditori di tutte le componenti installate;
- contratti di garanzia;
- liste dei pezzi di ricambio di sistemi e componenti utilizzati nel progetto;
- programmi di manutenzione preventiva;
- storico degli interventi di manutenzione effettuati;
- localizzazione degli interventi di manutenzione.

La bassa accuratezza e accessibilità o, spesso, la totale mancanza delle informazioni relative al manufatto generano delle inefficienze nelle attività di progettazione nonché in fase di cantiere, ma anche nelle attività di manutenzione originando ritardi negli interventi ed il necessario arresto delle attività con conseguente aumento degli sprechi economici.

1.2.2 BIM Maturity Levels

Come già accennato precedentemente, il BIM è in continuo sviluppo, può essere utilizzato per diversi scopi ed a diversi livelli di approfondimento. Per tale motivo l' *UK Department of Business Innovation and Skills (BIS)* ha definito un modello di maturità del BIM per chiarire i livelli di competenza attesi, gli standard di supporto ad ogni livello di approfondimento e come essi possono essere applicati ai progetti [13].

In tale modello vengono definiti, in maniera chiara, come può essere adottato il BIM, partendo da un *Livello 0* di base, che concettualmente corrisponde ad una tradizionale progettazione CAD, fino ad un *Livello 3* che corrisponde all'utilizzo del BIM per la gestione dell'intero ciclo di vita dell'opera e quindi per il Lifecycle Management [14] (Figura 1.3).

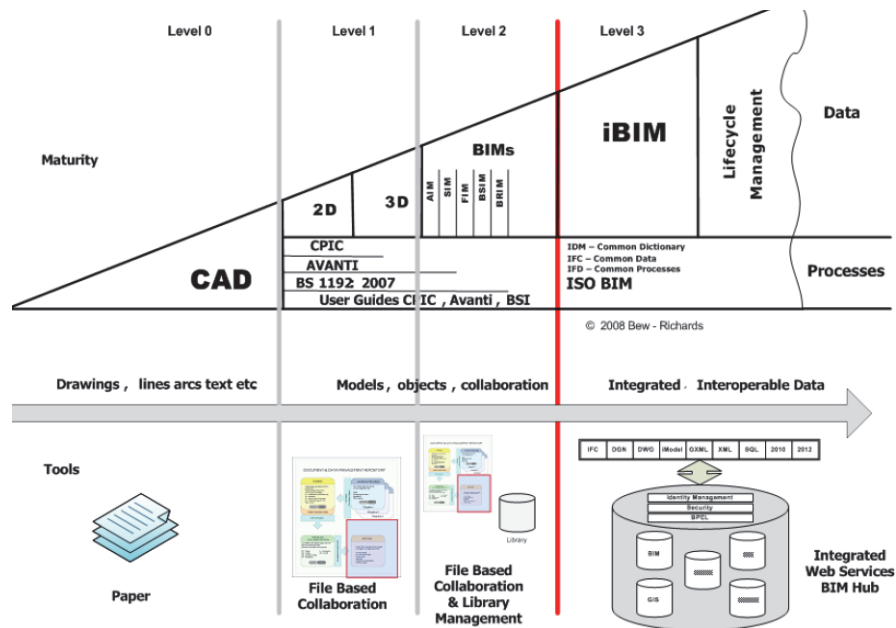


Figura 1.3 Maturity levels per l'utilizzo del BIM (Fonte: BSI PAS 1192-2) [14]

Il BIS ha interpretato i tre livelli di approfondimento come:

- Livello 0: il BIM utilizzato come strumento CAD per progettazioni in 2D e fogli di carta o fogli elettronici come strumenti di scambio di dati ed informazioni;
- Livello 1: Il BIM utilizzato come strumento CAD per progettazioni 2D e 3D, con un approccio collaborativo di scambio di dati in maniera standardizzata, in accordo il British Standards (BS1192:2007), in termini di struttura dei file e formato. In tale livello non è prevista l'integrazione con i dati commerciali e la gestione dei costi.
- Livello 2: Il BIM utilizzato come strumento di modellazione 3D dove ad ogni oggetto del modello 3D sono associate tutte le informazioni utili di progetto. Anche le informazioni commerciali e di costo sono gestite con strumenti *ERP (Enterprise Resource Planning)* compatibili con la metodologia BIM. E' prevista anche l'integrazione del modello BIM con i tempi (modello 4D) e con i costi (modello 5D). Il Governo britannico ha richiesto l'utilizzo del BIM ad un livello 2 si approfondimento entro il 2016.
- Livello 3: Il BIM utilizzato come strumento completamente integrato di tutte le informazioni di progetto e di realizzazione dell'opera compatibili con lo standard IFC e totalmente collaborativo utilizzando anche servizi di condivisione web tipo *cloud*. A questo

livello il BIM viene utilizzato nella forma più approfondita arrivando a gestire il 4D, 5D e il 6D (gestione del ciclo di vita dell'immobile).

Già nel livello 2 sono stati introdotti il modello 4D ed il modello 5D, di cui, il primo corrisponde alla gestione dei tempi; mentre il secondo corrisponde alla gestione dei costi, fino ad arrivare al modello 6D che corrisponde all'utilizzo più avanzato del BIM e cioè alla gestione del Facility Management nella fase di uso dell'opera.

1.2.3 Modello 4D: la gestione dei tempi

Il *Modello 4D* (integrazione con il cronoprogramma), che permette di gestire i tempi di una commessa, è un altro aspetto molto importante che l'approccio BIM consente di implementare. La suddivisione e la scomposizione del progetto in attività semplici, consente la "visione dell'avanzamento" e lo stato dei manufatti in ogni preciso momento. Ciò è possibile andando ad associare a ciascuna attività di cantiere, definita nel cronoprogramma e rappresentata mediante un diagramma di Gantt, uno o più elementi specifici presenti all'interno del modello. In tal modo, tutte le modifiche del modello BIM avranno un impatto sul cronoprogramma di costruzione e, allo stesso tempo, il modello stesso sarà in grado di identificare automaticamente quei cambiamenti che interesseranno il percorso critico (*Critical Path*), ossia la sequenza delle attività programmate che determina la durata della commessa. Così il modello sarà in grado di indicare quale impatto si avrà sui tempi di ultimazione dei lavori, e consentirà il controllo del percorso critico del progetto.

1.2.4 Modello 5D: la gestione dei costi

Il *Modello 5D*, permette di gestire i costi di una commessa e di conseguenza la produzione di un cantiere. La dimensione "produzione e tempo" può essere integrata nel modello attraverso lo strumento BIM, ottenendo il cosiddetto modello 5D.

Le informazioni che possono essere estrapolate dal modello sono le quantità associate alla singola attività di lavoro e relative a: risorse ed attrezzature (intese come materiali, manodopera e sub-forniture) quali elementi del processo costruttivo della singola attività a cui è possibile associare valori diversi e ricavare quindi una stima a supporto del modello gestionale dell'opera. Nella progettazione tradizionale, la stima della

produzione (costi/ricavi o indice parametrico di produzione) inizia con la digitalizzazione degli elaborati cartacei di progetto, oppure l'importazione di disegni CAD in un software di stima risorse, oppure ricavando manualmente le quantità dai suddetti elaborati. Tutti questi metodi inducono a potenziali quanto inevitabili errori umani. Usando un modello BIM invece è possibile ricavare indici e valori relativi a: "avanzamento fisico" distinto per "Totali per Attività" o per "Singola Attività", oltre, naturalmente, agli indici di completamento e completamento diretto per attività. Le informazioni sono sempre coerenti col progetto ed è possibile effettuare previsioni economiche di gestione della commessa in tempo reale ad ogni modifica progettuale, sia in caso di variante sia di modifiche apportate dal committente. Anche un piccolo cambiamento all'interno del modello, come le dimensioni di un infisso, viene automaticamente aggiornato nel computo metrico.

1.2.5 Il Modello 6D: facility Management

Il BIM riesce ad integrare l'ICT (Information and Communication Technology) dell'intera industria delle costruzioni mediante un modello unico, integrato e condiviso, costituito dai dati di prodotto che descrivono sia le caratteristiche meccaniche, fisiche e termiche, sia funzionali, di manutenzione e di costo, collegate ai singoli oggetti che compongono il progetto complessivo.

La possibilità del BIM di archiviare qualsiasi tipo di informazione permette a tale strumento di avere enormi potenzialità in fase di Facility Management (FM). Per garantire la gestione della manutenzione dell'opera bisogna disporre del modello a lavori ultimati, quindi del "modello BIM-*as built*" che descrive l'opera così come è stata realmente realizzata, nel dettaglio di ogni singolo elemento, componente e apparecchiatura di cui è costituita l'opera stessa.

In tale modello anche tutti gli impianti a servizio dell'edificio sono oggetto di progettazione tridimensionale BIM e di parametrizzazione dei singoli oggetti.

Il livello di dettaglio del modello "*as built*" rappresenta un vero e proprio archivio dal quale è possibile reperire qualsiasi informazione utile per la programmazione ed il coordinamento di tutte le attività di manutenzione durante tutta la vita utile di qualsiasi opera progettata in BIM.

Il modello BIM permette il reperimento immediato di tutte le tavole progettuali come carpenterie strutturali, piante e sezioni architettoniche, distribuzioni di spazi e volumi, modelli di calcolo strutturale ed impiantistico e tutti gli elaborati prodotti in fase di progettazione e costruzione dell'opera. Tale database di informazioni rappresenta anche il punto di partenza per qualsiasi intervento successivo, quali ampliamenti, ristrutturazioni, richieste di nuove concessioni, adeguamenti normativi in ambito strutturale, energetico e impiantistico aggiornando direttamente il modello, evitando la riprogettazione e quindi abbattendo notevolmente gli sprechi in termini di tempi e costi futuri di interventi di manutenzione straordinaria. La bassa accuratezza, accessibilità o spesso la totale mancanza delle informazioni relative al manufatto generano delle inefficienze nelle attività di manutenzione originando ritardi negli interventi ed il necessario arresto delle attività con conseguente aumento degli sprechi economici. Con il BIM tale ostacolo viene superato mediante la gestione delle informazioni e dei dati di progetto sia interagendo direttamente con il modello BIM, sia attraverso l'utilizzo di applicazioni software, per la gestione del Facility Management che interagiscono direttamente con il modello parametrico. *"ArchiBUS FM"* e *"FMsystem"* sono le applicazioni software che hanno dimostrato un'elevata integrazione con il BIM per la gestione del FM delle opere.

L'integrazione del FM con il modello BIM permette:

- l'ottimizzazione delle procedure di programmazione della manutenzione;
- la riduzione dei tempi di manutenzione;
- la riduzione degli errori nella diagnosi dei guasti;
- maggiore compatibilità delle componenti da sostituire.

Tali aspetti migliorativi forniti dal BIM in sede di gestione delle attività di manutenzione si concretizzano innanzitutto in una maggiore efficienza del processo, con standard qualitativi più elevati a costi minori, nonché una drastica riduzione dei disagi all'utenza finale, con minor tempo di arresto degli impianti ed inagibilità degli ambienti.

La nascita del BIM, infatti, ha reso più efficienti anche i sistemi *CAFM* (*"Computer Aided Facilities Management"*) che sono il complesso di strumenti informatici a supporto del Facility Management per la gestione dell'opera durante la sua vita utile. I sistemi CAFM sono nati dall'integrazione di strumenti *CAD* (*"Computer Aided Design"*) con i database di informazioni necessarie per l'attività di FM e consentono:

- gestione degli spazi e delle attrezzature;
- gestione della sicurezza del lavoro;
- monitoraggio dei consumi e dei livelli di benessere;
- gestione della manutenzione;
- gestione dell'Help Desk;
- gestione della security;
- gestione finanziaria e degli inventory.

L'introduzione del BIM nei sistemi CAFM ha permesso una forte riduzione dei tempi per l'immissione dei dati necessari per il FM, in quanto, già presenti in maniera dettagliata nel modello unico BIM. Il sistema CAFM, infatti, riceve direttamente i dati mediante file COBie dal modello BIM grazie alla realizzazione di interfacce ad hoc nei software BIM-oriented.

Tali sistemi, oggi, sono disponibili anche web-based e quindi fruibili anche mediante dispositivi mobili, quali ad esempio tablet o smartphone che permettono un monitoraggio costante dell'opera.

Il sistema CAFM integrato con il modello BIM garantisce forti vantaggi in diverse aree di competenza della gestione della manutenzione generale dell'opera.

Gestione degli spazi e delle attrezzature

Il sistema CAFM, collegato al modello 3D BIM dell'opera, raccoglie e gestisce tutti i dati riguardanti gli spazi dell'immobile e delle attrezzature a disposizione in maniera dettagliata. Per ciascun oggetto o bene il database contiene i dettagli relativi alla sua costruzione, acquisizione, titolo giuridico d'uso (proprietà, locazione, noleggio, leasing, ecc.), modalità e livello d'uso.

Dall'utilizzo di tali strumenti scaturiscono diversi vantaggi come il monitoraggio automatico delle scadenze contrattuali d'uso del bene (pagamento canoni, rinnovi, riscatti), l'immediata valorizzazione economica ai fini del calcolo degli ammortamenti o del valore degli assets.

Gestione della sicurezza del lavoro

Il database è caratterizzato, oltre che dal registro delle attrezzature, anche dalle risorse umane presenti in modo tale da poter prevedere i rischi sul luogo di lavoro. E' possibile, inoltre, registrare gli incidenti, gli infortuni e gli episodi di malattia professionale in modo tale da poter ottenere automaticamente l'analisi storica e progettare strategie per mitigare e

prevedere le circostanze di rischio ed ottimizzare la sicurezza sul luogo di lavoro.

Monitoraggio dei consumi e dei livelli di benessere

Tale sistema consente il monitoraggio del consumo di energia degli impianti attraverso il reperimento continuo di dati da fonti esistenti quali contatori e rilevatori di carico in modo tale da poter effettuare confronti e di gestire in maniera efficiente il consumo energetico. E' possibile, interagendo con il modello 3D BIM, individuare le aree di maggior consumo energetico e quelle con buoni regimi in modo tale da poter effettuare strategie di efficientamento energetico. Allo stesso modo del controllo dei consumi energetici, con tale strumento, è possibile monitorare anche la qualità dell'aria respirata sul luogo di lavoro, la temperatura, l'umidità, l'emissione di fumi ed il livello dei rumori in modo tale da poter garantire un livello ottimale della vivibilità e del benessere dell'immobile.

Gestione delle manutenzioni

Il modello 3D BIM, come detto in precedenza, è caratterizzato da una modellazione parametrica di tutti gli impianti e le attrezzature utilizzate, per cui, evidenziando un qualunque elemento del modello, è possibile reperire non solo tutte le informazioni inserite in fase di progettazione ma anche tutte le informazioni relative al suo utilizzo e alla sua storia manutentiva.

I software per la gestione della manutenzione *post operam*, integrati con il BIM, detti anche *Computerized Maintenance Management System (CMMS)*, permettono di gestire i programmi di manutenzione di ogni singolo impianto e di tutte le attrezzature e di archiviare tutta la loro storia manutentiva.

Tali strumenti, infatti, permettono di effettuare strategie di manutenzione preventiva, riducendo notevolmente i tempi di fermo macchina; inoltre è possibile gestire preventivi d'acquisto, ordini di lavoro, componenti da sostituire, richieste di intervento inviando tali richieste direttamente ad uffici interni competenti o a fornitori esterni.

Gestione dell'Help Desk

In tale ambito, il sistema riesce a garantire, con uno sportello virtuale (piattaforma web), la gestione dei disservizi e dei guasti segnalati dagli utenti dell'immobile. Interagendo direttamente con il modello BIM è

possibile risalire in maniera puntuale alla segnalazione del disservizio e, consultando tutte le informazioni fornite dallo stesso modello, è possibile intervenire direttamente sulla causa del guasto.

Il sistema, inoltre, riesce ad aggiornare ai segnalatori i tempi di risoluzione del disservizio ed è fruibile anche su dispositivi mobili. Sulla medesima piattaforma web è possibile anche gestire le prenotazioni delle aree comuni quali sale riunioni, spazi condivisi o addirittura prenotare attrezzature condivise.

Gestione della Security

Tale sistema permette anche di gestire tutto quello che riguarda la sicurezza di un immobile e quindi il controllo degli accessi, la videosorveglianza, sistemi antintrusione, sensori di movimento. Tutto ciò può essere collegato a badge univocamente identificati in modo tale da poter controllare gli ingressi ed i percorsi dei singoli utenti grazie alla radiofrequenza del badge.

Gestione Finanziaria e degli Inventory

Il sistema CAFM basato sul BIM permette in maniera agevole di poter gestire e registrare tutti i costi associati a beni durevoli (edifici, spazi e attrezzature), beni di consumo, magazzini e rimanenze.

Tale aspetto diventa di fondamentale importanza per chi ha funzioni amministrative e direzionali in quanto fornisce un'analisi accurata dei costi e quindi consente di programmare e realizzare strategie di budgeting.

Tale strumento è anche funzionale all'attività di controllo delle forniture in quanto è possibile, in ogni istante, conoscere la data, quantità e permanenza delle forniture in modo tale da poter effettuare analisi di costo e valutare eventuali perdite o sprechi.

1.2.6 Levels of Detail (LOD)

Come detto in precedenza, il BIM permette di gestire l'intero ciclo di vita di un'opera, dalla fase progettuale (preliminare, definitiva ed esecutiva) fino alla gestione dell'opera durante la vita utile con un modello BIM "*as built*" che rappresenta l'opera così come realmente è stata realizzata con tutte le eventuali modifiche effettuate in fase di realizzazione.

Con un approccio di progettazione di tipo tradizionale ogni fase di progetto (preliminare, definitiva ed esecutiva) è gestita, spesso, in maniera

indipendente e tale approccio comporta un notevole onere sia in termini di tempo che di risorse impiegate.

Con un approccio alla progettazione di tipo BIM tutte le fasi di progettazione sono totalmente collegate tra loro mediante un continuo processo di arricchimento e di crescita del modello unico dell'opera.

Data la natura parametrica della progettazione BIM e l'ingente mole di dati da gestire è nata l'esigenza di definire dei livelli di dettaglio che definiscono la quantità ed il grado di approfondimento delle informazioni che devono essere fornite dal modello.

Tale obiettivo è stato perseguito nel *Model Progression Specification (MPS)* per il BIM, adottato dall'American Institute of Architects (AIA), documento dove si definiscono i livelli di dettaglio, LOD, che descrivono le informazioni attese ad ogni livello [13].

La struttura caratterizzata dai LOD funge sia come riferimento per il team di progettazione sia come obiettivo da raggiungere in funzione del prodotto che si vuole realizzare.

I LOD si caratterizzano in 5 livelli di dettaglio [15]: LOD 100, 200, 300, 400, 500 che possono essere definiti come:

- **LOD 100:** tale livello di dettaglio è caratterizzato da una rappresentazione del progetto di tipo concettuale, con un modello di soli volumi e forme geometriche nel quale non sono fornite informazioni in merito ai materiali ed alle componenti. Tale livello ha scopo puramente rappresentativo e di visualizzazione preliminare per ipotizzare scenari urbanistici ed economici. E' possibile, infatti, iniziare ad ipotizzare valutazioni economiche puramente preliminari una volta noti i volumi e le superfici. I singoli oggetti non sono ancora modellati.
- **LOD 200:** il modello 3D fornisce una rappresentazione semplificata dell'opera ma è possibile reperire, in maniera ancora approssimativa, orientamento, forme, dimensioni e posizione dell'opera. Agli oggetti del modello sono collegate informazioni non solo grafiche ma anche di tipo meccanico, fisico e termico, per cui, è possibile effettuare scelte progettuali. Con tale livello di dettaglio è possibile effettuare valutazioni di costo ancora preliminari ed è possibile fare una prima previsione dei tempi di costruzione dell'opera.
- **LOD 300:** tale livello di dettaglio è comparabile con la fase esecutiva del progetto di un'opera. Gli elementi del modello sono definiti in termini di quantità, dimensione, forma e posizione; inoltre sono

presenti tutti i parametri di tipo meccanico, fisico, termico e di costo. Con il modello a questo livello di dettaglio è possibile il coordinamento interdisciplinare dei vari livelli progettuali (architettonico, strutturale ed impiantistico), al fine di verificare le interferenze. Il LOD 300 è il livello di dettaglio adatto per indire le gare d'appalto per l'assegnazione dei lavori in quanto sono contenute tutte le specifiche dell'edificio sia in termini estetici e funzionali sia economici. E' possibile ottenere il computo metrico estimativo dell'opera con le relative incidenze di manodopera, trasporti e materiali. Infine è possibile ottenere la stima dei tempi per la conclusione dei lavori in maniera integrata con il cronoprogramma.

- **LOD 400:** parte da un LOD 300 e quindi da un livello esecutivo di progetto ed è dedicato all'inserimento di tutte le informazioni necessarie alla costruzione e al montaggio dei singoli componenti.

Il LOD 400 comprende i casi in cui le tecniche di costruzione, previste in fase di progettazione, sono modificate nella fase di esecuzione; in questo livello si aggiorna il modello a seguito di tali modifiche. Il computo metrico estimativo è altamente dettagliato e comprende i costi aggiornati in funzione dei preventivi dei produttori e dell'impresa edile. Con tale livello di dettaglio delle tecniche costruttive e di tutte le lavorazioni dettagliate da effettuare è possibile anche stimare un cronoprogramma dei lavori affidabile e cercare di ottimizzarlo.

- **LOD 500:** E' il livello più dettagliato per un modello BIM, denominato anche modello "*as built*" e rappresenta l'opera così come è stata realizzata; sono, inoltre, integrate tutte le informazioni di esecuzione e di eventuali varianti effettuate in corso d'opera. Come già accennato precedentemente il modello 'as built' è lo strumento che permette di effettuare le operazioni di Facility Management, in quanto, si hanno a disposizione tutte le informazioni dai file COBie.

Vale la pena notare la forte similitudine tra i LOD e le diverse fasi progettuali (preliminare, definitiva ed esecutiva). Tra gli obiettivi del CEN (Comitato Europeo di Normalizzazione), infatti, è quello fornire agli enti nazionali di normazione una direttiva di riferimento al fine di poter standardizzare l'utilizzo del BIM per le opere civili.

Una prima ipotesi può essere fornita proprio dall'utilizzo dei LOD in maniera congruente con la normativa italiana (DPR 207/2010 e UNI 10722)

e quindi attribuire un LOD ad ogni fase di progetto, come di seguito riportato:

Fase di progettazione	LOD
Studio di Fattibilità	100
Progetto preliminare	100/200
Progetto definitivo	200/300
Progetto esecutivo	300/400
As Built	500

Tabella 1.1 Analogia tra LOD e normativa italiana

1.3 IL BIM NEL PROCESSO EDILIZIO

La realizzazione di un'opera civile comporta un'elevata complessità di procedure ed allo stesso tempo un elevato numero di figure professionali coinvolte. Entrambi gli aspetti, se non sono gestiti mediante un processo di coordinamento efficiente sia tra i diversi livelli di progettazione sia nell'interazione tra la progettazione e gli altri attori coinvolti, determinano inevitabili conflitti.

Tali conflitti nella fase di cantierizzazione dell'opera, generano spesso rallentamenti, necessità di varianti, contenziosi, anomalie e difettosità esecutive, con conseguente spreco di tempi e risorse economiche.

La metodologia BIM permette l'ottimizzazione di tutto il processo edilizio, esso, infatti, è uno strumento a supporto della gestione di tutte le fasi per la realizzazione e la gestione di un'opera.

L'elevato numero di figure tecniche coinvolte determina uno scambio consistente di dati e di informazioni che, in un approccio di progettazione tradizionale CAD-based, rischiano di essere perse riducendo la qualità e l'affidabilità della progettazione globale con impatto negativo, come già detto, in termini di tempi, costi e standard qualitativi della realizzazione.

La filosofia BIM nella gestione dell'intero processo edilizio, ottimizza invece il complesso dell'interazioni (workflow) tra i Progettisti, il Direttore dei Lavori, il Committente, l'Impresa esecutrice, i fornitori e il Direttore di Cantiere, migliorando sensibilmente il processo di Decision Making.

Il complesso delle interazioni nel workflow BIM, a differenza di una progettazione tradizionale, è gestito in maniera condivisa da tutte le figure interessate grazie alla centralità del modello BIM. Con tale approccio di

lavoro, tutte le informazioni e le modifiche sono inserite nel modello centrale e, quindi, tutto il team previsto nella commessa è sempre a conoscenza in maniera dettagliata del progetto e delle diverse fasi della commessa (Figura 1.4).

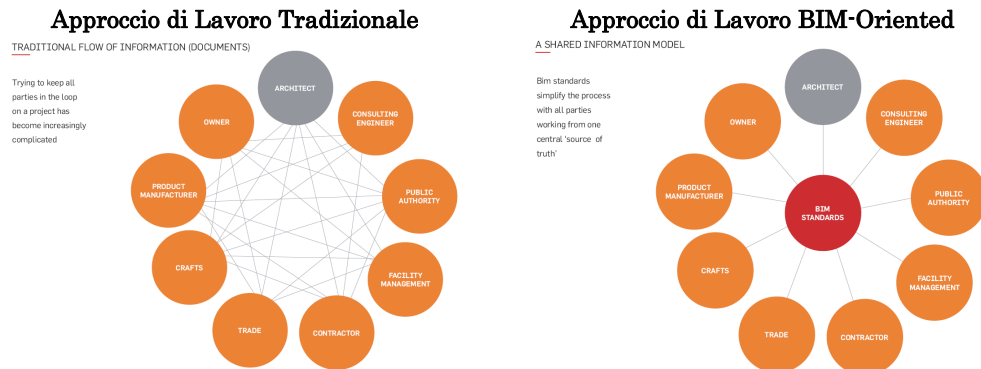


Figura 1.4 Confronto approcci di lavoro – Tradizionale vs BIM Standards (fonte: BD – WhitePaper – BIM) [16]

E' proprio grazie a questo approccio basato sulla condivisione, detto anche *“worksharing”*, che il BIM riesce a dare supporto a tutto il processo edilizio, dalla fase di ideazione, progettazione e costruzione dell'opera fino al suo esercizio. E' essenziale che l'intero team della commessa abbia accesso al modello centrale; tuttavia tale accesso è a solo scopo di aggiornamento sullo stato di avanzamento dell'opera. Le modifiche, non vanno apportate direttamente al modello centrale bensì, in un approccio BIM reale, i membri del team lavorano su file locali isolati che si differenziano in funzione dell'ambito di competenza. Tali file locali sono direttamente collegati al file centrale, allocato in un server condiviso, il quale legge le modifiche effettuate su file locali che, a seguito di controlli di congruenza, sono inserite nel modello centrale unico.

Nella **fase di progettazione**, l'approccio BIM-oriented, permette di integrare tutti i livelli progettuali: progetto strutturale, progetto architettonico e progetto impiantistico. Tale integrazione permette di evidenziare preventivamente incoerenze progettuali così come interferenze reali tra gli elementi costruttivi.

Tale aspetto, detto anche *“Clash Detection”*, incide positivamente in termini di qualità nella fase di progettazione in quanto permette di individuare ed eliminare le interferenze tra gli elementi architettonici, strutturali ed impiantistici nel progetto 3D.

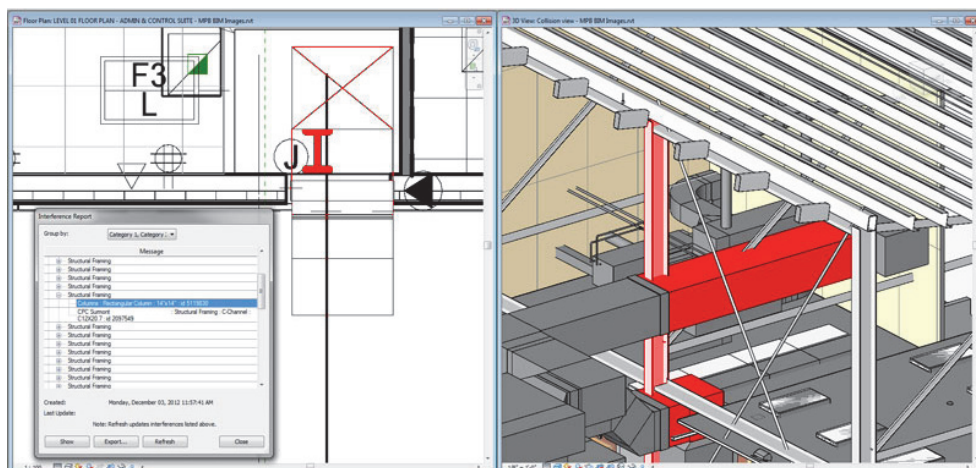


Figura 1.5 Individuazione interferenze tre elementi del modello BIM (Clash Detection)

Tale peculiarità permette di ridurre al minimo, se non eliminare del tutto, il rischio dell'errore umano in fase di progettazione. Il Clash Detection può essere considerato come la più accurata procedura di controllo delle incongruenze tra i diversi livelli di progettazione esistente nel campo ingegneristico. L'utilizzo di tale procedura di controllo permette la restituzione di tavole esecutive prive di incongruenze progettuali e di elevata qualità nei dettagli costruttivi, proprietà che determinano un grande valore aggiunto anche in fase di realizzazione dell'opera, riducendo notevolmente il rischio di errori in cantiere.

Un'altra procedura di controllo utilizzata in fase di progettazione, garantita dall'utilizzo del sistema BIM, è il *"Code Compliance"*.

Tale metodologia permette di sviluppare analisi e controlli in funzione di regole definite dall'utente che possono essere relative a distanze tra elementi, spazi d'uso, vie di fuga, volumi etc. Con tale strumento sarà immediata la verifica del rispetto di alcune normative in termini di sicurezza, accessibilità e circolazione dell'intero complesso. Anche in questo caso il processo di controllo applicato alla commessa mediante il Code Compliance garantisce un grande valore aggiunto in termini di qualità di realizzazione dell'opera.

Nella **fase di realizzazione** l'integrazione tra il modello architettonico, strutturale ed impiantistico permette un accesso agevole a dati condivisi al fine di una migliore organizzazione delle fasi di cantiere. Tale integrazione spinta della progettazione, l'aggiornamento automatico dei progetti ed il

Clash Detection, permettono la valutazione istantanea della ricaduta, sulla globalità dell'intervento, di soluzioni progettuali locali che spesso si adoperano in cantiere.

La soluzione di tale problematica è sicuramente un aspetto chiave nell'ottimizzazione della gestione del cantiere ma non è l'unico, infatti, di seguito, si elencano i vantaggi che tale modellazione porta in tal senso.

Modello 3D. La realizzazione di un modello 3D consente una grande capacità di visualizzazione attraverso una vera e propria esplorazione del modello (Model Walkthrough). In questo modo, il Direttore dei Lavori, il team di progettazione e le imprese esecutrici possono collaborare e comunicare in maniera più efficace prevedendo riunioni di coordinamento, le quali hanno lo scopo di individuare e correggere in anticipo potenziali problemi di conflitto tra le varie fasi di cantiere attraverso l'esplorazione del modello 3D. In questo modo si dispone di uno strumento per controllare *ex ante* sia le attività di cantiere che la logistica del sito, raffigurando lo spazio di utilizzo del sito, come lo stoccaggio dei materiali, contestualmente alla realizzazione del complesso di edifici. Inoltre, è possibile verificare *ex post* la corrispondenza tra il progettato ed il costruito, ossia un rilievo as-built, utile per la fase di collaudo.

Sicurezza di cantiere. Gli strumenti di integrazione tra cronoprogramma e modello BIM, insieme alla visualizzazione 3D dello stesso modello precedentemente discussi, possono essere impiegati anche ai fini del miglioramento della sicurezza in cantiere. Le attività di gestione della sicurezza possono essere collegate direttamente al modello 4D attraverso il cronoprogramma. Quest'ultima si presenta come opportunità per revisionare e valutare la sfera della sicurezza di cantiere come parte del processo edilizio, per migliorare la collaborazione in fase di pianificazione e monitoraggio della sicurezza di cantiere e per migliorare la comunicazione tra i vari operatori di cantiere. In particolare, il Direttore dei Lavori e il Coordinatore per la Sicurezza, assistiti dal Direttore di Cantiere e dal BIM Manager, possono avvalersi del modello BIM per addestrare gli operatori di cantiere sulle attività maggiormente rischiose dal punto di vista della sicurezza attraverso simulazioni virtuali 3D delle stesse. Nel processo di comunicazione della sicurezza risulta di fondamentale importanza la formazione degli operatori, l'informazione, le istruzioni e le regole impartite in cantiere.

Nel flowchart di Figura 1.6, si evince come il BIM si integra con la sfera di gestione della sicurezza.

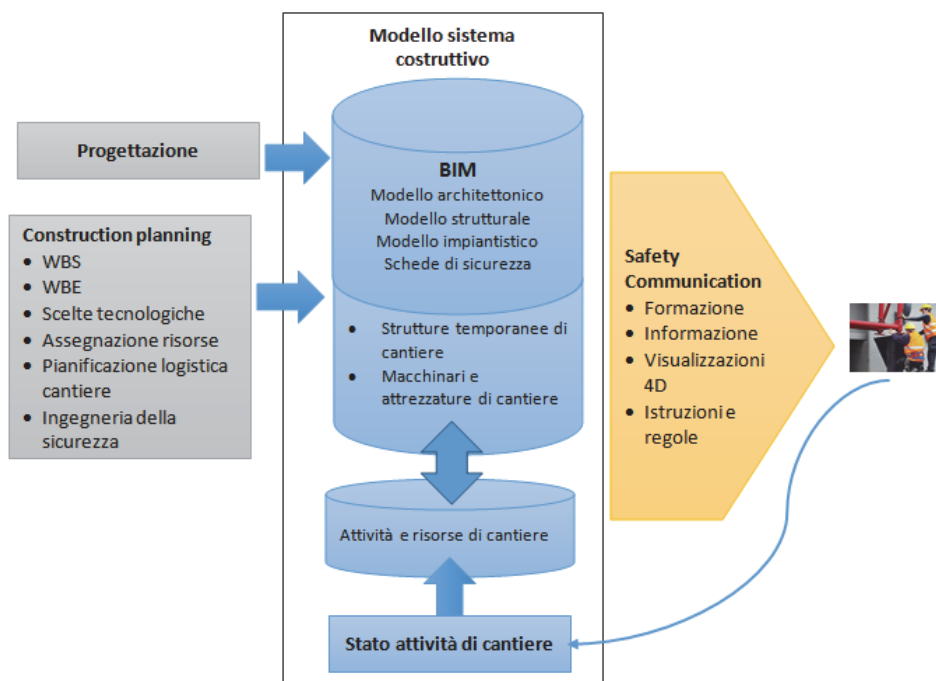


Figura 1.6 Il BIM e la Sicurezza in cantiere

Impiegare pertanto il BIM nell'ambito della Sicurezza di cantiere significa enfatizzare il ruolo che quest'ultima ha all'interno della progettazione. La sicurezza è intesa come criterio di progettazione da integrare nel modello BIM.

L'approccio all'analisi automatica/semiautomatica dei rischi della sicurezza riguarda la verifica dei contenuti e dei dettagli in termini di sicurezza, ossia una vera e propria attività di verifica e controllo da eseguirsi prima della redazione dei singoli piani di sicurezza (POS, PSC). Questo approccio richiede la conoscenza dei potenziali rischi presenti in cantiere che saranno poi verificati all'interno del modello, col fine di ottenere un allineamento tra quest'ultimo ed i singoli piani di sicurezza. Il tempo è una dimensione essenziale in tale tematica, giacché il modello rappresenta un determinato momento temporale della situazione del cantiere.

Capitolo 2.

IMPLEMENTAZIONE DI OGGETTI BIM

La progettazione BIM, come già descritto nel capitolo precedente, è caratterizzata da una modellazione parametrica di ogni singolo oggetto o componente del modello globale dell'opera. La rivoluzione nella progettazione, determinata dal BIM, è legata proprio al passaggio da una rappresentazione puramente grafica (i.e. CAD-based), dove ogni singolo oggetto è riconoscibile mediante dettagli grafici e legende, a una rappresentazione tridimensionale ad attributi (i.e. BIM-based), dove il singolo oggetto è rappresentativo delle proprie caratteristiche di diverso genere come proprietà meccaniche, fisiche e termiche fino ad arrivare a dettagli di costo, di manutenzione e particolari costruttivi [17].

Il modello BIM è quindi caratterizzato dall'insieme degli oggetti e dei sistemi che costituiscono l'opera da realizzare; ne discende che la fase della loro implementazione e caratterizzazione riveste un ruolo delicato per la buona riuscita del progetto. Per questo motivo è possibile asserire che, in una progettazione BIM-oriented, la fase di reperimento e implementazione degli oggetti BIM è determinante e quindi necessita di un investimento maggiore in termini di tempo e risorse dedicate [18].

Le industrie leader nella produzione di prodotti per l'edilizia, già da anni, hanno intuito la grande rivoluzione generata dal BIM e hanno destinato ingenti investimenti per trasferire i propri cataloghi in formato IFC fruibili direttamente in piattaforme di progettazione BIM. Tali cataloghi sono oggi già consultabili in librerie disponibili in rete.

La rivoluzione determinata dal BIM permette al progettista di ampliare il dominio delle soluzioni progettuali avendo a disposizione una vasta gamma di prodotti ed elementi di diverse prestazioni e, contestualmente, di avere sotto controllo tutti i parametri che influenzano le varie analisi progettuali. Ad esempio, è possibile valutare, in maniera immediata, la risposta in termini energetici di un immobile al variare della tipologia di serramenti esterni o addirittura modificando alcuni sottoprodotti come la tipologia di vetro utilizzato. La velocità e l'immediatezza nel condurre analisi comparative di scenari progettuali è una delle caratteristiche

principali del BIM e risulta determinante a tutti i livelli progettuali quali strutturale, architettonico ed impiantistico.

Oltre al ricorso a librerie esistenti è possibile creare oggetti “*ad hoc*”, sia per riprodurre elementi che non sono presenti nei cataloghi BIM esistenti sia per rispondere a criteri prestazionali specifici.

Tale opportunità è resa possibile in quanto gli strumenti a supporto della metodologia BIM sono sistemi aperti e quindi sempre modificabili o integrabili di parametri ed informazioni. Quest’ulteriore principio è alla base della filosofia BIM che mira a gestire l’opera durante tutto il suo ciclo di vita dalla progettazione passando per la realizzazione fino alla gestione della fase di esercizio.

E’ necessario caratterizzare l’opera e i suoi oggetti in funzione della fase presa in esame, in quanto, le informazioni necessarie per gestire il ciclo di vita di un’opera rivestono priorità differenti in funzione della fase che si sta analizzando.

In definitiva, è possibile definire un oggetto BIM in funzione del livello di dettaglio (LOD) che si vuole raggiungere partendo da:

- parametri di tipo meccanico, fisico e termico per la fase di progettazione;
- parametri di quantità e costo per la fase di computo delle opere;
- parametri di rendimento, consumi e storico guasti per la fase di gestione della fase di uso dell’opera.

Gli oggetti BIM, come si vedrà avanti, sono la rappresentazione tridimensionale “reale” in termini dimensionali, prestazionali ed economici di tutte le componenti di un’opera; essi sono fruibili mediante file in formato IFC e direttamente utilizzabili nelle piattaforme software BIM in maniera interoperabile con i diversi programmi di progettazione.

Come già detto, sia la scelta che la creazione di oggetti BIM influenza tutto il modello BIM dell’opera che si vuole realizzare e per questo motivo è necessario avere un’accurata conoscenza di tutte le caratteristiche e della complessità di tali oggetti prima di avviare una qualsiasi progettazione in BIM.

A tal proposito, si affronta nel dettaglio la modellazione di alcuni oggetti BIM relativi alle seguenti categorie:

- elementi non strutturali per il risparmio energetico;
- elementi strutturali.

Per ciascuna di queste categorie sono stati sviluppati degli “oggetti tipo” in formato compatibile dai principali software BIM.

Tali oggetti costituiscono un caso studio da mettere a disposizione di aziende del settore delle costruzioni per consentire sia di effettuare personalizzazioni sia di apprezzare le potenzialità di una simile attività.

Lo scopo è infatti una maggiore diffusione tra gli operatori del settore, in un ambiente interoperabile di tipo BIM, delle informazioni sui propri prodotti (es. caratteristiche fisiche, funzionali, performance del prodotto, costo).

In dettaglio sono stati quindi sviluppati prodotti relativi a:

- infissi per edilizia residenziale ad alte prestazioni energetiche;
- elementi strutturali in c.a.

2.1 IMPLEMENTAZIONE DI OGGETTI NON STRUTTURALI IN BIM

L'attività svolta è stata dunque caratterizzata dallo sviluppo di diversi oggetti BIM, dove, una parte di tali oggetti ricade nella categoria di elementi non strutturali. Tale implementazione si è resa necessaria per comprendere le reali potenzialità del BIM e per conoscere in maniera dettagliata i parametri gestibili in maniera interoperabile con gli altri software di calcolo ingegneristico.

Nel presente caso di studio è stata affrontata la modellazione di un serramento per uso esterno. Lo sviluppo di un oggetto può essere condotto partendo dalla modellazione di un solido in piani 2D ((x, y) ed (x, z)), e definendo i vari livelli in altezza in modo tale da avere infine una modellazione 3D dell'oggetto stesso.

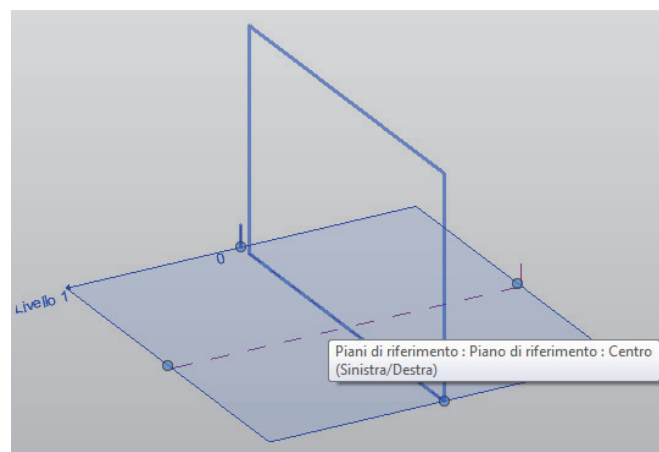


Figura 2.1 Modellazione di un solido in piani 2D

impiantistico. Questo permette di effettuare una prima caratterizzazione prestazionale dell'oggetto e cioè di stabilire per quale tipologia di analisi i parametri inseriti sono utili. Nel caso della finestra si fa riferimento al campo energetico in quanto i suoi parametri prestazionali sono necessari al fine di effettuare bilanci energetici dell'edificio e dell'involucro edilizio.

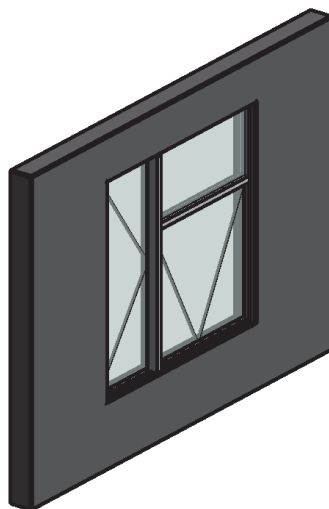


Figura 2.3 Modellazione 3D oggetto finestra

A questo punto è possibile caratterizzare l'oggetto in funzione dei parametri prestazionali, note anche come proprietà analitiche, dell'oggetto in questione secondo le informazioni fornite o dalle schede tecniche o dal produttore.

Nel caso in esame si sono monitorati i seguenti parametri:

- trasmittanza luminosa;
- indice di riscaldamento alla radiazione solare;
- resistenza termica (R) in $(m^2 \cdot K)/W$;
- coefficiente di scambio termico (U)

E' importante sottolineare che è possibile inserire dati ed informazioni in qualsiasi momento, sia nella fase di modellazione dell'oggetto sia nella fase di progettazione di un'opera civile sia nella fase di gestione dell'opera.

Nella Figura 2.4, si riporta uno schema sintetico dei parametri principali dell'oggetto preso in esame, implementato mediante il software REVIT di Autodesk.

Parametro	Valore	Formula	Blocca
Costruzione			
Chiusura muro	Per host	=	
Tipo di costruzione		=	
Materiali e finiture			
Montante	Alluminio 7075	=	
Vetro	Vetro, Vetratura trasparente	=	
Dimensioni			
Altezza	2000.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
L'	680.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza	2000.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza approssimativa		=	<input checked="" type="checkbox"/>
Altezza approssimativa		=	<input checked="" type="checkbox"/>
h'	680.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
Parametri IFC			
Operazione		=	
Proprietà analitiche			
Costruzione analitica	Doppi vetri - Domestici - SC=0.2	=	
Trasmissione luminosa	0.180000	=	
Indice di riscaldamento alla radiazione solare	0.210000	=	
Resistenza termica (R)	0.3196 (m ² ·K)/W	=	
Coefficiente di scambio termico (U)	3.1292	=	
Altro			
Altezza di default del davanzale	600.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
Dati identità			
Nota chiave		=	
Modello		=	
Produttore		=	
Commenti sul tipo		=	
Immagine tipo		=	
URL		=	
Descrizione		=	
Codice assieme		=	
Costo		=	

Figura 2.4 Parametri oggetto “finestra” BIM

Un'altra esperienza in tale ambito è stata condotta per la modellazione di una pavimentazione, dove sono stati caratterizzati, in termini di parametri prestazionali, tutti i singoli strati che costituiscono il pacchetto della pavimentazione stessa. Anche in questo caso si è seguito l'iter descritto in precedenza per l'inserimento delle informazioni prestazionali dell'oggetto; in questo caso, però, si è cercato di cogliere ed evidenziare la grande differenza che c'è tra la modellazione bidimensionale, CAD-based, e la modellazione parametrica BIM-based.

A scopo dimostrativo, in Figura 2.5, è riportato il confronto tra la rappresentazione CAD di un particolare costruttivo del pacchetto della pavimentazione in esame e l'oggetto parametrico BIM.

Nella fattispecie, sono evidenti le seguenti osservazioni.

1. Nella rappresentazione CAD, le caratteristiche della stratigrafia della pavimentazione sono riconoscibili mediante opportuna legenda puramente grafica (Figura 2.5 (a)).
2. Nella rappresentazione BIM, l'oggetto è caratterizzato da una modellazione dove ogni strato è rappresentato dalle proprie caratteristiche meccaniche, termiche e funzionali (Figura 2.5 (b)).

3. Nel “dettaglio informazioni per oggetti BIM”, sono riportate tutte le informazioni attribuibili all’oggetto di tipologia generica (i.e. produttore, costo, descrizione) ed alcune proprietà analitiche che sintetizzano il comportamento dello stesso (Figura 2.5 (c)).

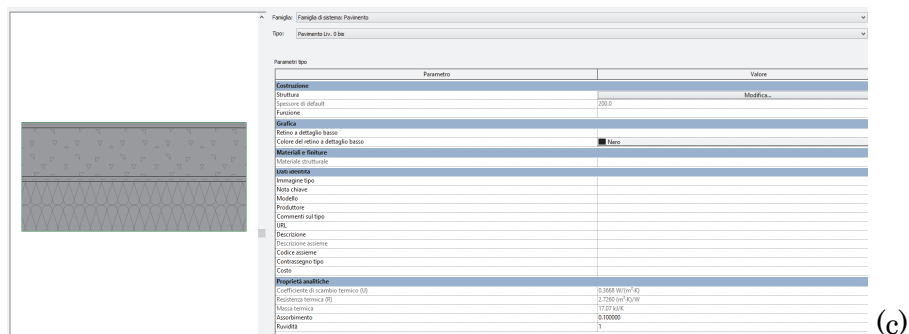
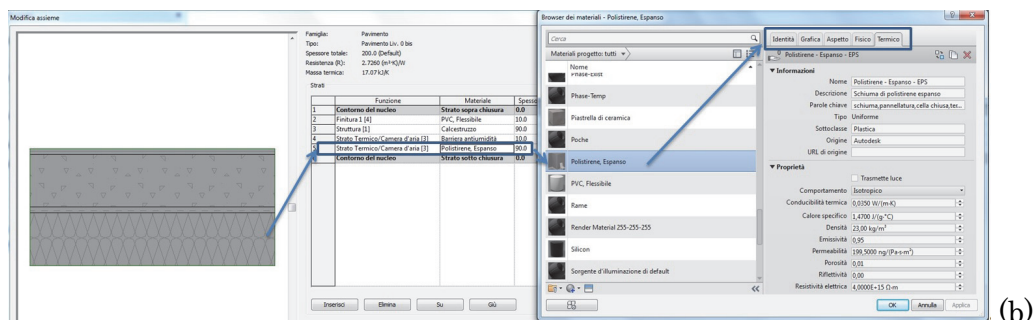
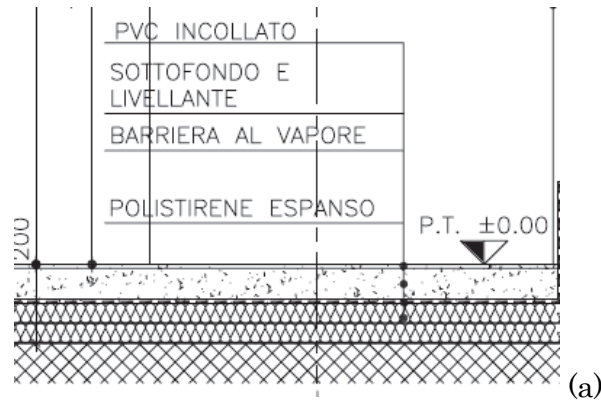


Figura 2.5 Confronto tra particolare costruttivo CAD e Oggetto BIM: (a) Particolare costruttivo pavimentazione in progetto definitivo CAD; (b) Oggetto pavimentazione BIM; (c) Dettaglio informazioni per oggetti BIM

2.2 IMPLEMENTAZIONE DI OGGETTI STRUTTURALI

E' evidente che anche nel caso di progettazione strutturale è necessario implementare le prestazioni degli oggetti al fine di garantire l'interoperabilità con gli ambienti software di calcolo al fine di effettuare analisi e verifiche della struttura portante di una qualsiasi opera civile.

Nel caso in esame si fa riferimento alla modellazione di un pilastro strutturale nel quale si definiscono sia parametri geometrici sia prestazionali quali le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati.

E' necessario fornire all'oggetto BIM, sia per elementi in cemento armato gettati in opera sia per elementi prefabbricati, i parametri utili per effettuare il dimensionamento e le verifiche di sicurezza. L'interoperabilità degli oggetti BIM è stata verificata mediante l'utilizzo di alcuni software di calcolo strutturale quali *MidasGen* e *SAP2000*.

Si analizza nel dettaglio la modellazione di un pilastro in c.a., come già descritto al § 2.1, la forma geometrica può essere determinata creando un solido spaziale oppure partendo da un elemento esistente.

Una volta inseriti i parametri geometrici, è possibile visualizzare la forma 3D dell'oggetto BIM come riportato Figura 2.6.

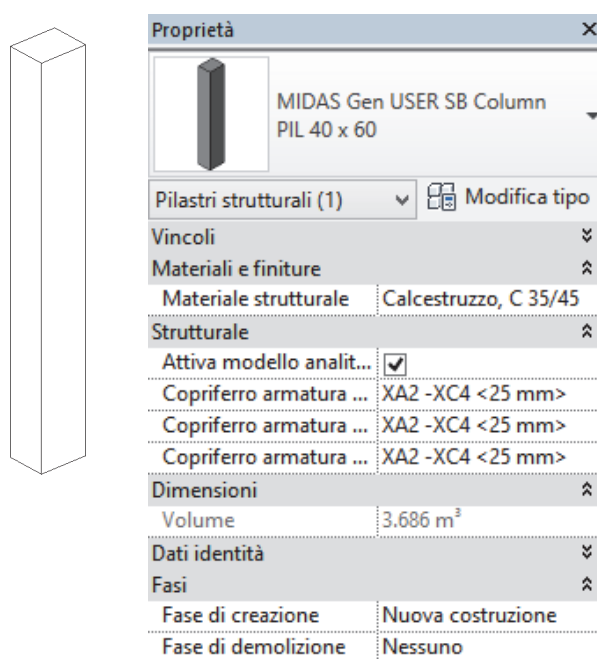


Figura 2.6 Modellazione geometrica di un elemento strutturale

Anche in questo caso, prima di poter assegnare i parametri prestazionali dell'oggetto, è necessario scegliere la disciplina di appartenenza dell'oggetto che nel caso in esame è strutturale. Tale aspetto permette di caratterizzare l'elemento in funzione delle prestazioni strutturali e di renderlo compatibile e riconoscibile per i software di calcolo strutturale.

E' possibile definire l'elemento strutturale sotto diversi aspetti quali grafica e aspetto, ma risulta necessario inserire anche le caratteristiche fisiche del materiale di composizione dell'oggetto. Le caratteristiche da definire si suddividono in una prima parte composta da informazioni generiche sul materiale, come il nome, una breve descrizione e la tipologia di materiale (calcestruzzo nel caso in esame); successivamente si passa all'inserimento delle caratteristiche riguardanti le proprietà meccaniche del materiale, quali il legame costitutivo, il modulo di Young, il coefficiente di Poisson, il modulo a taglio e la densità. Oltre a questi parametri è necessario inserirne anche altri più specifici riguardanti il materiale, come la resistenza a compressione, la tensione di snervamento e la resistenza a trazione. Nella Figura 2.7, si riportano sinteticamente i parametri principali per caratterizzare un oggetto strutturale in BIM.

Proprietà	Valore
Nome	C35/45
Descrizione	EC2 Calcestruzzo C35/45
Parole chiave	Eurocode, strutturale, calcest...
Tipo	Calcestruzzo
Sottoclasse	Standard
Origine	Autodesk
URL di origine	
Proprietà termiche di base	
Proprietà meccaniche	
Comportamento	Isotropico
Modulo di Young	34.000,0 MPa
Coefficiente di Poisson	0,20
Modulo a taglio	20.400,0 MPa
Densità	2.407,31 kg/m ³
Calcestruzzo	
Compressione calcestruzzo	35,0 MPa
Modifica resistenza a taglio	1,00
<input type="checkbox"/> Leggero	
Sollecitazione di snervamento	3,5 MPa
Resistenza alla trazione	3,5 MPa

Figura 2.7 Proprietà meccaniche dell'elemento pilastro

Nel caso di elemento strutturale prefabbricato è possibile inserire tutte le informazioni necessarie per caratterizzare l'oggetto, quali costo, produttore, date di produzione, stabilimento di produzione nonché allegare certificati e schede tecniche.

2.3 CONCLUSIONI

L'implementazione di oggetti BIM, completi di tutti i parametri prestazionali, funzionali e di costo permette alle aziende produttrici di prodotti e componenti per l'edilizia di trarre degli enormi vantaggi dalla metodologia BIM.

Vantaggi che scaturiscono dalla condivisione diretta tra i produttori ed i progettisti, i quali, possono inserire direttamente, nei propri progetti, gli oggetti BIM dei singoli produttori, in modo tale da poter effettuare analisi prestazionali, bilanci energetici, calcoli strutturali e stime economiche dell'opera da realizzare. Tale approccio permette di ampliare notevolmente gli scenari progettuali e tra questi scegliere la soluzione migliore.

Capitolo 3.

CASO STUDIO: LA CASSA EDILE DI NAPOLI

3.1 INTRODUZIONE AL CASO STUDIO

Uno degli obiettivi principali del dottorato in azienda è stato avviare un progetto di ricerca che riuscisse ad aggregare l'elevata complessità e lungimiranza della ricerca con gli obiettivi strategici delle aziende operanti nel settore delle costruzioni.

La sostenibilità nel costruire e l'innovazione nel campo della progettazione e gestione delle opere sono stati i principi che hanno ispirato ad incentrare gli studi sul Building Information Modeling e sul Life Cycle Assessment (LCA) con l'obiettivo di fornire alle aziende del settore delle costruzioni un potente strumento di gestione delle costruzioni basato sulla mitigazione degli impatti sull'ambiente.

In questo capitolo viene presentata un'esperienza che nasce dalla collaborazione tra l'ACEN, il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura della Federico II di Napoli, il Centro formazione maestranze edili di Napoli e Provincia e la STRESS S.c.ar.l.. Tale attività ha previsto la cooperazione di un team formato da strutturisti, architetti ed impiantisti per l'implementazione in un modello BIM di una parte del progetto di trasformazione della Cittadella dei Servizi e degli Enti Paritetici di Napoli, curato da ACEN. Tale intervento prende vigore dalle intuizioni di Luigi Cosenza che progettò la Cittadella circa cinquant'anni fa, ma che solo in parte fu realizzata.

Il progetto definitivo è stato implementato su piattaforma *Autodesk Revit* integrando quindi in un unico tool gli aspetti architettonici, strutturali, impiantistici ed estimativi. La capacità di interoperabilità, sia tra gli esperti BIM che tra i colleghi che utilizzano strumentazioni tradizionali, si è resa evidente grazie alla compatibilità con il formato IFC e IFC4. I componenti parametrici sono stati in alcuni casi modellati *ad hoc*, secondo capitolato; in altri gestiti mediante 2 portali di riferimento, *Autodesk Seek* e *BIMobject*.

I benefici sono stati subito evidenti sia in termini di ottimizzazione dei tempi e delle risorse in fase di virtualizzazione del modello architettonico e strutturale, sia in termini di garanzia sulla validità dei dati inseriti per la gestione del ciclo di vita.

Principale obiettivo dell'esperienza è stato quello di diffondere sul territorio campano la metodologia BIM, avviando un processo di trasferimento tecnologico presso i professionisti e le imprese di costruzioni. A tale scopo, il progetto importato sulla piattaforma BIM sarà da parte di ACEN messo a disposizione di progettisti ed operatori che vogliano avvicinarsi alle potenzialità dell'approccio BIM. Il progetto inoltre è stato premiato anche alla fiera dell'edilizia di Bologna SAIE 2014 nel concorso BIM Contest [19].

3.1.1 Finalità dell'applicazione al caso studio

Come già detto, il presente caso di studio è stato caratterizzato dalla collaborazione di diverse figure professionali quali strutturisti, architetti ed impiantisti con lo scopo di trasferire in BIM un progetto già sviluppato con metodi tradizionali CAD-oriented.

Diversi sono stati gli obiettivi perseguiti, come:

- valutare i **vantaggi del BIM** in fase di progettazione;
- realizzare un **modello parametrico** a supporto della fase di realizzazione dell'opera;
- valutare la risposta del modello BIM in **cantiere** ed in caso di **varianti** in corso d'opera;
- garantire la validità e la disponibilità delle **informazioni di progetto**, per la gestione ed il **Facilty Management** durante tutto il **ciclo di vita** dell'opera;
- iniziare un percorso di **trasferimento tecnologico**.

La scelta di utilizzare un progetto esistente, già ad un livello definitivo avanzato, è stata motivata da diverse esigenze strettamente legate agli obiettivi prefissati. Per valutare i reali vantaggi del BIM in fase di progettazione, i professionisti, autori del progetto originale, in accordo con il team di progettazione BIM, hanno ritenuto opportuno verificare tali potenzialità su un progetto nel quale tutte le scelte progettuali erano già state ampiamente discusse ed approfondite. Tale scelta ha determinato un'attenzione maggiore, da parte di tutti gli attori coinvolti, all'effettiva

integrazione di tutti i livelli progettuali e all'elevata interoperabilità tra il modello BIM ed i software di calcolo ingegneristico da loro stessi utilizzati.

Un altro criterio che ha determinato la scelta di tale progetto è stata la previsione dell'inizio dei lavori che risulta precedente rispetto agli altri lotti della Cittadella.

Da tale aspetto è nata l'esigenza di disporre di un modello parametrico BIM a supporto della realizzazione dell'opera e, quindi, di valutare preventivamente le interferenze tra i diversi livelli progettuali, eventuali varianti in corso d'opera e di monitorare i costi durante la sua esecuzione. Il modello BIM implementato è stato portato ad un LOD 300 che permette in fase di cantiere di ottenere un modello "*as built*", rendendolo fruibile per le attività di Facility Management durante tutta la fase di esercizio dell'opera. Questo aspetto farà parte di attività future del progetto di ricerca avviato durante la fase degli studi.

Ultimo aspetto, ma non per importanza, è stato l'avvio di un processo di trasferimento tecnologico della metodologia BIM verso i progettisti che hanno condotto il progetto in questione con strumenti tradizionali CAD-based. Tali professionisti sono riusciti a percepire l'evidente vantaggio determinato dall'interoperabilità e dall'automatismo che il BIM ha fornito in fase di progettazione, dove, ogni modifica, a qualsiasi livello di progettazione, è letta dal modello centrale aggiornando contestualmente tutte le analisi, gli elaborati, le quantità e quindi anche i computi metrici estimativi.

E' stato così possibile confrontare il progetto originale con il nuovo progetto BIM-based in termini di livello di dettaglio, livello di fruibilità degli elaborati di progetto ed anche in termini di numero di file da gestire.

Si è così evidenziata la forza del BIM nel gestire l'enorme mole di dati (es. elaborati grafici e non, schede tecniche, ecc.) di una progettazione CAD oriented attraverso un numero ridotto di file collegati tra di loro basati su un Workflow BIM oriented.

3.1.2 Metodologia di implementazione BIM

L'iter utilizzato per l'implementazione del modello segue il protocollo della metodologia BIM sia da punto di vista del processo del flusso di lavoro sia dal punto di vista dell'utilizzo degli strumenti software a supporto della progettazione BIM-oriented. La gestione dei flussi di lavoro secondo un approccio BIM-oriented cambia radicalmente rispetto ad un approccio CAD-

oriented, dove ogni livello progettuale è condotto in maniera indipendente, a meno di interazioni tra i progettisti svolte il più delle volte in maniera discontinua. Il workflow tradizionale CAD-based, è caratterizzato da una produzione indipendente di tutti gli elaborati (disegni, relazioni, computi metrici, schede tecniche); inoltre ogni modifica o integrazione al progetto viene effettuata manualmente.

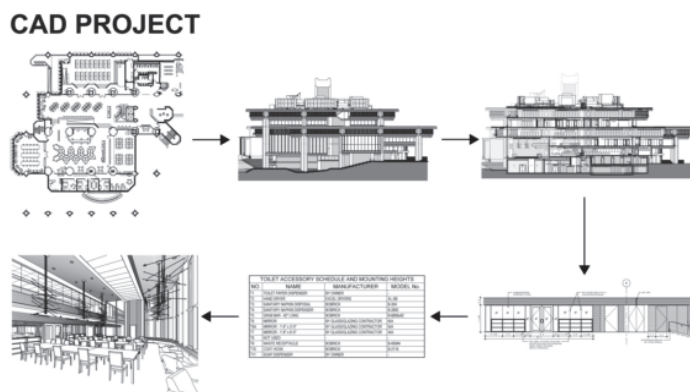


Figura 3.1 Progettazione CAD-oriented [20]

L'approccio BIM, utilizzato nel caso studio, è caratterizzato dalla centralità del modello BIM da cui è possibile reperire qualsiasi tipo di informazione di progetto.

Come precedentemente detto, è stato utilizzato l'iter della metodologia BIM sia a livello di processo di lavoro, tra le diverse figure professionali coinvolte, sia a livello di organizzazione software e layout di allocazione file.

Dal punto di vista del processo di lavoro si è costituito il team di progettazione formato in maniera adeguata rispetto alla metodologia di progettazione BIM (Tabella 3.1)

N° componenti	Figura professionale	Disciplina	Maturity Level (livello di conoscenza BIM)
1	BIM Manager	Coordinamento e accettazione Modifiche	Livello 2
1	Ingegnere Strutturista	Progetto Strutturale	Livello 1/2
1	Architetto	Progetto Architettonico	Livello 1/2
1	Ingegnere	Progetto Impiantistico	Livello 1/2
2	Ingegnere e/o Architetto	Implementazione oggetti BIM	Livello 1

Tabella 3.1 Team di progettazione per il Caso della Cassa Edile di Napoli

Il BIM Manager, che spesso può coincidere con un professionista già coinvolto a livello progettuale, ha il compito di gestire tutto il complesso delle iterazioni tra i diversi livelli progettuali, di coordinare e controllare la congruenza della progettazione globale dell'opera e del corretto aggiornamento del modello BIM

Tale figura tecnica viene coinvolta anche nella gestione dell'intera commessa ed in fase di cantiere a supporto della Direzione Lavori e del Coordinamento della Sicurezza per gestire l'uso del modello BIM e per controllare la qualità dei file e della relativa condivisione.

In fase di cantierizzazione dell'opera, il BIM Manager, è indispensabile al fine di portare il modello BIM ad una condizione "as built" e, dunque, fruibile per la gestione del Facility Management dell'opera.

Le altre figure professionali coinvolte quali l'Ingegnere Strutturista, l'Architetto e l'Ingegnere Impiantista si sono dedicati al proprio progetto in funzione della propria disciplina di competenza. Le altre due figure professionali coinvolte si sono dedicate all'implementazione degli oggetti BIM a supporto della progettazione dell'intero modello BIM dell'opera. La progettazione BIM, come esposto nel primo capitolo, è caratterizzata dall'insieme di oggetti parametrici BIM, nei quali sono presenti tutti i parametri meccanici, termici, funzionali e di gestione dell'opera. Il modello finale dell'opera è costituito dall'insieme degli oggetti BIM, per cui, la fase di implementazione degli oggetti BIM è la fase iniziale di un progetto BIM ed è anche una delle fasi più delicate, in quanto, determina la corretta riuscita del progetto finale. Tale fase, infatti, ha visto due risorse dedicate alla trasformazione di tutti i componenti del Capitolato dell'opera in oggetti BIM, per cui, ogni singolo serramento, partizione o componente del progetto è stato riprodotto in maniera fedele sia dal punto di vista stratigrafico che prestazionale.

La fase di implementazione degli oggetti e di impostazione del lavoro comporta un onere maggiore in termini di tempi, rispetto alla progettazione CAD-oriented, ma permette un notevole risparmio di tempo nelle fasi successive della progettazione, come si vedrà di seguito.

Una volta definito il team di progettazione, si passa alla definizione del workflow di lavoro basato sulla centralità del modello BIM rispetto ai vari file delle diverse discipline. Nel caso specifico, è stata utilizzata una piattaforma di archiviazione dati, fruibile mediante web, nella quale è stato allocato un file Master collegato ai file singoli delle diverse discipline quali progetto strutturale, architettonico ed impiantistico. Tale layout dei file di

progetto, ha permesso ai singoli professionisti di poter lavorare al proprio progetto in maniera coordinata con gli altri professionisti coinvolti. La peculiarità di tale metodologia nella fase di progettazione è la possibilità di monitorare lo stato di avanzamento di tutti i livelli di progettazione in maniera costante ed istantanea. A titolo esemplificativo lo strutturista può vedere, in tempo reale, sul proprio progetto l'avanzamento degli altri livelli progettuali, quali architettonico ed impiantistico, e viceversa. Tale impostazione di progetto permette di poter effettuare scelte progettuali in maniera immediata e quindi aumentare il grado di coerenza e di integrazione dei progetti.

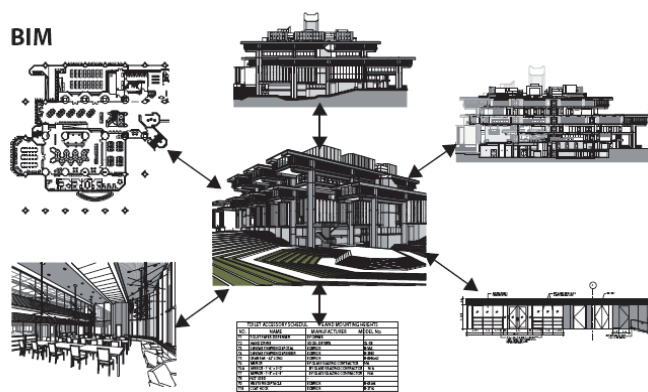


Figura 3.2 Progettazione BIM-oriented [20]

Il prodotto finale di tale metodologia di progettazione è un modello unico che vede l'integrazione di tutti i livelli progettuali (architettonico, strutturale ed impiantistico) dal quale è possibile reperire qualsiasi tipo di informazione progettuale partendo dalle caratteristiche dei singoli oggetti, per passare a tutti gli elaborati progettuali fino ad arrivare ad informazioni di costo dei singoli oggetti o di tutto il complesso dell'opera e di informazioni per il FM.

Nel presente caso di studio è stato riproposto un progetto, sviluppato secondo una metodologia CAD-based, nella metodologia BIM-based per valutare i diversi vantaggi e la diversa tipologia di lavoro.

3.2 DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Il progetto riguarda l'edificio della Cassa Edile di Napoli, che è una parte della Cittadella dei Servizi destinata alle imprese edili napoletane.

L'edificio è caratterizzato da un edificio isolato composto da due piani interrati e da tre piani fuori terra. Il progetto di partenza, CAD-oriented, si presenta ad un buon livello definitivo, quasi da considerarlo esecutivo. E' presente, di fatto, sia il progetto strutturale, architettonico ed impiantisco come è possibile notare dagli elaborati rappresentati in Tabella 3.2.

Livello di Progetto	Elaborati di progetto	N° Totale elaborati
Progetto Architettonico	Disciplinare Tecnico Prestazionale	8
	TAV: Pianta Piano - 2	
	TAV: Pianta Piano - 1	
	TAV: Pianta Piano Terra	
	TAV: Pianta Piano Primo	
	TAV: Pianta piano Copertura	
	TAV: Prospetti e sezioni	
	TAV: Elaborati render	
Progetto Strutturale	Relazione di Calcolo	16
	Fascicolo Tabulati di Calcolo	
	Disciplinare Tecnico	
	Computo Metrico Estimativo	
	Elenco Prezzi Unitari	
	Analisi Nuovi Prezzi	
	TAV: Pianta Fondazioni	
	TAV: Fondazione e Paratia - Armatura	
	TAV: Carpenteria a q. -3,00	
	TAV: Carpenteria e Pianta Fondazione Locali Tecnici a q. -0,20	
	TAV: Carpenteria a q.+2,55 e a q. +3,30	
	TAV: Carpenteria di Copertura	
	TAV: Sezione A-A	
	TAV: Armatura Travi Tipo	
TAV: Armatura Pilastrini Tipo		
TAV: Scala Esterna in Acciaio Piante e Sezioni		
Progetto degli impianti	Impianti elettrici e speciali - Relazione tecnica e di calcolo	22
	Impianti elettrici e speciali - Disciplinare tecnico	
	Impianti elettrici e speciali - Computo metrico estimativo	
	Impianti elettrici - Illuminazione, FM e canalizzazioni: Pianta piani primo e secondo	
	Impianti elettrici - Illuminazione: Pianta piano terra	
	Impianti elettrici - FM, telefonia e canalizzazioni: Pianta piano terra	
	Impianti elettrici - Illuminazione, FM e canalizzazioni: Pianta piano primo	
	Impianti elettrici - Illuminazione, FM e canalizzazioni: Legenda simboli	
	Impianti elettrici - Illuminazione, FM e canalizzazioni: Tipici di installazione apparecchiature	
	Impianti elettrici - Schemi unifilari: Quadro elettrico piano primo interrato Q1PI	
	Impianti elettrici - Schemi unifilari: Quadro elettrico piano secondo interrato Q2PI	
	Impianti elettrici - Schemi unifilari: Quadro elettrico piano terra generale di edificio QG-PT	
	Impianti elettrici - Schemi unifilari: Quadro elettrico piano primo QP1	
	Impianti elettrici - Schemi unifilari: Quadro elettrico impianto di condizionamento QCDZ	
	Impianti speciali - Riv. Incendi, Tvcc, Antintrusione, Evac.: Pianta primo e secondo interrato	
	Impianti speciali - Riv. Incendi, Tvcc, Antintrusione, Evac.: Pianta piano terra	
	Impianti speciali - Riv. Incendi, Tvcc, Antintrusione, Evac.: Pianta piano primo	
	Impianti speciali - Riv. Incendi, Tvcc, Antintrusione, Evac.: Legenda simboli	
	Impianti speciali - Rivelazione Incendi: Schema a blocchi	
	Impianti speciali - Evacuazione Audio: Schema a blocchi	
	Impianti speciali - Antintrusione: Schema a blocchi	
	Impianti speciali - Tvcc: Schema a blocchi	

Tabella 3.2 Elaborati progetto Cassa Edile

La struttura si presenta, regolare in pianta e in altezza ed è formata da telai spaziali in cemento armato. I solai sono del tipo RDB Celersap Fantini monotrave con travetti precompressi. Per l'analisi dei carichi utilizzata per il calcolo delle strutture è stata utilizzata la stessa riportata nelle relazioni di calcolo.

Il progetto BIM è stato condotto con l'utilizzo del software REVIT di casa Autodesk compatibile con la metodologia BIM; mentre, l'analisi strutturale è stata condotta con il software ROBOT della medesima casa produttrice.

Come previsto dalla metodologia BIM, la fase iniziale è stata caratterizzata da uno studio approfondito degli elaborati progettuali e, nello specifico, del capitolato d'appalto, dove sono presenti le caratteristiche dei materiali e delle componenti utilizzate nel progetto.

Una volta ricavati tutti i materiali e le componenti del progetto si è passati alla creazione delle famiglie di oggetti BIM.

Per famiglia si intende l'insieme di oggetti che fanno parte della stessa categoria di elementi (es. pilastri strutturali, porte, finestre, elementi di arredo). All'interno delle singole famiglie si individuano i singoli elementi, ognuno caratterizzato in funzione delle proprie caratteristiche geometriche, fisiche, termiche, meccaniche e funzionali.

A scopo esemplificativo nella Figura 3.3 viene riportata una schematizzazione del concetto di famiglia di oggetti BIM, nel caso della famiglia "Pilastri".

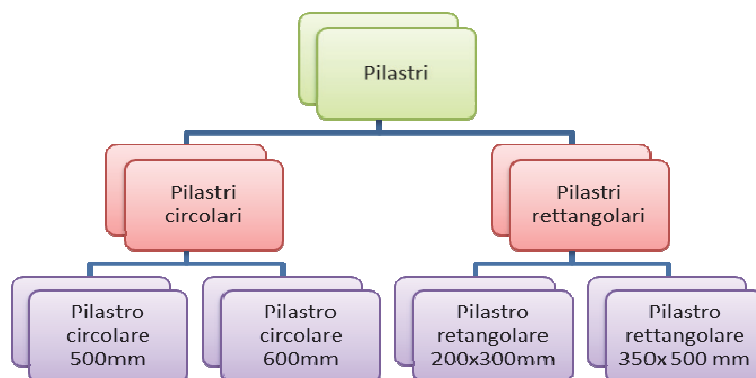


Figura 3.3 Rappresentazione gerarchica del concetto di famiglia di oggetti BIM

Molti oggetti e materiali sono già presenti nelle librerie di REVIT mentre altri sono presenti su piattaforme web e sono scaricabili in maniera istantanea, in quanto, molti produttori di componenti per l'edilizia, nella

fattispecie i leader di ogni settore, hanno già trasferito i loro cataloghi in oggetti compatibili per software BIM.

Nel caso specifico del presente caso di studio, circa il 40% dei materiali e degli oggetti richiesti erano già presenti nelle librerie di REVIT, circa il 30% presentava delle caratteristiche simili a quelle previste dal capitolato e quindi sono stati adattati; infine, il 30% sono stati creati ex novo.

Le principali caratteristiche per la creazione degli oggetti BIM sono state reperite dal Capitolato d'appalto e sono:

- dimensioni geometriche;
- densità;
- costo;
- conducibilità Termica;
- calore Specifico;
- colori (per visualizzazioni in render);
- aspetto (per visualizzazioni su tavole);
- resistenze;
- moduli elastici (dei materiali che compongono gli oggetti).

Ricavati tali dati dal capitolato è stato possibile creare le famiglie di porte, finestre, muri, pavimenti, solai, travi e pilatri come riportato, a scopo dimostrativo, in Figura 3.4.

<p>TIPO PC-01: PARETE IN CARTONGESSO CON DOPPIA LASTRA PER LATO (CEMENTO FIBRORINFORZATO + GESSO RIVESTITO SU OGNI LATO)</p> <p>Tramezzo divisorio dello spessore totale di 150 mm costituito dagli elementi sottoelencati:</p> <ol style="list-style-type: none">1) Lastra di cemento fibrorinforzato da 12.5 mm di spessore;2) Lastra di gesso rivestito tipo A da 12.5 mm di spessore;3) Profili guida orizzontali ad U solidarizzati meccanicamente a pavimento e a soffitto mediante accessori di fissaggio idonei;4) Profili montante verticali a C da 100 mm di larghezza posti ad interasse di 600 mm max e dotati di fori asolati per consentire il passaggio delle parti impiantistiche;5) Pannello isolante in materiale fibroso (specifica TA isolanti termici e acustici) dello spessore di almeno 40 mm da inserire nell'intercapedine tecnica tra i montanti della/e struttura/e metallica/e;6) Lastra di gesso rivestito tipo A da 12.5 mm di spessore;7) Lastra di cemento fibrorinforzato da 12.5 mm di spessore. <p>La parete PC-01 deve essere relizzata conformemente ai criteri di esecuzione delle opere descritti precedentemente.</p>

Figura 3.4 Stralcio di Capitolato d'appalto

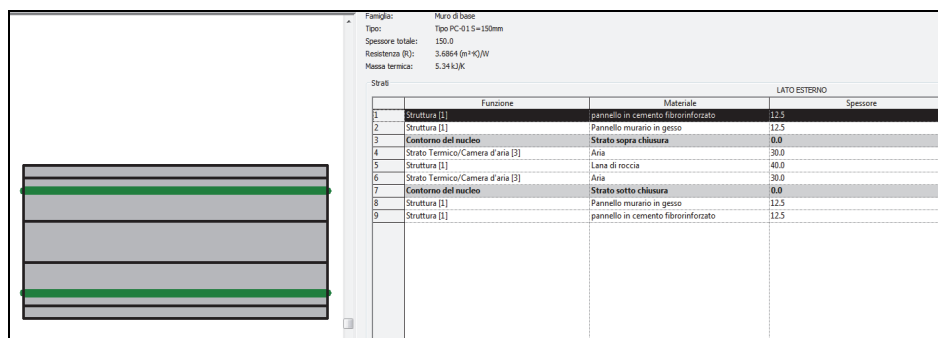


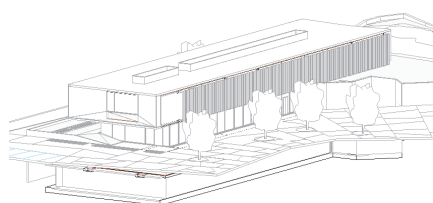
Figura 3.5 Oggetto BIM Parete in cartongesso Tipo PC-01

Tale fase è la più onerosa in termini di tempo ma è anche la più delicata in quanto influenza tutta la progettazione e le analisi che si effettuano a valle della modellazione globale dell'opera.

Terminata la fase di implementazione degli oggetti BIM, si è passati alla modellazione dell'opera dove ogni singolo professionista ha lavorato sul proprio file di progetto.

Il **progetto strutturale** è stato implementato completamente nella piattaforma BIM dell'Autodesk REVIT, inserendo tutte le caratteristiche geometriche e meccaniche della struttura portante prevista. Già durante la fase di implementazione del modello strutturale è stato possibile verificare eventuali incongruenze con il progetto architettonico. Il controllo eseguito tra l'integrazione del modello strutturale e architettonico è stato condotto ad un livello di dettaglio al millimetro per quanto riguarda le intersezioni degli elementi strutturali con quelli architettonici.

Modello Architettonico



Modello strutturale

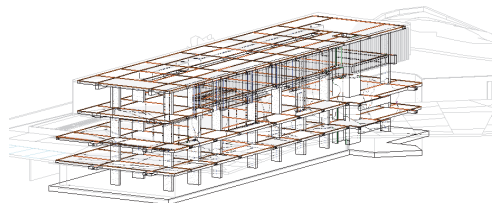


Figura 3.6 Integrazione tra livello di progettazione strutturale ed architettonico

L'integrazione in un modello unico (Figura 3.6), tra il progetto architettonico e quello strutturale ha permesso di riconoscere ed eliminare alcune incoerenze del progetto impercettibili con gli strumenti tradizionali.

La modellazione BIM ha permesso di gestire, a livello strutturale, il modello agli elementi finiti (FEM), la situazione vincolare della struttura ed i carichi di progetto agenti sulla struttura in modo tale da poter inviare direttamente al software di calcolo strutturale tutti gli elementi per condurre le analisi strutturali (Figura 3.7).

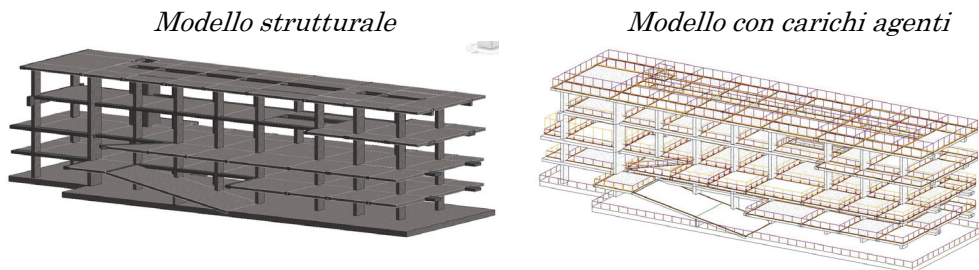


Figura 3.7 Modelli per l'analisi strutturale

Una volta implementato il modello FEM della struttura si è passati all'analisi strutturale, inviando il modello dalla piattaforma BIM REVIT al software di calcolo sempre di casa Autodesk ROBOT Structural Analysis [21] [22].

Modello FEM di calcolo strutturale

Riconoscimento elementi strutturali

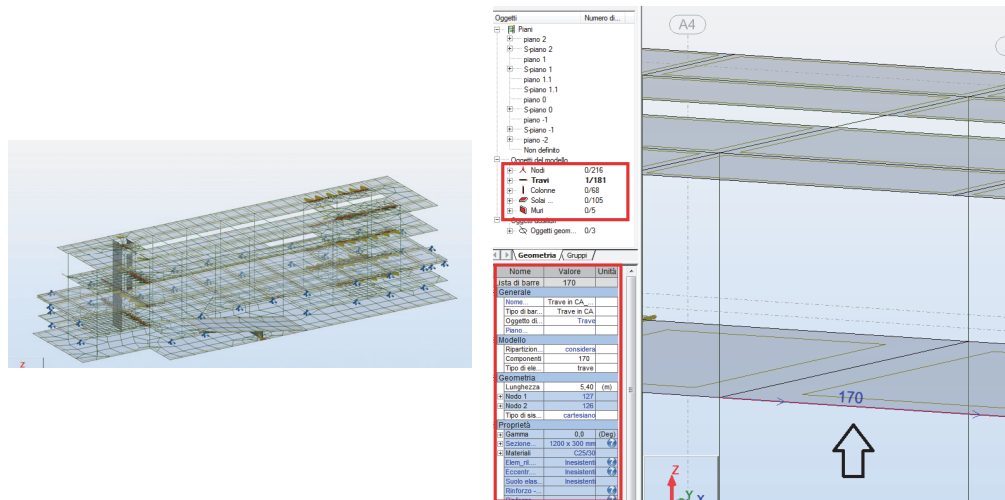


Figura 3.8 Modello FEM per il calcolo strutturale e riconoscimento caratteristiche elementi

Come è possibile notare dalla Figura 3.8, il modello importato nel software di calcolo strutturale è completo di tutte le caratteristiche, inserite in fase di modellazione BIM, quali geometriche, meccaniche e di modellazione (mesh per gli elementi piastra come solai, piastra di fondazioni e pareti), nonché di tutti i carichi di progetto. Il modello, in definitiva, è risultato pronto al fine di effettuare la verifica degli elementi strutturali.

Un altro dato rilevante è stato determinato dall'aggiornamento del modello centrale BIM in funzione delle modifiche ed integrazioni effettuate in ambiente di calcolo strutturale.

Tale aspetto, in coerenza con i principi della metodologia BIM, comporta un aggiornamento continuo del modello BIM centrale e, quindi, una notevole riduzione sia degli errori di progetto sia delle perdite di informazioni durante la fase di progettazione.

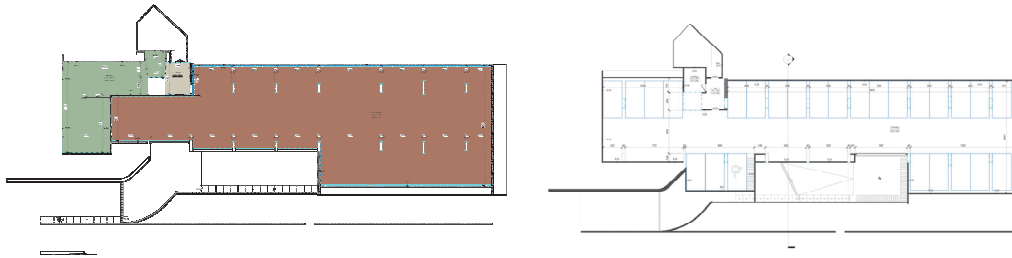
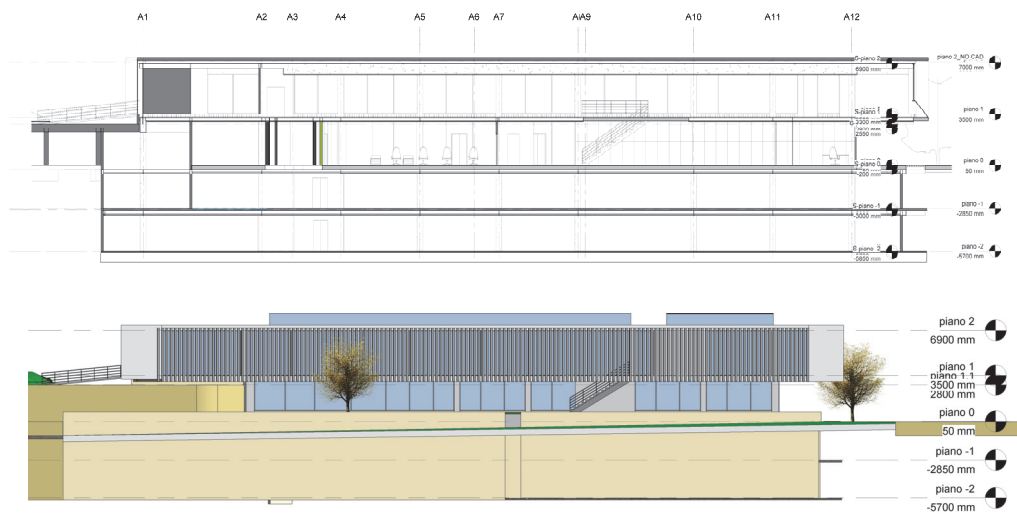
Una volta importato il modello in REVIT è stato possibile implementare tutti gli elaborati grafici di progetto (carpenterie, distinte delle armature dei singoli elementi, ecc.), tutti collegati al modello 3D dell'opera in modo che qualsiasi modifica effettuata al modello, fosse riportata istantaneamente anche sugli elaborati.

Il **progetto architettonico** è stato condotto interamente su piattaforma BIM REVIT e totalmente integrato con il progetto strutturale precedentemente descritto. Tutti gli oggetti inseriti nel progetto architettonico sono stati preventivamente parametrizzati in oggetti BIM, per cui, ogni elemento (es. porta, finestra o tramezzo) incorpora anche le sue caratteristiche tecniche, termiche e funzionali determinando un involucro edilizio con prestazioni equivalenti a quelle reali.

In tale livello di progettazione è stato possibile gestire, direttamente in REVIT, tutta la modellazione architettonica e gli elaborati progettuali.

Tutti gli elaborati mostrati nelle figure di seguito riportate sono derivati direttamente dal modello BIM 3D effettuando delle sezioni o interrogando il modello stesso.

Analogamente a quanto descritto per il progetto strutturale, ogni modifica effettuata a livello architettonico è stata automaticamente riconosciuta anche negli elaborati progettuali (piante, sezioni, render), evitando in questo modo l'integrazione e la modifica dei singoli file come nel caso della progettazione tradizionale.

Piante architettoniche**Figura 3.9** Elaborati progettuali piante parcheggio interrato*Sezioni***Figura 3.10** Elaborati progettuali: sezioni dell'immobile Cassa Edile

La potenza di tale strumento ha favorito la gestione espositiva del progetto in tutta la sua globalità. E' stato possibile realizzare una proposta del progetto più dettagliata rispetto ad una progettazione tradizionale, infatti, lavorando direttamente in 3D sono stati sviluppati render degli esterni, schizzi e proposte sugli interni dell'immobile. Circa tale aspetto è importante evidenziare l'immediatezza e la semplicità nell'implementazione delle singole proposte architettoniche.

Nella Figura 3.11, si riportano alcuni esempi delle proposte architettoniche implementate.

Render di progetto



Proposta interni



Schizzi di progetto

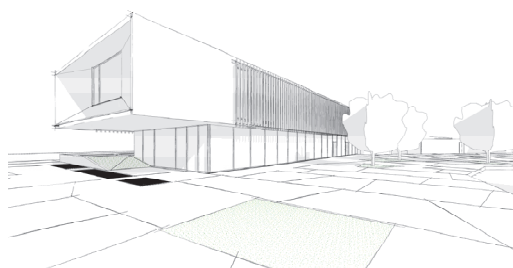


Figura 3.11 Elaborati architettonici di progetto

Non è certamente trascurabile che, inoltre, in maniera integrata ed immediata, è stato possibile gestire il computo metrico di tutti i materiali e le componenti presenti nel progetto.

3.3 RISULTATI DELLO STUDIO

I risultati dello studio hanno evidenziato diverse differenze tra la progettazione CAD-based e quella BIM-based.

La prima differenza sostanziale è sicuramente nella gestione dei file di progetto. Come mostrato in Tabella 3.2, in una progettazione tradizionale, sono presenti 46 file di cui 36 tavole grafiche completamente indipendenti tra di loro. Nella modellazione BIM il file unico riesce ad integrare tutti gli elaborati progettuali di disegno ed essendo direttamente collegati al modello

3D dell'opera, ogni modifica viene contestualmente riportata su tutti gli elaborati progettuali. Tale aspetto migliora notevolmente la gestione dei tempi nella fase di ultimazione dei progetti e minimizza la rielaborazione dei progetti.

Il dato prevedibile registrato in questo caso di studio è la differente "distribuzione del tempo" in tutte le fasi della progettazione. A tal proposito il progetto condotto con la metodologia BIM ha presentato un onere di tempo maggiore nella definizione del progetto preliminare (PP) e del progetto definitivo (PD) rispetto alla progettazione CAD-based.

Ciò è dovuto alla complessità di impostazione del progetto BIM ed alla creazione delle famiglie di oggetti che, anche se definiti ad un LOD 100/200, determina un aumento dei tempi.

Tuttavia, come mostrato in Figura 3.12 e in Figura 3.13, l'onere maggiore di tempo che la progettazione BIM comporta nelle fasi PP e PD, è recuperato totalmente nella redazione del progetto esecutivo (PE). Questo perché, nella metodologia BIM, il passaggio dal LOD 300, corrispondente ad un progetto definitivo, al LOD 400, che corrisponde al progetto esecutivo, è breve, giacché tutti gli oggetti, i modelli per le analisi e gli elaborati grafici sono già definiti.

Tale aspetto è un forte vantaggio della metodologia BIM rispetto alla progettazione tradizionale. Quest'ultima prevede solitamente che la progettazione definitiva e quella esecutiva siano completamente indipendenti tra loro e, non raramente, la fase esecutiva comporta una riprogettazione da zero dell'opera.

La distribuzione dei tempi, nel caso del BIM Project, è risultata migliore nella globalità della gestione della commessa.

La Figura 3.12 e la Figura 3.13 evidenziano tale aspetto: il picco di tempo massimo impiegato coincide nella progettazione BIM con il progetto definitivo (PD), mentre nella progettazione CAD con il progetto esecutivo (PE).

È cosa nota ai professionisti del settore che i tempi di consegna del progetto esecutivo sono solitamente i più rigidi; per cui è evidente che avere maggior tempo a disposizione, precedentemente risparmiato, per la redazione del progetto esecutivo, determina una migliore distribuzione del tempo durante tutta la commessa.

Inoltre, avere a disposizione più tempo in fase di progetto esecutivo permette di aumentare gli standard qualitativi degli elaborati che comporta una riduzione del rischio di errori in cantiere. Tale risultato è stato

evidenziato, durante l'evento BIM Day tenuto a Napoli il 30 Settembre 2014, da Luca Buzzoni di ARUP Italia, azienda leader per i servizi di ingegneria, che attualmente utilizza la metodologia BIM per la maggior parte delle commesse.

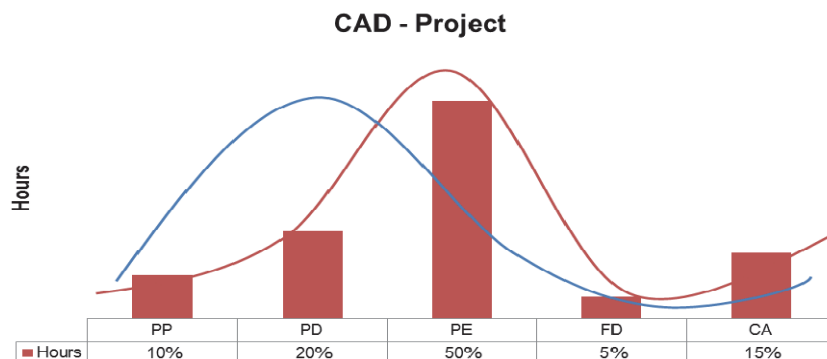


Figura 3.12 Distribuzione del tempo nelle fasi progettuali (CAD Project)

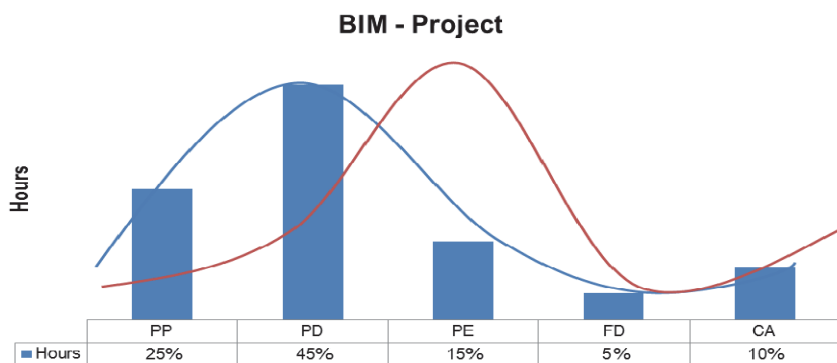


Figura 3.13 Distribuzione del tempo nelle fasi progettuali (BIM Project)

Un altro forte vantaggio riscontrato in questo caso di studio è determinato dal *“Clash Detection”* descritto al § 1.3. Il modello 3D integrato, infatti, ha permesso di riscontrare tutti i vantaggi che il BIM riesce a trasferire al processo edilizio, come:

- riduzione degli errori e di perdita di informazioni;
- maggiore collaborazione sia tra il team di progetto che con i committenti;
- maggiore efficacia espositiva del progetto;
- riduzione di lavoro di rielaborazione degli elaborati;
- maggiore coerenza tra gli elaborati di progetto dei diversi livelli;

- minor tempo per le analisi;
- controllo e monitoraggio dei costi istantaneo.

3.4 CONCLUSIONI

Il presente caso di studio è stato utilizzato per confrontare la metodologia BIM rispetto ai metodi tradizionali di progettazione, tuttavia sarà utilizzato anche per ulteriori sviluppi futuri.

Nella fattispecie, si analizzerà l'efficacia del modello BIM a supporto della fase di realizzazione dell'opera come strumento di monitoraggio del cantiere, di gestione degli spazi e di valutazioni immediate nel caso di varianti in corso d'opera.

Una volta superata la fase di costruzione dell'opera, il modello BIM sarà portato nella condizione "*as built*", per iniziare un'attività di Facility Management della struttura durante tutto il ciclo di vita.

Capitolo 4.

IL BIM A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE MEDIANTE L'INTEGRAZIONE DI ANALISI LCA

4.1 INTRODUZIONE

La sostenibilità è diventato uno dei più importanti principi di ispirazione delle strategie politiche mondiali in tutti i settori. Definire il concetto di sostenibilità è estremamente complesso. Nella sua accezione più vasta, si potrebbe asserire che in esso è intrinseco lo scopo di governare un sistema complesso di soggetti ed entità, rappresentati da un lato dall'uomo e dalla società, dall'altro dall'ambiente e dalle risorse naturali, distinti nello spazio e nel tempo, connessi da relazioni complesse e conflittuali tra loro.

In letteratura esistono diverse interpretazioni del concetto di sviluppo sostenibile principalmente basate sulla definizione presente nel *rapporto Brundtland*, noto anche come *Our Common Future*, rilasciato nel 1987 durante il *World Commission on Environment and Development* (WCED). In tale rapporto si definisce lo sviluppo sostenibile come *“Lo sviluppo che soddisfa i bisogni delle generazioni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze”* [23].

Tale definizione è rappresentativa dell'ampiezza del concetto di sostenibilità, al punto tale che ogni prodotto, processo o azione della nostra epoca può avere ripercussioni in tale ambito. Per definire le strategie di intervento è stato necessario dare un'interpretazione a tale definizione scomponendola, in via preliminare, in due principali obiettivi: (i) il soddisfacimento dei bisogni dell'attuale generazione e (ii) la capacità delle generazioni future a soddisfare i loro bisogni [24]. Per quanto riguarda il secondo obiettivo, è necessario definire un livello di riferimento per la capacità di soddisfacimento dei bisogni delle generazioni future. L'interpretazione di tale livello di riferimento, in accordo con il rapporto di Brundtland, è ispirata dal principio di equità generazionale secondo il quale bisogna garantire alle generazioni future le stesse possibilità della

generazione corrente. Detto ciò un altro nodo da sciogliere è rappresentato dalla definizione delle possibilità da garantire alle generazioni future. La soluzione a tale problematica deriva direttamente dalla teoria economica nella definizione di "capitale".

In accordo con la definizione di Costanza et al. (1997), per capitale si intende tutto quello che genera un flusso di servizi per migliorare il benessere degli esseri umani; per cui bisogna garantire alle generazioni future lo stesso capitale per mantenere lo stesso livello di benessere.

Mantenere lo stesso livello di benessere significa garantire un capitale che risulta suddiviso in quattro categorie dalla World Bank (1997): (i) natural capital, (ii) human capital, (iii) social capital e (iv) produced capital.

Il natural capital è caratterizzato da tutti i servizi di approvvigionamento di provviste alimentari, di materie prime, di depurazione dell'acqua fino ad arrivare alle attività ricreative ed estetiche che la natura può fornire.

Lo human capital, invece, fa riferimento a tutte le attività basate sulla formazione e l'educazione degli esseri umani fino ad arrivare al patrimonio intellettuale dell'avanzamento scientifico dell'uomo.

Il social capital è determinato da tutti i processi relazionali e di scambio di informazioni dell'uomo che fortifica tutti i processi di decision making e di coordinamento delle attività.

Il produced capital, infine, è individuato da tutti i beni prodotti dall'uomo, come strutture, infrastrutture, immobili, computer e tutto quello che è derivato dalla produzione dell'uomo.

Definire, quindi, delle strategie di sviluppo sostenibile comporta un'elevata complessità di analisi che inizia dall'utilizzo delle risorse naturali, passa per lo sviluppo di tecnologie e prodotti, fino ad arrivare allo sviluppo delle città e all'utilizzo del territorio.

A tal proposito, gli obiettivi dello sviluppo sostenibile sono rappresentati dalla teoria del *triple bottom line* che è basata sull'integrazione e sul raggiungimento simultaneo di obiettivi ambientali, economici e sociali (Figura 4.1).

L'ambiente, la società e l'economia sono considerati i tre pilasti della sostenibilità ed è proprio per il raggiungimento di questo triangolo di obiettivi in maniera simultanea che sono nati diversi strumenti e metodi per la valutazione della sostenibilità. Tali strumenti sono basati sul concetto di LCT (*Life Cycle Thinking*).

L'LCT punta a sviluppare valutazioni in termini ambientali, economici e sociali di prodotti o di processi tenendo conto degli interi cicli di vita partendo dall'estrazione dei materiali primari, passando per il processo produttivo, fino ad arrivare alla fase di uso e infine al riciclo o al trasporto in discarica [25].

I metodi basati sul concetto di LCT seguono lo schema del Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA):

$$LCSA = LCA + LCC + SLCA$$

Dove il Life Cycle Assessment (LCA) è la valutazione degli impatti sull'ambiente, il Life Cycle Costing (LCC) è la valutazione degli impatti economici ed il Social o Societal Life Cycle Assessment SLCA è la valutazione degli impatti in termini sociali e socio economici [26].

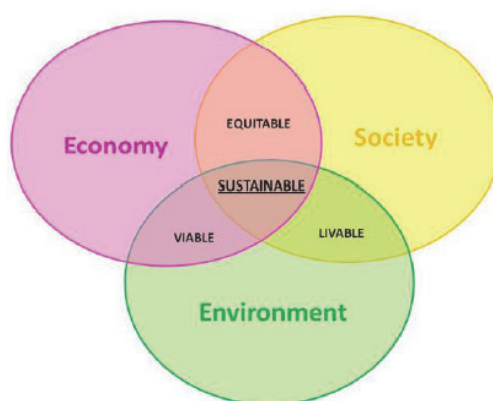


Figura 4.1 Triple Bottom Line Theory

Il Life Cycle Assessment mira a quantificare in maniera analitica e affidabile gli impatti che un materiale, un prodotto o un processo possono avere sull'ambiente durante il loro intero ciclo di vita. Tale approccio, che sarà approfondito nei capitoli seguenti, in letteratura è sintetizzato con l'espressione *"from cradle to grave"*, proprio perché tiene conto di tutte le fasi del processo di trasformazione, dall'estrazione dei materiali primari, alla loro lavorazione, al trasporto e distribuzione, alla messa in opera, alla fase di uso e manutenzione, fino alla dismissione al termine del ciclo di vita.

Il Life Cycle Costing, basato sullo stesso principio dell'LCA, valuta tutti i costi associati ad un materiale, un prodotto o un processo durante il loro intero ciclo di vita, tenendo conto dei costi di fornitura e produzione, dei costi dell'utente finale o del consumatore, fino ai suoi costi di dismissione.

Il Social o Societal Life Cycle Assessment è una disciplina ancora in fase di sviluppo anche se l'idea risale già alla fine degli anni '80. Tale disciplina mira a valutare gli impatti sociali e socio-economici dei prodotti durante il ciclo di vita in termini positivi o negativi (ad esempio la ricaduta che hanno sul capitale umano, sui comportamenti degli esseri umani o delle imprese). L'SLCA non ha come obiettivo quello di fornire gli elementi per decidere se un prodotto deve essere realizzato o meno, bensì, di fornire delle valutazioni in merito all'utilità della produzione di un determinato prodotto o processo [24].

In tale scenario, un ruolo di grande rilievo è rivestito dal settore delle costruzioni sia in termini di impatti sulla sostenibilità sia in termini di sviluppo di nuove tecniche e metodologie a supporto dei processi di decision making.

E' in questo ambito che si trova il filo conduttore della ricerca trattata nel presente elaborato di tesi, cioè, strumenti e metodi innovativi per favorire il processo di progettazione e gestione delle opere basati sulla sostenibilità.

4.2 LCA NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

La sostenibilità nel settore delle costruzioni va perseguita analizzando e gestendo le ricadute degli interventi e delle trasformazioni sui piani economico, sociale ed ambientale, sia al momento della realizzazione degli interventi sia durante l'intera vita utile degli interventi stessi.

Troppo spesso, soprattutto in edilizia, il requisito di sostenibilità viene ridotto e confuso ai soli requisiti energetici. Infatti, anche a causa di un quadro normativo non ancora chiaro e definito e a causa di procedure e metodi di valutazione della sostenibilità non ancora affermati, un intervento edilizio viene spesso definito sostenibile solo se, in qualche modo, determina un risparmio energetico durante la vita utile dell'intervento stesso. La sostenibilità invece deve consistere nel raggiungimento di un equilibrio ottimale tra i soddisfacimenti, in diversi momenti nel tempo, di requisiti economici, ambientali e sociali, spesso in conflitto tra loro.

Il mercato delle costruzioni incide in maniera significativa sull'inquinamento ambientale in termini di sfruttamento di risorse non rinnovabili, di produzione di rifiuti, di consumo di energia e di risorse idriche nonché di emissioni di CO₂ nell'ambiente.

E' stato stimato che oltre il 40% del consumo di materia prima ed il 30-40% della domanda di energia e gas è attribuibile al mercato dell'edilizia inteso come fase di realizzazione ed uso degli immobili [17] [27]. Per tali motivi, la richiesta di edifici e strutture sostenibili, che abbiano un basso impatto sull'ambiente, è sempre crescente al punto tale che le aziende pubbliche e private di costruzioni richiedono ai progettisti dei criteri prestazionali volti al minimo impatto sull'ambiente [28].

Il Life Cycle Assessment è una metodologia, ampiamente utilizzata nell'industria dei prodotti, per valutare l'impatto di quest'ultimi sull'ambiente durante l'intero ciclo di vita. Tale metodologia, negli ultimi 10 anni, si sta diffondendo anche nell'industria dell'edilizia [29] [30].

Il Life Cycle Assessment permette di quantificare gli impatti che un singolo materiale, prodotto o processo può avere sull'ambiente durante il suo intero ciclo di vita, usualmente, tale approccio viene sintetizzato "*from the cradle to grave*". Tale analisi tiene conto della fase di estrazione dei materiali primari, della lavorazione, del trasporto e distribuzione, della fase di uso e manutenzione fino alla dismissione o riciclo al termine del ciclo di vita (Consoli et al.1993).

La metodologia LCA, soprattutto nei processi edilizi, è caratterizzata da un'elevata complessità computazionale e da una vasta mole di dati che rappresentano una barriera per l'utilizzo dell'LCA nel settore delle costruzioni. E' quindi auspicabile che il processo decisionale alla base della progettazione sia quanto più possibile "informato" attraverso dati relativi agli impatti ambientali, economici e sociali determinati dalle scelte che si operano. In altre parole, la progettazione deve essere gestita in maniera consapevole, sfruttando informazioni complesse riferite alla sostenibilità degli interventi progettati. Spesso però tali informazioni sono difficili da gestire in maniera integrata in quanto ampie, variegate e complesse, soprattutto quando riferite agli oggetti della progettazione civile, come edifici ed infrastrutture, di per sé costituiti dalla integrazione di sistemi tecnologici diversi.

Più in generale, nell'industria dell'architettura, dell'ingegneria, delle costruzioni fino ad arrivare alle amministrazioni si stanno introducendo sempre più informazioni, veloci e complete, al fine di potenziare le analisi per prendere decisioni più rapidamente [31].

E' in questa complessità e nell'elevata quantità di dati che si colloca il Building Information Modeling, come supporto per l'archiviazione e la gestione ottimizzata di tutte le informazioni per il mercato dell'edilizia.

Il BIM, può essere anche definito come il processo di *generating, storing, managing, exchanging and sharing building information in an interoperable and reusable way* [32], per cui la potenzialità di tale metodologia può fornire una soluzione alle problematiche precedentemente descritte, offrendo la possibilità di gestire in maniera integrata un sistema di informazioni complesso, riferito ai vari sistemi tecnologici e ai vari componenti che costituiscono l'oggetto edificio o infrastruttura a istanti diversi del ciclo di vita dello stesso.

A questo scopo il presente lavoro illustra una metodologia che integra l'approccio BIM con analisi di LCA mirate alla valutazione dell'impatto ambientale di opere civili, in tutto il loro ciclo di vita, dalla fase di produzione dei materiali, alla installazione e messa in opera, fino alla dismissione.

L'obiettivo è mostrare come la metodologia BIM si presti a gestire una mole di dati complessa e variegata come quella legata alla valutazione di impatto ambientale attraverso analisi LCA, contribuendo così a fornire, in fase di progettazione, informazioni circa la sostenibilità delle scelte operate, rendendo consapevole e orientando il percorso decisionale. Si precisa quindi che in questo caso, l'integrazione di analisi LCA in ambito BIM consentono di analizzare dati legati alla sostenibilità ambientale che rappresenta quindi uno solo degli aspetti della sostenibilità complessiva, insieme ad aspetti economici e sociali.

Le potenzialità della metodologia BIM nella gestione delle informazioni forniscono un valido supporto per implementare LCA direttamente in ambiente BIM con lo scopo di semplificare le procedure di valutazione nonché la comprensione e la fruizione dei risultati. Il BIM, inoltre, rappresenta per molte aziende di costruzioni e società di progettazione un valido strumento di decision making in termini di costi, tempo e soluzioni progettuali ed estendendo questa opportunità anche a valutazioni LCA, può essere utilizzato proficuamente come strumento di valutazione della sostenibilità ambientale delle opere civili.

4.3 LIFE CYCLE ASSESSMENT: METODOLOGIA

Il Life Cycle Assessment (LCA), come già detto precedentemente, è una metodologia che quantifica gli impatti sull'ambiente generati da un

prodotto, servizio o processo tenendo conto dell'intero ciclo di vita con lo scopo di sviluppare strategie di mitigazione del rischio ambientale.

Gli impatti vengono quantificati per mezzo di alcuni indicatori che valutano i consumi di materia prima, energia e le emissioni nell'ambiente durante l'intero ciclo di vita del prodotto, servizio o processo con un approccio *“from cradle to the grave”*.

Si tiene conto di tutte le fasi di vita di un prodotto o processo, dall'estrazione e trattamento delle materie prime, della produzione, del trasporto, della distribuzione, del suo utilizzo, riuso e manutenzione, fino al riciclo o collocazione in discarica.

La metodologia LCA è regolata dalla famiglie di norme ISO 14040, in particolare la ISO 14040:2006 e la 14044:2006. La UNI EN ISO 14040:2006 *“Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida”*, è stata elaborata proprio per la preparazione, gestione e la revisione critica del ciclo di vita. Essa fornisce le linee guida per la fase di valutazione secondo LCA, per la fase di interpretazione dei risultati e per la valutazione relativa alla natura e alla quantità dei dati raccolti.

Lo sviluppo di uno studio di LCA si articola essenziale in quattro fasi.

1. Definizione degli obiettivi (*Goal and Scope Definition*), cioè la definizione del prodotto da analizzare, della sua applicazione e delle ipotesi stabilite per lo studio di LCA.
2. Analisi d'inventario (*Inventory Analysis o Life Cycle Inventory LCI*), nella quale si definisce un diagramma di flusso che descrive l'intero ciclo di vita del prodotto. Tale diagramma è caratterizzato da un inventario di input (i.e. elementi in ingresso come materiali, energia, risorse naturali) e di output (i.e. elementi in uscita come emissione in aria, acqua, suolo) rilevati nel sistema, per effettuare bilanci ambientali in ogni fase del ciclo di vita del prodotto.
3. Valutazione degli impatti ambientali potenziali (*Impact Assessment o Life Cycle Impact Assessment LCIA*), diretti ed indiretti, del prodotto sull'ambiente e delle risorse utilizzate mediante alcuni indicatori in funzione di categorie stabilite.
4. Analisi dei risultati (*Interpretation of the results*) nel quale si identificano le fasi del ciclo di vita del prodotto che determinano un contributo maggiore in termini di impatto sull'ambiente. In questa fase è possibile effettuare la valutazione dei miglioramenti apportabili alle fasi precedenti, ossia definire le possibili linee d'intervento.

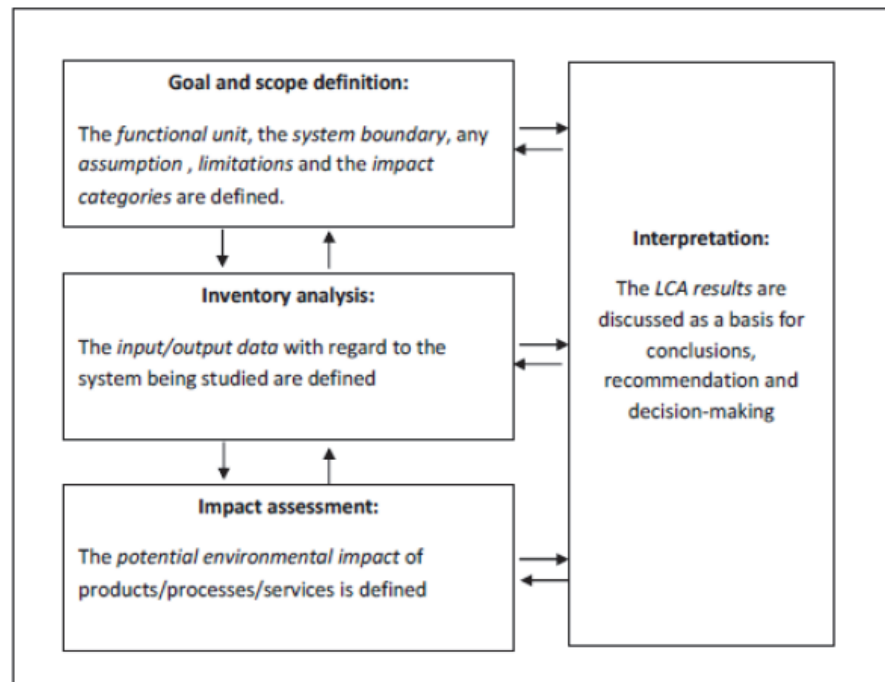


Figura 4.2 Fasi analisi LCA

Sono diversi i motivi per il quale la metodologia LCA sta avendo una diffusione sempre più ampia; infatti, essa è attualmente molto utilizzata nell'industria di prodotto ma si sta diffondendo in maniera molto rapida anche nel settore delle costruzioni.

I principali motivi risiedono in una maggiore consapevolezza dei problemi ambientali che non possono essere affrontati per singoli comparti (aria, acqua e suolo) ma richiedono una valutazione ed un intervento globale, in una crescente attenzione alle politiche ambientali con una domanda ascendente di sostenibilità sia per i prodotti sia per i processi e, infine, nella nascita di nuovi strumenti di valutazione della sostenibilità (LEED, ITACA, etc. etc.) a supporto degli operatori per compiere scelte su criteri di qualità ambientale.

E' in questo ambito che la metodologia LCA permette di:

- valutare, identificare e quantificare gli impatti ambientali di un prodotto, sistema o processo mediante analisi numeriche altamente affidabili;
- effettuare analisi comparative di impatti ambientali sia tra i diversi prodotti sia tra il prodotto e alcuni standard di riferimento;

- conoscere e quantificare la fase del ciclo di vita del prodotto che comporta un maggior impatto sull'ambiente in modo tale da poter effettuare strategie di miglioramento;
- sviluppare strategie di mitigazione degli impatti ambientali dei prodotti, servizi o processi;
- assistere al processo di *decision making* delle industrie, della pubblica amministrazione e dei progettisti;

L'utilizzo dell'LCA, soprattutto nel processo edilizio, comporta un elevato onere computazionale che implica un importante dispendio di risorse umane ed economiche. Al tal proposito, prima di avviare una campagna di analisi LCA su un prodotto o su un sistema edilizio è necessario effettuare un'analisi preliminare della fattibilità e conoscere i limiti di tale metodologia.

Tali limiti vanno intesi come caratteristiche intrinseche del metodo che ne determinano la sua elevata complessità e che possono così riassumersi.

1. La metodologia LCA è caratterizzata da valutazioni *site-specific*: ad esempio uno studio condotto in un determinato luogo potrebbe essere non rappresentativo di altri casi analoghi situati in altre località.
2. Gli impatti ambientali sono descritti come impatti potenziali perché non sono definiti nello spazio e nel tempo adottando, quindi, un approccio di tipo stazionario.
3. Le ipotesi, le assunzioni e le scelte del confine del sistema sono influenzate da aspetti puramente soggettivi che determinano i risultati definitivi dello studio.
4. L'accuratezza dei dati ottenuti è notevolmente influenzata dalla disponibilità, accessibilità e qualità dei dati.
5. La validità dei risultati è limitata nel tempo a seconda del prodotto o del servizio considerato.

Nei paragrafi seguenti saranno descritte nel dettaglio le quattro fasi da seguire per effettuare un'analisi di LCA.

4.3.1 Definizione degli obiettivi (Goal and scope definition)

Questa fase è essenziale per definire tutta l'analisi LCA, in quanto consiste nella definizione degli obiettivi e degli scopi da raggiungere; essa è a sua volta suddivisa in quattro sottofasi.

1. Definire gli scopi e degli obiettivi.
2. Scegliere e definire l'unità funzionale.

3. Delimitare il campo di studio.
4. Effettuare un esame della rappresentatività.

Definizione degli scopi e degli obiettivi

In questa sottofase si definiscono le ipotesi iniziali dello studio di LCA da condurre, come gli obiettivi che si intendono perseguire, i limiti temporali e geografici, la tipologia di committente e a quale target si rivolge l'analisi.

A tal proposito, l'ISO 14040 afferma che *“L'obiettivo di un'analisi di LCA è quello di stabilire senza ambiguità quale sia l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio ed il contesto a cui è destinato”*.

Innanzitutto si sceglie lo scopo da perseguire mediante un'analisi di LCA che può essere di tre tipi: (i) *comparativa*, utilizzata se si vogliono comparare, in termini ambientali, prodotti o sistemi alternativi, (ii) *esplorativa*, se si intendono analizzare le performance ambientali di un prodotto, di un processo o di un servizio, (iii) *indicativa*, se si mira a ricavare indici per la riduzione dei costi e degli impatti ambientali.

Definizione e scelta dell'unità funzionale

L'unità funzionale è il riferimento al quale tutti i flussi di dati di input e di output devono essere normalizzati. La ISO 14040 afferma che *“Una unità funzionale costituisce una misura della prestazione del flusso in uscita del sistema prodotto. Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata ed in uscita. L'unità funzionale è il riferimento necessario per permettere la comparabilità dei dati e quindi dei risultati di un LCA”*.

In definitiva, l'unità funzionale è il parametro di riferimento per condurre tutte le analisi, i bilanci e gli opportuni confronti dei flussi di dati in entrata e in uscita.

Delimitazione del campo di studio (confini del sistema)

Data la complessità di uno studio di LCA è impossibile riuscire a tenere in conto di tutti i dati di input e di output del sistema. A tal proposito, è necessario definire delle ipotesi alla base dello studio che definiscono “i confini dello studio”.

In ogni bilancio, sia esso contabile o fisico, di un sistema, è necessario stabilirne i confini, cioè evidenziare le fasi considerate e le fasi trascurate nel corso dell'analisi. I confini del sistema, solitamente, definiscono tutti i processi che devono essere inclusi o esclusi dall'analisi.

Con un approccio *“dalla culla alla tomba”*, le fasi da considerare sono quelle corrispondenti all'intero ciclo di vita di un prodotto (i.e. estrazione

delle materie prime, produzione, trasposti, uso e fine vita). Anche l'ISO 14040 afferma che *“I criteri adottati nello stabilire i confini del sistema devono essere identificati”*.

Utilizzando un approccio del confine del sistema *“dalla culla al cancello”* è possibile escludere alcune fasi del ciclo di vita di un prodotto, cioè la fase di uso e di fine vita; mentre con un approccio *“dal cancello alla tomba”* è possibile escludere la fase di estrazione delle materie prime e la fase di produzione.

Esame della rappresentatività

Per condurre un'analisi di LCA corretta è necessario che i dati utilizzati siano coerenti con gli obiettivi dello studio. E' necessario, infatti, valutare la rappresentatività dei dati in relazione ai prodotti, ai servizi, ai processi in funzione degli obiettivi dello studio e del sito di riferimento. I dati utilizzati devono essere coerenti con l'analisi condotta: ad esempio, se si analizza un processo produttivo di un'azienda italiana utilizzando dati di altri paesi come riferimento si può correre il rischio di avere un risultato poco rappresentativo.

4.3.2 Analisi dell'inventario (LCI)

La fase di analisi dell'inventario è la seconda fase di una valutazione di LCA [33]. In tale fase viene sviluppato un vero e proprio inventario di dati di input e output ambientali. In ciascuna fase del ciclo di vita, una volta definito il confine del sistema, vengono computati tutti i flussi e le sostanze in ingresso ed in uscita del processo in analisi.

Tutti i dati raccolti, inoltre, vengono riferiti all'unità funzionale precedentemente definita. I principali dati di un LCI sono:

- input di energia, materie prime, input ausiliari, input fisici;
- prodotti, co-prodotti e rifiuti;
- emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo;
- altri aspetti ambientali.

La fase di raccolta dei dati di input e di output per sviluppare una corretta analisi di inventario LCA è molto delicata. E' necessario distinguere i dati come primari, secondari e terziari, dei quali, rispettivamente, i primi sono quelli reperiti di persona o in sito, i secondi sono i dati derivanti da letteratura o studi equivalenti come i database disponibili, i terzi sono derivanti da medie, proiezioni o statistiche.

Talvolta, i dati secondari non sono rappresentativi del sistema e dei confini stabiliti per l'analisi; infatti, è possibile incorrere in risultati caratterizzati da elevate incertezze o forti approssimazioni.

I dati secondari sono reperibili attraverso database, come *Ecoinvent* che raggruppa diverse valutazioni nel campo dell'agricoltura, energia, trasporti come biocarburanti biomateriali, materiali per costruzioni, materiali per l'imballaggio, metalli basici e preziosi, elettronici e altro ancora.

Ecoinvent rappresenta uno dei database più completi su scala internazionale.

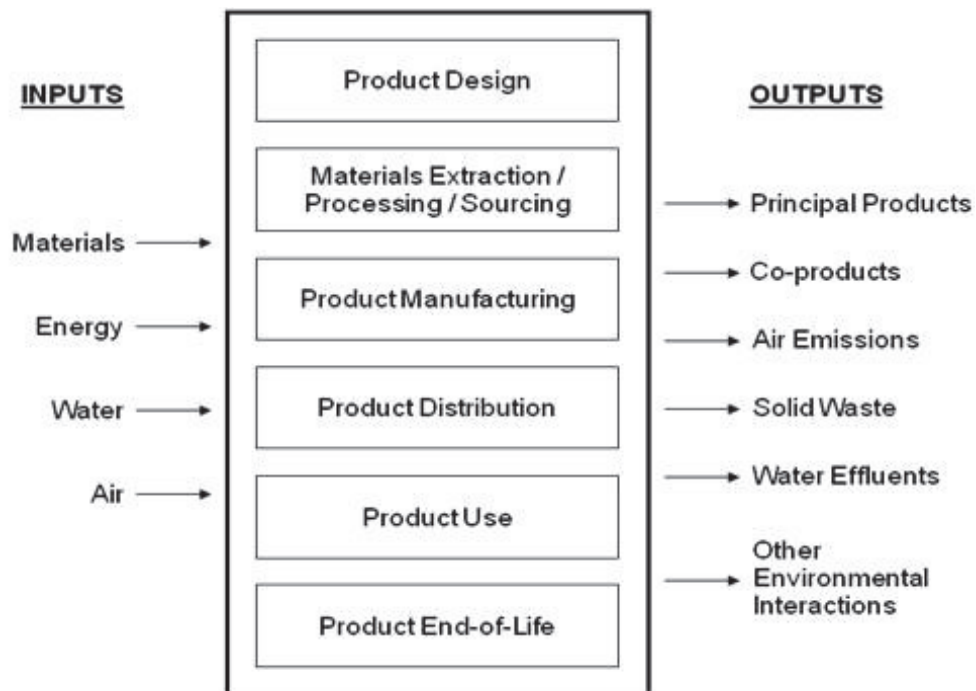


Figura 4.3 Fase di definizione di input/output

L'unica criticità, come precedentemente descritto, è la forte influenza di fattori geografici, temporali e tecnologici degli studi presenti in tali database; quindi, è necessario formulare delle ipotesi o delle semplificazioni per adattare tali risultati all'analisi LCA da condurre per evitare di utilizzare dati e informazioni che non si addicono perfettamente alla soluzione in esame.

4.3.3 Valutazione degli impatti ambientali potenziali

La valutazione degli impatti ambientali LCIA ha l'obiettivo di quantificare e valutare l'impatto ambientale di un determinato prodotto, processo o sistema utilizzando i risultati dell'LCI.

In tale fase si associano i dati derivanti dall'inventario a specifiche categorie di impatto ambientale e si attribuiscono gli indicatori ambientali.

La fase LCIA è caratterizzata da elementi obbligatori (classificazione e caratterizzazione) e da elementi opzionali (normalizzazione e ponderazione). La fase di classificazione e caratterizzazione assegna i risultati dell'inventario alle categorie di impatto, mentre la fase di normalizzazione e ponderazione converte la caratterizzazione dei risultati di differenti categorie di impatto usando fattori numerici. I valori di caratterizzazione possono essere normalizzati rispetto ad un valore di riferimento, allo scopo di definire la grandezza di ciascun effetto ambientale. Tale valore è generalmente rappresentato dalla media dei dati analoghi reperiti su scala globale, regionale o locale, riferito ad uno specifico intervallo di tempo. Attraverso la normalizzazione è possibile definire il relativo peso di ciascun aspetto o problema ambientale.

Nella Figura 4.4 si mostra le fasi e gli elementi principali della LCIA:

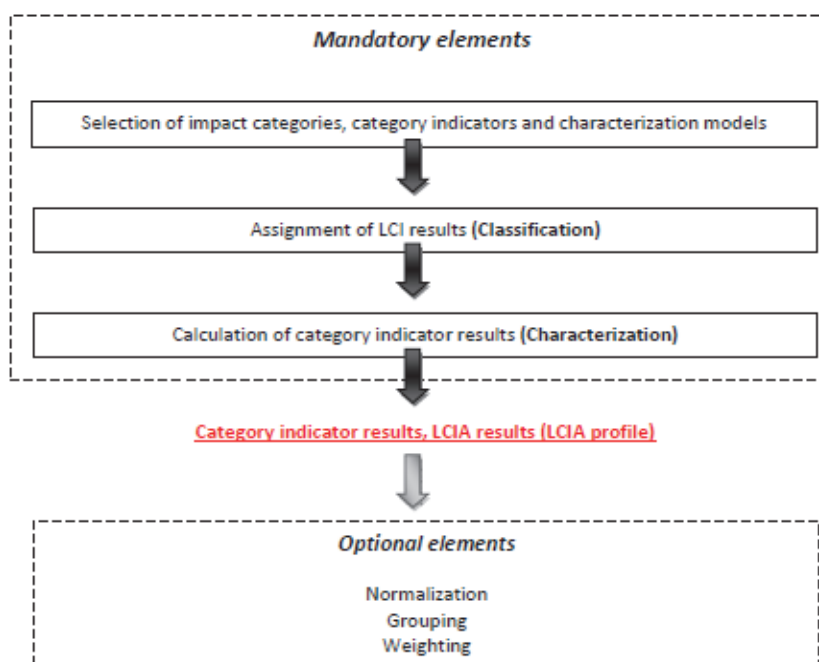


Figura 4.4 Fase LCIA

In letteratura, esistono diversi metodi per condurre la fase di LCIA e quindi per la valutazione degli impatti; essi possono essere suddivisi in tre categorie.

1. Il metodo classico per la valutazione dell'impatto, come EDIP, che esprime i risultati nelle cosiddette "*Mid-point categories*" o categorie intermedie-
2. I metodi orientati al danno, come Ecoindicator 99, che rappresenta i risultati della LCIA nelle "*End-point categorie*" o categorie di danno;
3. I metodi orientati alle "*Mid-point/End-point categorie*", come l'*Impact2002+* che utilizza i vantaggi di entrambi gli approcci; infatti esso propone la rappresentazione dei risultati sia in termini di categorie intermedie che di danno.

Il metodo Impact2002+ [34] è uno dei metodi più utilizzati per la fase LCIA in quanto quelli che utilizzano le categorie intermedie forniscono i risultati in termini quantitativi; mentre, i metodi orientato alle categorie finali o di danno, come l'Impact2002+, forniscono risultati facilmente interpretabili dagli utenti finali.

Nella Figura 4.5 si mostra lo schema rappresentativo delle categorie fornite dal metodo Impact2002+.

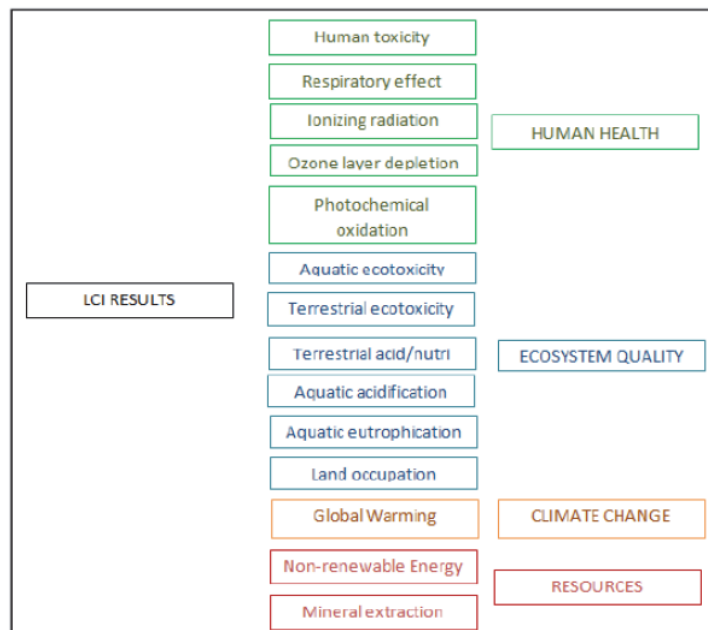


Figura 4.5 Categorie previste dal metodo Impact2002+ [34]

Per la metodologia Impact2002+ i risultati, quindi, possono essere espressi sia in 14 *Mid-point categories* in termini di kg equivalenti della sostanza di riferimento (es. Human Toxicity espressi in kg equivalenti di chloroethylene) che nelle 4 *End-point categories* in termini di *Human Health* (espressi in DALY), *Ecosystem Quality* (espressi in PDF*m²*yr), *Climate Change* (espressi in kg eq. CO₂) e *Resources* (espressi in MJ) [34].

Nella Figura 4.6 si mostra l'accoppiamento tra le 14 categorie intermedie con le quattro categorie finali o di danno.

Nei casi di studio illustrati nella presente trattazione, è stato utilizzato il software Simapro7 per raccogliere e analizzare tutte le performance di sostenibilità dei diversi casi analizzati e l'Impact2002+ come metodologia di rappresentazione dei risultati.

MidPoint category	Midpoint reference substance	Damage categories	Damage unit
Human toxicity (Carcinogens+ non-carcinogens)	kg eq. Chloroethylene into air	Human health	DALY
Respiratory inorganics	Kg eq. PM 2,5 into air	Human health	DALY
Ionizing radiation	kg eq. Carbon-14 into air	Human health	DALY
Ozone layer depletion	kg eq. CFC-11 into air	Human health	DALY
Photochemical oxidation (Respiratory organics for human health)	kg eq. ethylene into air	Human health	DALY
		Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Aquatic ecotoxicity	kg eq. Triethylene glycol into water	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Terrestrial ecotoxicity	kg eq. Triethylene glycol into water	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Terrestrial acidification/nutrication	kg eq. SO ₂ into air	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Aquatic eutrofication	kg eq. PO ₄ into water	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Land occupation	m ² eq organic arable land-year	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Global warming	kg eq. CO ₂ into air	Climate change	kg eq. CO ₂
Non renewable energy	MJ total primary non renewable energy	Resources	MJ
Mineral extraction	MJ additional energy	Resources	MJ

Figura 4.6 Categorie intermedie e di danno, sostanze di riferimento, e unità di danno usate in Impact2002+ [34]

4.3.4 Interpretazione dei risultati

Tale fase ha l'obiettivo di dare un'interpretazione critica dei risultati delle analisi di LCA condotte e di risalire agli elementi che influiscono in

maniera maggiore in termini ambientali sia come prodotto sia come fase dell'intero processo. In questa fase è possibile, quindi, sviluppare le strategie di intervento per mitigare gli impatti ambientali sia cambiando il materiale stesso ma anche modificando i processi.

4.4 INTEGRAZIONE DI LCA NEL BIM APPLICATA AD UN CASO STUDIO

L'attività di ricerca che ha portato allo sviluppo della procedura presentata, nasce dalla collaborazione tra il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università Federico II di Napoli, il Consorzio TRE (Tecnologie per il Recupero Edilizio), il centro di ricerca AMRA (Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale) e la società ACCA Software nell'ambito del progetto VINCES Valutazione Integrata del Ciclo di vita per l'Edilizia Sostenibile), finanziato dal programma Campus della Regione Campania.

4.4.1 Complessità delle LCA nel settore delle costruzioni

La metodologia LCA, soprattutto nei processi edilizi, come si è visto nei paragrafi precedenti, è caratterizzata da un'elevata quantità di dati che spesso rappresentano una barriera per l'utilizzo dell'LCA nel settore delle costruzioni.

La complessità delle LCA nel settore delle costruzioni ne determina uno scarso utilizzo nell'edilizia e nella progettazione di opere civili, lasciando largo spazio ai protocolli di sostenibilità e sistemi di rating delle performance ambientali.

Tale complessità è determinata dall'elevato numero di dati necessari per sviluppare le analisi di LCA; infatti, secondo la metodologia descritta precedentemente, per raggiungere un approccio "*from cradle to gate*", per ogni materiale si hanno come input tutti i dati che caratterizzano la fase di estrazione e produzione dei materiali e quelli che definiscono le fasi di messa in opera per la realizzazione di un aggregato edilizio.

Per raggiungere un approccio "*from cradle to grave*", invece, si considerano anche le fasi di utilizzo, manutenzione e smaltimento. Come dati di output, utilizzando la metodologia Impact2002+, si hanno 4 categorie

di danno e 15 categorie di impatto, per tutti i materiali, sistemi e lavorazioni per realizzare un aggregato edilizio.

Tale complessità rappresenta una grande barriera per l'utilizzo dell'LCA nella progettazione e realizzazione di opere civili, anche se, i professionisti del settore edile quali ingegneri ed architetti considerano l'utilizzo di tale metodologia di rilevante importanza per i propri progetti. Per questo motivo, risulta necessario fornire degli strumenti a supporto della progettazione basati su analisi LCA per favorire il suo utilizzo nella pratica professionale. A tal proposito, è dimostrato che la metodologia LCA è largamente diffusa in ambito della ricerca al punto tale che alcuni ricercatori già la utilizzano per i loro progetti; invece, i professionisti pur conoscendo il metodo e la sua valenza raramente lo utilizzano nelle proprie progettazioni [35].

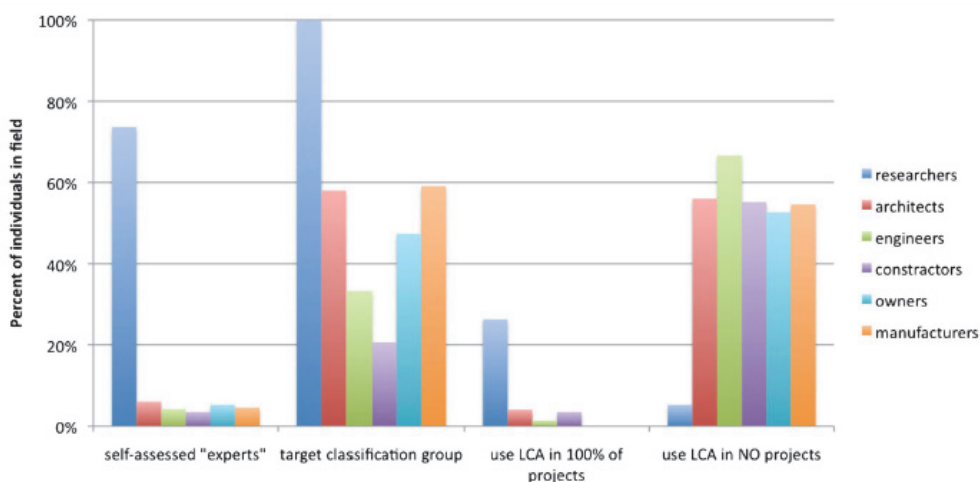


Figura 4.7 Utilizzo della metodologia LCA [35]

4.4.2 Metodologia, scopo dello studio ed integrazione di LCA nel BIM

È evidente che per opere civili la mole di dati da reperire e gestire è estremamente elevata, perché legata all'utilizzo di numerosi e diversi materiali, sistemi, impianti e componenti all'interno di ogni singolo prodotto edilizio. Le potenzialità del BIM di archiviare e gestire le informazioni di ogni singolo componente offrono quindi l'opportunità di supportare il processo decisionale della progettazione, perseguendo un approccio life cycle che integri nei modelli BIM informazioni relative agli impatti ambientali dei singoli componenti [36].

Stante ciò, lo studio propone un processo logico che i progettisti possono utilizzare per la valutazione della sostenibilità di un edificio mediante LCA con il supporto del BIM. Tale ricerca è limitata agli edifici residenziali di nuova costruzione.

La metodologia presentata è caratterizzata dalla progettazione di un edificio utilizzando la metodologia Building Information Modeling (BIM) sia degli elementi strutturali che architettonici.

L'approccio logico proposto, per la valutazione della sostenibilità degli edifici, è sviluppato mediante l'utilizzo dei dati, quantitativi e qualitativi, di ogni elemento presente nel modello 3D BIM ed utilizzati come parametri di input per sviluppare valutazioni di Life Cycle Assessment (LCA).

Tale opportunità è garantita dal BIM che permette di utilizzare e di archiviare diverse tipologie di informazioni e poterle rappresentare in un modello unico virtuale e integrato.

Diviene possibile integrare sia informazioni geometriche sia non geometriche in modo da consentire la contemporaneità delle analisi strutturali, la progettazione architettonica e impiantistica con lo scopo di fornire documenti di progetto completi e intelligenti. Tale approccio integrato alla progettazione garantisce una qualità più elevata dei progetti e delle analisi [37].

Le potenzialità del BIM di archiviare ed utilizzare i dati di ogni singolo componente, che costituisce il complesso edificio, possono essere utilizzate per effettuare le analisi di LCA. Nell'ottica dell'intero ciclo di vita di una struttura è possibile stabilire, quindi, un procedimento per effettuare analisi di LCA direttamente dal BIM, integrando le informazioni riguardanti i risultati di LCA nel database di oggetti a supporto del BIM.

E' possibile iniziare questa valutazione basandosi sulla fase di approvvigionamento dei materiali e quindi effettuando delle analisi di LCA "*from cradle to gate*", trascurando per il momento la fase di messa in opera, la fase di manutenzione e dismissione della struttura.

Nel caso specifico, è stato sviluppato un modello BIM di una struttura residenziale nella quale sono state dimensionate le strutture e gli elementi architettonici. A valle della progettazione è stato estratto il computo di tutti gli elementi che compongono l'edificio per cui è stato semplice desumere i dati sia quantitativi che qualitativi di tutti i componenti della struttura. Con tali dati è stato possibile svolgere le LCA mediante l'utilizzo del software SimaPro.

Il framework utilizzato è solo una procedura per valutare l'efficacia del metodo giacché è possibile integrare i risultati delle analisi di LCA come informazioni aggiuntive al database già esistente per la metodologia BIM.

Il caso di studio è rappresentato da un edificio di nuova costruzione che presenta gli standard costruttivi italiani, progettato con software BIM dal quale è stato possibile reperire tutte le informazioni necessarie per le LCA effettuate.

4.4.3 Caso studio

Il caso di studio è relativo ad un edificio tipo, di nuova costruzione, implementato in metodologia BIM mediante il software *“Edificius”*, appartenente alla suite di programmi interoperabili di casa ACCA.

L'edificio si sviluppa su due piani in elevazione, ognuno di 70,50 mq, per una superficie calpestabile totale di 141 mq con un'altezza di interpiano pari a 3,2 m.

La struttura portante è composta da telai spaziali di travi e pilasti in cemento armato; la fondazione è costituita da una piastra in cemento armato; infine i solai sono realizzati mediante struttura latero cementizia.

Gli unici elementi non strutturali considerati solo gli elementi di finitura, quali, pavimenti, porte, finestre, tramezzature interne ed esterne e tutte i materiali inerenti alle tinteggiature di interni ed esterni, come si vedrà nel computo metrico a seguire.

La struttura progettata, come mostrato in Figura 4.8, è di modeste dimensioni; tuttavia essa risponde pienamente all'obiettivo fissato, di dimostrare l'efficacia della metodologia proposta di valutazione di LCA di un sistema edificio gestibile interamente con strumenti BIM.

Allo scopo di gestire in maniera interoperabile le informazioni utili dal modello BIM per sviluppare le analisi di LCA è stato progettato un software *ad hoc*, *“Primus v100d – Beta LCA 1.00”*, realizzato in collaborazione con ACCA software. Tale applicazione è capace di interfacciarsi in maniera interoperabile con tutti gli altri software della suite BIM di ACCA.

Definito il modello BIM, è stato possibile condurre le analisi strutturali in modo tale da verificare, secondo le NTC '08, gli elementi portanti e definire l'armatura degli elementi in c.a.

In seguito è stato possibile associare ad ogni elemento del modello centrale BIM la voce di costo del Prezzario della Regione Campania delle Opere Pubbliche, sviluppando in tal modo il computo estimativo dei

materiali e delle lavorazioni sia per le opere strutturali sia per le opere non strutturali.

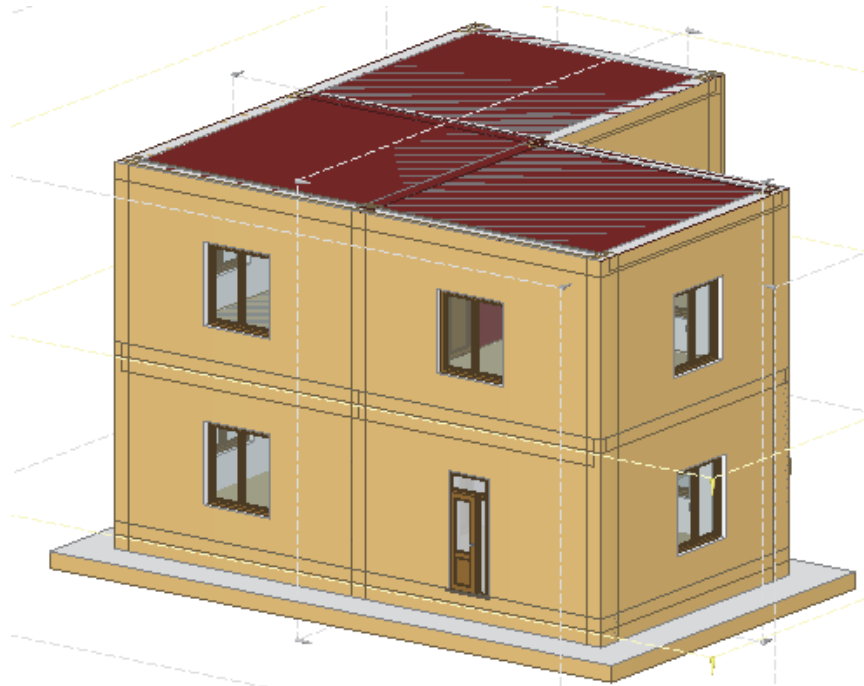


Figura 4.8 Modello BIM 3D dell'edificio oggetto del caso di studio

Una volta definito il computo metrico estimativo, è stato possibile lo sviluppo delle analisi LCA, seguendo tutte le fasi prescritte dalla ISO 14010, con il supporto delle informazioni ricavate direttamente dal modello BIM in esame.

Il computo metrico estimativo dei materiali utilizzati per la realizzazione della struttura è riportato per intero nella Tabella 4.1.

Alla base dello studio, si è ipotizzato di condurre le analisi di LCA *“from cradle to gate”*, valutando quindi l’impatto ambientale fino alla fase di realizzazione dell’edificio e comprendendo, dunque, la fase delle lavorazioni.

La fase di uso, di manutenzione e di dismissione sono state trascurate allo scopo di semplificare l’applicazione

N° Ord.	TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	QUANTITA'
1	E.03.010.030.a	Calcestruzzo SOMMANO mc	21,61
2	E.04.010.010.c	Solaio a struttura mista in cemento armato e laterizio SOMMANO mq	133,95
3	E.03.010.020.a	Calcestruzzo SOMMANO mc	35,70
4	E.13.030.020.a	Pavimento in piastrelle di gres fine porcellanato SOMMANO mq	169,99
5	E.08.020.025.a	Muratura monostrato di tamponamento SOMMANO mq	282,69
6	E.16.020.030.b	Intonaco civile liscio a tre strati SOMMANO mq	712,00
7	E.21.020.040.b	Tinteggiatura con pittura lavabile di resine sintetiche emulsionabili (idropittura) SOMMANO mq	789,43
8	E.18.065.020.a	Porta in legno ad un anta cieca omologata e certificata SOMMANO cad	1,00
9	E.18.020.010.a	Porta interna in legno con anta mobile tamburata e con bordi impiallacciati SOMMANO cad	3,00
10	E.08.020.010.c	Tramezzatura di mattoni forati di laterizio eseguita con malta cementizia entro e fuori terra SOMMANO mq	32,00
11	E.18.080.040.a	Infisso in alluminio anodizzato a taglio termico per finestre SOMMANO mq	13,00
12	102.06.1.002	Fornitura in opera di acciaio FeB 38K per strutture in cemento armato in barre ad aderenza migliorata SOMMANO kg	4545,08
13	103.02.1.003	Fornitura in opera di cassaforma in legno completa di armatura di sostegno e controventatura. SOMMANO mq	171,68

Tabella 4.1 Computo metrico dei materiali

La fase di LCI, quindi l'Inventory dello studio di LCA, è stata condotta utilizzando le schede degli elementi che compongono il Prezzario Regionale, dalle quali è stato possibile effettuare un'analisi dettagliata delle quantità, dei prodotti e delle lavorazioni. A scopo illustrativo si riporta nella Figura 4.9 la scheda dell'elemento solaio considerato nel progetto dell'edificio proposto.

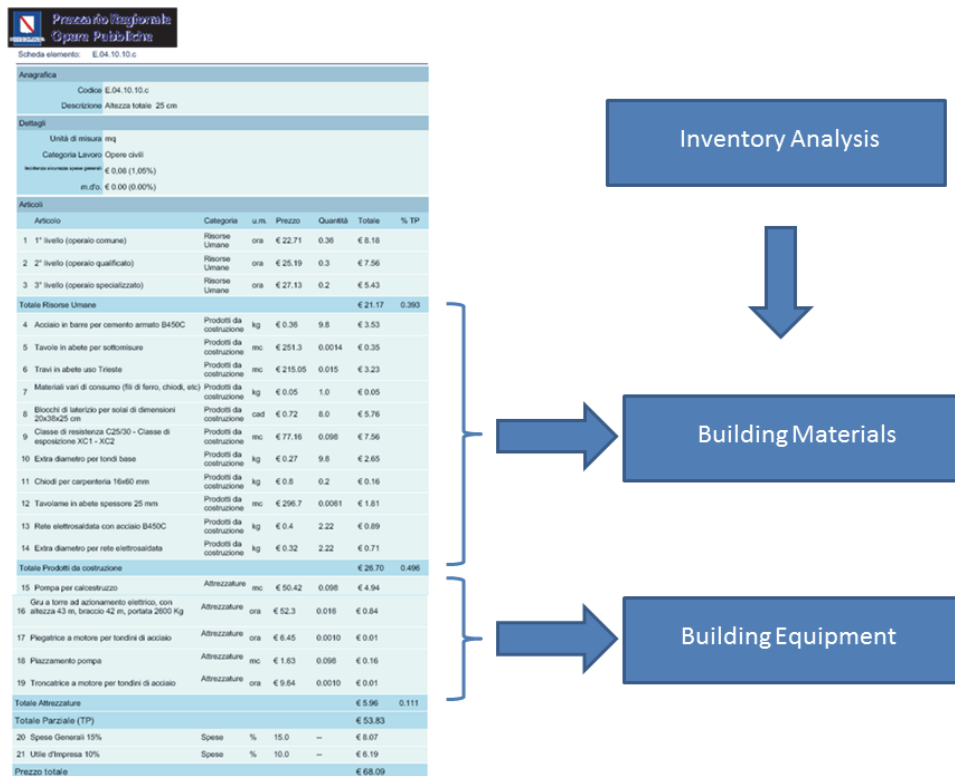


Figura 4.9 Inventory Analysis mediante le schede del Prezzario

L'unità funzionale utilizzata, per condurre l'analisi di LCA, è il sistema edificio globale, per cui, si è tenuto conto di tutti i materiali e le lavorazioni necessarie per la realizzazione dello stesso.

Una volta conclusa la fase di Inventory ed essendo quindi note tutte le quantità dei materiali e delle lavorazioni, si è passati alla fase di Life Cycle Assessment, con il supporto del software "SimaPro" e l'utilizzo del database Ecoinvent 2.2 (Ecoinvent; Hedemann and König 2007) con il quale è stato possibile ricavare tutti gli indicatori di impatto ambientale sia della categoria d'impatto sia della categoria di danno, come regolato dalla metodologia Impact2002+. Tali dati di output della fase di LCA sono stati integrati nel database del software di Contabilità e Computi, ancora in versione sperimentale, "Primus v100d – Beta LCA 1.00" interoperabile con gli altri software della suite ACCA Software

Nella Figura 4.10 si mostra una delle fasi di input dei risultati di LCA nel modello BIM, nel quale è possibile associare ad ogni singola voce di computo dell'opera da realizzare i dati degli impatti ambientali previsti

dalla metodologia Impact2002+, in accordo con le ISO 14040/44 (nella fattispecie con le categorie di danno e quelle d'impatto).

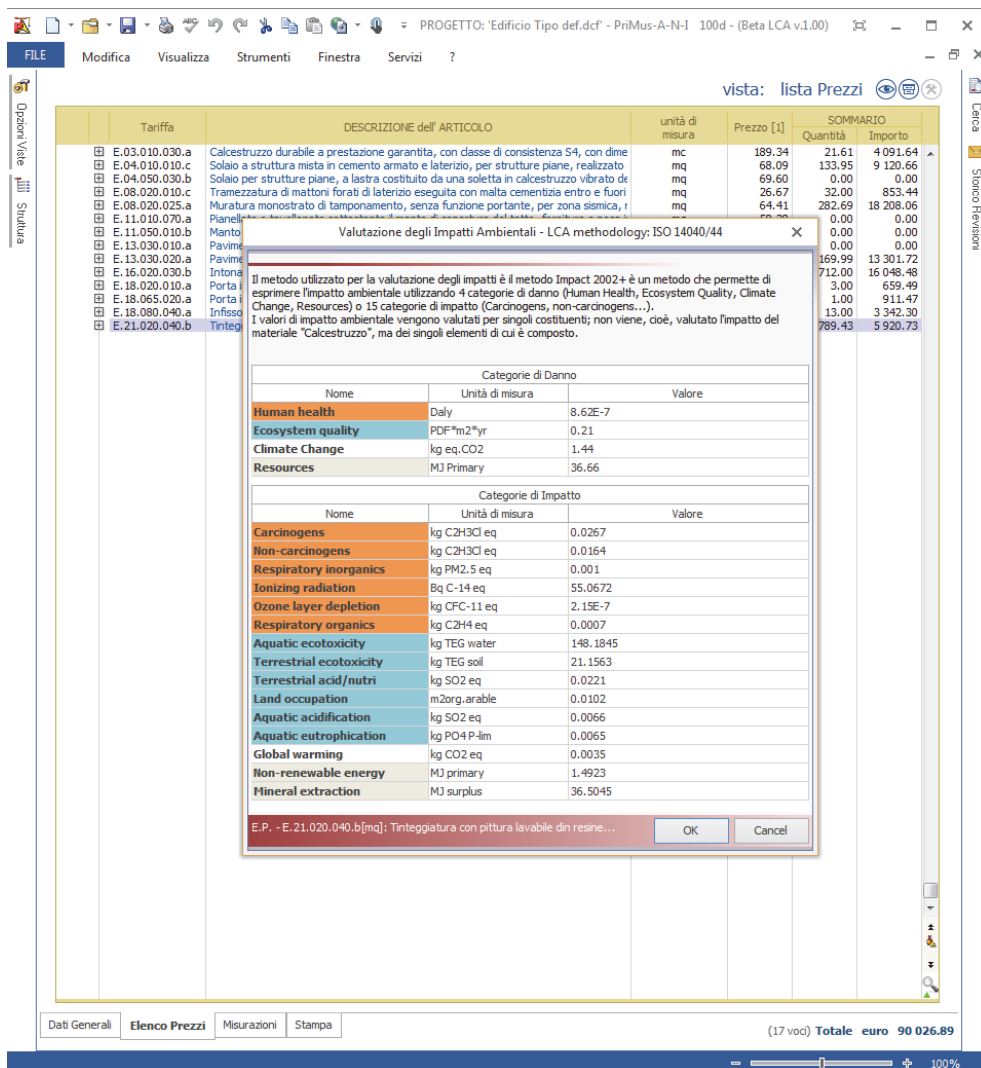


Figura 4.10 Integrazione dei dati di LCA nel processo BIM

Terminata la fase di inserimento degli indicatori di LCA, ad ogni voce del computo dei materiali e delle lavorazioni sono stati associati non solo i costi ma anche i singoli indicatori di impatto ambientale, permettendo quindi di effettuare la valutazione di LCA dell'intero edificio.

L'interpretazione dei risultati, fase finale della valutazione LCA, è stata condotta in maniera automatica mediante le analisi effettuate dal software

“Primus v100d – Beta LCA 1.00” con le informazioni estratte direttamente da modello centrale BIM dell'edificio.

La Figura 4.11 riporta alcuni grafici che sintetizzano l'impatto ambientale, valutato con la metodologia Impact 2002+, dell'edificio oggetto del caso di studio.

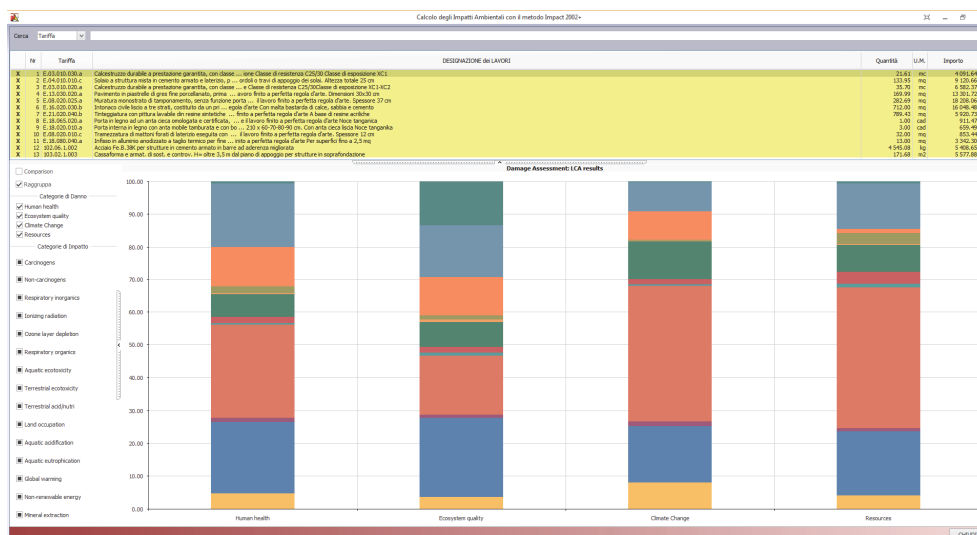


Figura 4.11 Risultati di impatto ambientale del software Primusv100d – Beta LCA 1.00

4.5 CONCLUSIONI

La mitigazione dell'impatto ambientale degli edifici e delle opere civili è sicuramente un aspetto molto importante e attuale nelle strategie di sviluppo sostenibile, tuttavia complesso da perseguire.

Le metodologie di LCA rappresentano degli strumenti affidabili ed oggettivi per la valutazione degli impatti sull'ambiente di materiali e processi; esse però risultano ancora scarsamente utilizzate in ambito civile a causa della difficoltà nella gestione dell'elevata mole di dati necessari per condurre tali analisi

L'elevata mole di dati scaturisce dall'estrema complessità ed eterogeneità di sistemi, materiali e componenti che caratterizzano il prodotto finale dell'industria delle costruzioni.

L'approccio BIM che ha rivoluzionato la gestione delle informazioni relative alle opere civili, consentirà di superare questa problematica grazie

alla possibilità di gestire numerose informazioni integrandone contenuti e proprietà e supportando i processi decisionali di progettazione.

Il lavoro qui presentato vuole mostrare come l'approccio BIM è potenzialmente in grado di gestire la complessità delle informazioni provenienti da un'analisi LCA, offrendo ai progettisti la possibilità di operare scelte progettuali avendo a disposizione informazioni chiare sugli impatti ambientali legati alle diverse tecnologie edilizie e alle varie fasi progettuali.

Ovviamente tale opportunità può rendersi disponibile solo a valle di un importante lavoro di inventario e catalogazione degli impatti ambientali legati ai materiali, ai sistemi, ai componenti ed alle lavorazioni che vengono adoperati nell'immensa industria delle costruzioni.

Capitolo 5.

LIFE CYCLE ASSESSMENT DI STRATEGIE DI ADEGUAMENTO SISMICO DI STRUTTURE ESISTENTI

5.1 INTRODUZIONE

Negli ultimi anni seppure in maniera non troppo diffusa, ci sono state applicazioni dell'LCA per la valutazione dell'impatto ambientale associato all'intero ciclo di vita delle nuove costruzioni. Al contrario non esistono molte applicazioni per la valutazione della sostenibilità connessa al recupero del patrimonio edilizio esistente.

Tuttavia l'attuale scarsità delle risorse e la tendenza ad utilizzare metodologie per lo sviluppo sostenibile hanno portato tutti gli operatori del settore delle costruzioni a investire sul ripristino degli edifici esistenti [38].

L'LCA applicata alle strutture può essere utilizzata per perseguire diversi tipi di obiettivi poiché sono diverse le "scale di valutazione" possibili, come il singolo materiale, le componenti o l'intero edificio. Esiste inoltre la possibilità reale di estendere le analisi alle diverse fasi o all'intero ciclo di vita dell'opera in oggetto.

Nel presente capitolo viene trattata la valutazione dell'impatto ambientale connessa a differenti strategie di consolidamento strutturale applicate a un edificio esistente in cemento armato, le cui caratteristiche sono in parte ottenute da un progetto simulato. L'edificio in esame rispecchia un'aliquota consistente del costruito esistente tipico dell'area mediterranea realizzato alla fine degli anni 70'.

In particolare le analisi sono state condotte considerando le seguenti variabili:

- scala di valutazione: partendo dal singolo materiale arrivando all'intero edificio;
- fasi del ciclo di vita: produzione dei materiali da costruzione, preparazione dell'intervento, applicazione dell'intervento.

L'edificio tipo è stato concepito sulla base di un'attenta analisi del costruito dell'epoca, per cui il progetto rispecchia fedelmente le

caratteristiche dell'epoca in termini di materiali, dettagli costruttivi e schemi strutturali.

L'edificio è stato progettato mediante la metodologia BIM, con due software differenti; in seguito è stato esportato il modello strutturale nel solutore SAP2000 con cui si sono state condotte tutte le analisi di valutazione di vulnerabilità sismica.

Il progetto della struttura è stato effettuato in accordo con la legge 5/11/1971 n. 1086 *“Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica”* [39], ed, in particolare, il successivo Decreto Ministeriale 30/5/1974 che prevedeva il metodo delle tensioni ammissibili per la verifica delle sezioni e per calcolo delle armature [40].

Successivamente è stata valutata la vulnerabilità sismica dell'edificio in esame mediante un'analisi statica non lineare, definendo così i meccanismi di crisi duttili/fragili necessari per la computazione degli indicatori di rischio I_R minimi relativi ai meccanismi di crisi.

E' stato eseguito, in primo luogo, un intervento di miglioramento sismico, con lo scopo di incrementare la capacità strutturale fino al presentarsi della prima crisi duttile che si è registrata per un indice di rischio $I_R=76\%$. Successivamente sono stati previsti interventi di adeguamento sismico di diversa tipologia per ottenere gli standard di sicurezza previsti dalla normativa (NTC 08) per lo stato limite considerato (SLV). In particolare, le tecniche di adeguamento sismico adottate sono: (i) intervento con esclusivo uso di FRP, (ii) inserimento di pareti sismoresistenti in calcestruzzo armato e (iii) uso combinato di incamiciatura in cemento armato ed FRP.

I risultati ottenuti non solo hanno permesso di valutare le performance ambientali di ciascuna tecnica d'intervento ma anche di valutare, mediante un'analisi comparativa, la tecnica che tra tutte presenta il più basso impatto ambientale, considerando come unità funzionale dello studio di LCA l'adeguamento sismico della struttura.

5.2 DEFINIZIONE DELLA STRUTTURA

La normativa di riferimento per l'edificio in esame è la legge 5/11/1971 n. 1086 *“Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica”*, ed, in particolare, il successivo Decreto Ministeriale 30/5/1974, *“Norme tecniche*

alle quali devono uniformarsi le costruzioni in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica". Il D.M. 30/5/74 prevedeva il metodo delle tensioni ammissibili per la verifica delle sezioni e per il calcolo delle armature.

L'edificio tipo è in cemento armato e rappresenta una buona parte del costruito tipico dell'area mediterranea, progettato e realizzato per uso abitativo alla fine degli anni 70' in zona classificata non sismica e, quindi, considerando solo le azioni dovute ai carichi gravitazionali.

La struttura è situata nel Comune di Casalnuovo di Napoli, considerando una tipologia topografica (T₁) ed una categoria di sottosuolo di Tipo B.

Le caratteristiche geometriche necessarie per la costruzione del modello sono state desunte dalle tavole di progetto. La struttura in esame è caratterizzata da tre impalcati tutti fuori terra con due torrini che consentono l'accesso all'impalcato di copertura. Il corpo strutturale è caratterizzato da una struttura a telai bidirezionali e presenta una pianta di dimensioni 48,15 m x 18,10 m con altezza di interpiano pari a 3,7 m per il primo impalcato e di 3,2 m per gli altri impalcati. L'edificio non si presenta strutturalmente simmetrico sia rispetto all'asse Y (lato corto – trasversale), sia rispetto all'asse X (lato lungo – longitudinale). I solai sono caratterizzati da un'altezza di 24 cm (20 cm + 4 cm di soletta), presentano la direzione di orditura parallela all'asse X e sono costituiti da travetti in c.a. gettati in opera di 10 cm di larghezza e da pignatte in laterizio 40 x 25 x 20. Si riscontra, inoltre, la presenza di due vani scale, posti ad una distanza pari a 18 m l'uno dall'altro posti in posizione decentrata rispetto al baricentro degli impalcati. I vani scala sono entrambi composti da 6 rampe realizzate con uno schema a soletta rampante in c.a. di spessore di 24 cm e larghezza 1,7 m.

Nella struttura è possibile evidenziare nove telai in direzione Y con interasse pari a 6 m, e quattro in direzione X con interasse 4,5 m tra i telai 1°-2° e 3°-4°, mentre di 6 m tra i telai 2°-3°, e tre sbalzi posti in direzione Y.

In particolare i telai in direzione Y sono caratterizzati dalla presenza di travi emergenti di sezione rettangolare 30 cm x 60 cm, quelli in direzione X da travi a spessore di sezione rettangolare 35 cm x 24 cm. I pilastri sono di sezione rettangolare quasi tutti di dimensioni 30 cm x 50 cm eccetto i pilastri esterni, che sostengono lo sbalzo centrale, i quali presentano una sezione di 30 cm x 30 cm, e i due pilastri in corrispondenza della parte interna dei vani scala di dimensione 30 cm x 60 cm.

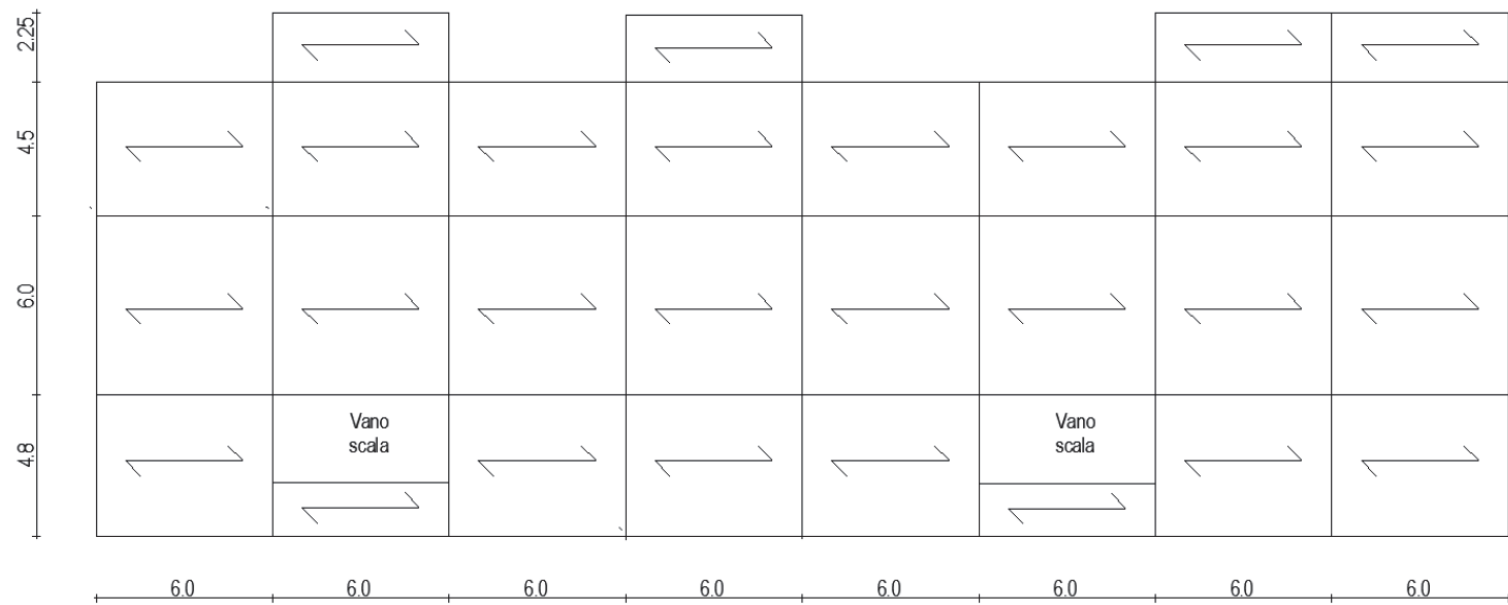


Figura 5.1 Pianta con dimensioni dell'edificio

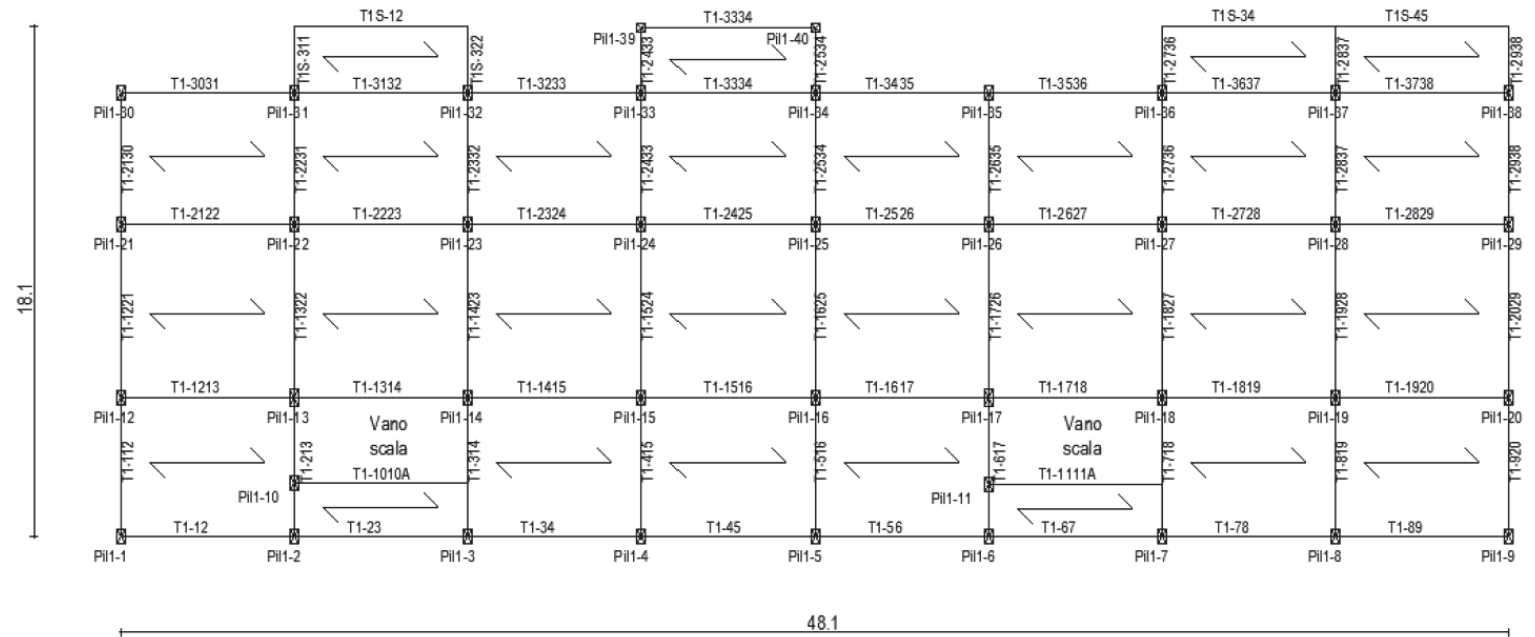


Figura 5.2 Pianta con nomenclatura travi e pilastri

5.2.1 Modellazione dell'edificio

La modellazione dell'edificio è stata condotta con l'ausilio degli elaborati di progetto e mediante il software *REVIT BIM* di casa Autodesk.

Il modello BIM è caratterizzato dall'implementazione di tutti gli elementi strutturali ed architettonici. Gli elementi che compongono la struttura, quindi, sono stati preliminarmente modellati in *REVIT* e successivamente è stato esportato in *SAP 2000* il modello strutturale.



Figura 5.3 Viste 3D del modello BIM dell'edificio

Il modello importato in *SAP 2000* [41] ha riconosciuto tutte le informazioni e gli attributi definiti nel software BIM come sezioni

geometriche, materiali, vincoli e carichi, per cui è stato possibile disporre di un modello FEM il cui comportamento approssima quello reale della struttura.

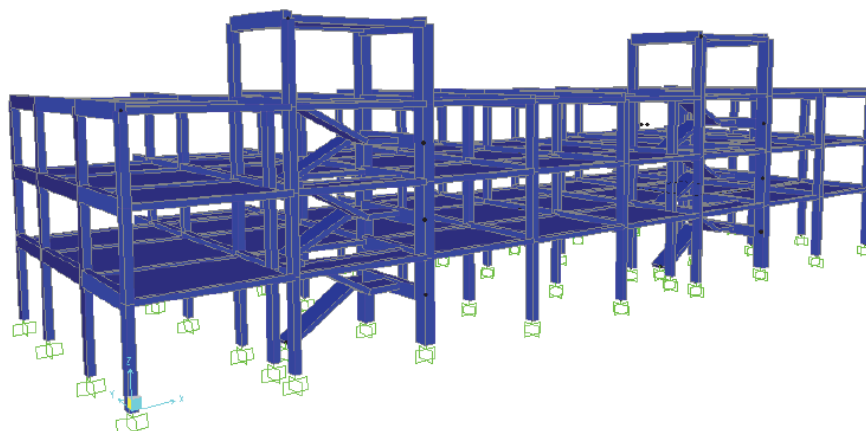


Figura 5.4 Modello strutturale SAP2000 dell'edificio

Le ipotesi di calcolo utilizzate alla base delle analisi strutturali sono:

- elementi non strutturali trascurati; si tiene conto degli elementi non strutturali nell'analisi dei carichi considerando come elementi non strutturali le tramezzature interne e le tamponature esterne;
- impalcati infinitamente rigidi nel proprio piano;
- schema costituito da un insieme spaziale di telai piani; quindi, gli assi delle aste che si uniscono in un nodo convergono in un unico punto;
- struttura incastrata al piede; si trascura l'interazione con il terreno (tale ipotesi è accettabile se la rigidezza degli elementi in fondazione è maggiore di quella di travi e pilastri, ipotesi motivata nel caso di elementi verticali snelli).

I solai dell'edificio hanno un'altezza pari a 24 cm, con soletta di spessore di 4 cm, caratteristica che motiva l'ipotesi di considerare gli impalcati rigidi nel proprio piano. Per garantire tale comportamento nel modello i nodi degli impalcati sono stati vincolati mediante diaframmi rigidi di piano. Questa scelta è rafforzata anche dalla necessità di tener conto, nelle successive analisi, dell'eccentricità accidentale. A tal proposito mediante una modellazione con diaframmi rigidi di piano è possibile inserire, all'interno degli impalcati, punti isolati che hanno lo stesso vincolo dei nodi appartenenti all'impalcato stesso, in modo tale da poter applicare, in questi

punti, le distribuzioni di forze con la dovuta eccentricità rispetto al baricentro delle masse. Sono stati inseriti, inoltre, degli elementi di tipo membrana, in corrispondenza dei solai, con la caratteristica di peso nullo, in modo tale che i carichi strutturali (G_1), non strutturali (G_2) del solaio e i carichi accidentali (Q_k), mediante l'utilizzo di aree di carico, siano trasferiti direttamente alle travi secondo l'orditura del solaio stesso.

Altri carichi, come le tamponature esterne, sono stati applicati alle travi definendo dei carichi uniformemente distribuiti sulle stesse. Per la modellazione delle scale, caratterizzate da solette rampanti piene di calcestruzzo, si sono adottati degli elementi frame di sezione pari a quella della soletta.

Per quanto riguarda i materiali utilizzati, facendo riferimento al periodo ipotizzato di progettazione e costruzione, si è rilevato che le resistenze previste per il calcestruzzo erano comprese tra un minimo di 150 kg/cm^2 e un massimo di 500 kg/cm^2 , intesi come valori caratteristici R_{ck} . Le tensioni ammissibili variavano, in funzione della R_{ck} , da 60 kg/cm^2 a $147,5 \text{ kg/cm}^2$ nel caso di flessione o pressoflessione.

Per elementi calcolati a compressione semplice o per solette di spessore inferiore a 5 cm , era prevista un'ulteriore riduzione del 30% , con valori ammissibili compresi tra 42 kg/cm^2 e 103 kg/cm^2 .

In merito al caso studio si è scelto di utilizzare un calcestruzzo usuale della pratica progettuale degli anni '70' di cui si riportano le caratteristiche meccaniche.

Calcestruzzo R_{ck} 250

Le normative di riferimento forniscono le seguenti formule per il calcolo delle tensioni ammissibili del conglomerato:

- *Tensione ammissibile di flessione:*

$$\sigma_{a,cf} = 60 + \frac{R_{ck} - 150}{4} = 85 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \text{Eq. 5.1}$$

- *Tensione ammissibile di compressione:*

$$\sigma_{a,cc} = \sigma_{a,cf} - (0.3 \cdot \sigma_{a,cf}) = 60 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \text{Eq. 5.2}$$

- *Modulo elastico del calcestruzzo:*

$$E = 18000 \cdot \sqrt{R_{ck}} \frac{kg}{cm^2} \quad \text{Eq. 5.3}$$

Per quanto riguarda l'acciaio di armatura, all'epoca della costruzione erano previsti due tipi di acciaio: liscio e ad aderenza migliorata. Per l'acciaio liscio si prevedevano due classi di resistenza, indicate con FeB22k e FeB32k, aventi tensione caratteristica di rottura f_{tk} compresa tra 3400 kg/cm² e 5000 kg/cm², tensione caratteristica di snervamento tra 2200 kg/cm² e 3200 kg/cm², allungamento a rottura non inferiore a 24-23% e tensioni ammissibili comprese tra 1200 kg/cm² e 1600 kg/cm². Per l'acciaio ad aderenza migliorata si prevedevano tre classi di resistenza indicate con A38, A41 e FeB44k aventi tensione caratteristica di rottura compresa tra 4600 kg/cm² e 5500 kg/cm², tensione caratteristica di snervamento tra 3800 kg/cm² e 4400 kg/cm², allungamento a rottura non inferiore al 14-12%. Le tensioni ammissibili erano comprese tra 2200 kg/cm² e 2600 kg/cm² per acciai controllati in stabilimento, e tra 1900 kg/cm² e 2200 kg/cm² per acciai non controllati.

Nel caso di studio in esame si è adottato un acciaio FeB44k ad aderenza migliorata.

Acciaio FeB44k

La tensione di snervamento è stata desunta dai manuale d'uso comune dell'epoca di riferimento della struttura (Pagano 1973) e risulta:

$$\sigma_{a,f} = 2220 \frac{kg}{cm^2} \quad \text{Eq. 5.4}$$

L'analisi dei carichi e il progetto simulato della struttura per tensioni ammissibili sono riportati in Appendice A per evitare di appesantire troppo la trattazione e per dare la giusta attenzione agli obiettivi del caso di studio.

5.2.2 Analisi della capacità strutturale

Una volta condotto il progetto simulato si è arrivati ad una conoscenza adeguata dell'organismo strutturale dell'edificio e delle caratteristiche meccaniche dei materiali. Note tali proprietà della struttura è stato possibile passare alla fase di analisi della capacità strutturale dell'edificio

con l'ausilio dell'analisi statica non lineare. Tali analisi sono state condotte nel rispetto delle NTC 2008 [42] della Circolare n.617 [43] ed alcuni testi di riferimento [44] che per semplicità di trattazione sono riportate in Appendice B.

L'analisi statica non lineare (pushover) è stata condotta con l'obiettivo di risalire alle deficienze strutturali dell'edificio in questione in modo tale da poter definire le diverse strategie di miglioramento e/o adeguamento sismico.

A tal proposito sono state condotte sedici pushover per tenere conto delle diverse distribuzioni di forze, previste dalla normativa, e dell'eccentricità accidentale. Per ognuna delle pushover sono state condotte le verifiche di sicurezza degli elementi per risalire ai meccanismi duttili/fragili e di seguito sono stati ricavati gli indicatori di rischio $I_R = PGAC/PgAD$ per ognuno dei meccanismi. Per indicatore di rischio si intende il rapporto tra la $PGAC$, accelerazione massima su sito di riferimento che può essere sostenuta dall'edificio, e la $PgAD$, accelerazione massima orizzontale su sito di riferimento orizzontale che ha una probabilità di essere superata pari al 10% ($P_{Vr}=10\%$) in un tempo pari al periodo di riferimento dell'opera.

Il lettore interessato alla valutazione della vulnerabilità sismica della struttura può consultarla nell'Appendice B di questo testo.

Si precisa che, con riferimento alle attuali prescrizioni normative, sono stati considerati i valori di T_R compresi nell'intervallo $30\text{anni} \leq T_R \leq 2475$ anni; nei casi in cui il periodo di ritorno relativo alla $PGAC$, è risultato minore di 30 anni si è posto $T_{Rc} < 30$ anni, cui corrisponde un indicatore di rischio $I_R < 28\%$. Nel caso in cui si abbia $T_{Rc} = 30$ anni, infatti l'indice di rischio può determinarsi attraverso la seguente espressione:

$$I_{R_{SLV}} = \frac{PGAC(T_R = 30\text{anni})}{PGAD(T_R = 475\text{anni})} = \frac{0.047}{0.169} = 28\% \quad \text{Eq. 5.5}$$

Nella Figura 5.7 si riportano i valori degli indicatori di rischio minimi relativi alle sedici pushover in relazione ai meccanismi di crisi fragile/duttile.

E' possibile notare che la capacità della struttura è governata da meccanismi fragili i quali presentano un indicatore di rischio minore a quello determinato dai meccanismi di crisi duttili.

	Meccanismi fragili					Meccanismo duttile
	Rottura taglio pil EC8	Rottura taglio pil NTC08	Rottura taglio travi EC8	Rottura nodi compr.	Rottura nodi traz.	Deformazione
Poy- e- massa	31%	<28%	<28%	>100%	<28%	83%
Poy- e+ massa	35%	<28%	30%	>100%	<28%	77%
Poy+ e- massa	42%	<28%	<28%	>100%	<28%	83%
Poy+ e+ massa	42%	<28%	33%	>100%	<28%	76%
Poy- e- tagli	33%	<28%	<28%	>100%	<28%	95%
Poy- e+ tagli	40%	<28%	<28%	>100%	<28%	86%
Poy+ e- tagli	36%	<28%	<28%	>100%	<28%	90%
Poy+ e+ tagli	36%	<28%	31%	>100%	<28%	83%
Pox- e- massa	>100%	59%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox- e+ massa	>100%	60%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+ e- massa	>100%	60%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+ e+ massa	>100%	60%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox- e- modo	>100%	76%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox- e+ modo	>100%	76%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+ e- modo	>100%	68%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+ e+ modo	>100%	68%	>100%	>100%	<28%	100%
Minimo I _R	31%	<28%	<28%	<28%	<28%	76%

Tabella 5.1 Minimi rapporti di I_R per meccanismi fragili e duttili

Meccanismi di crisi duttile

In relazione ai meccanismi di crisi di tipo duttile, per raggiungimento in un qualsiasi elemento di una rotazione rispetto alla corda pari a $\theta=3/4\theta_u$, l'edificio presenta un indicatore di rischio pari ad I_R=76%.

Meccanismi di crisi fragile

In relazione a tale tipologia di meccanismo di crisi, dato dal raggiungimento della resistenza a taglio, per travi e pilastri, o crisi della biella diagonale per trazione nei nodi, l'edificio presenta un indicatore di rischio I_R<28%.

Il comportamento strutturale dell'edificio è fortemente condizionato dalla presenza di solai di area elevata che scaricano essenzialmente sulle travi emergenti presenti in direzione trasversale Y che comportano elevate sollecitazioni sulle travi stesse. Le crisi per taglio dei pilastri si hanno soprattutto in corrispondenza del vano scala per effetto della presenza delle travi di interpiano che condizionano il comportamento del pilastro che diventa tozzo. Tale tipologia di crisi è stata riscontrata anche sugli edifici di l'Aquila colpiti dal terremoto del 2009.



Figura 5.5 Meccanismi di collasso di colonne per edifici in c.a. colpiti dal terremoto dell'Aquila, (fonte Reluis 2009) [45]

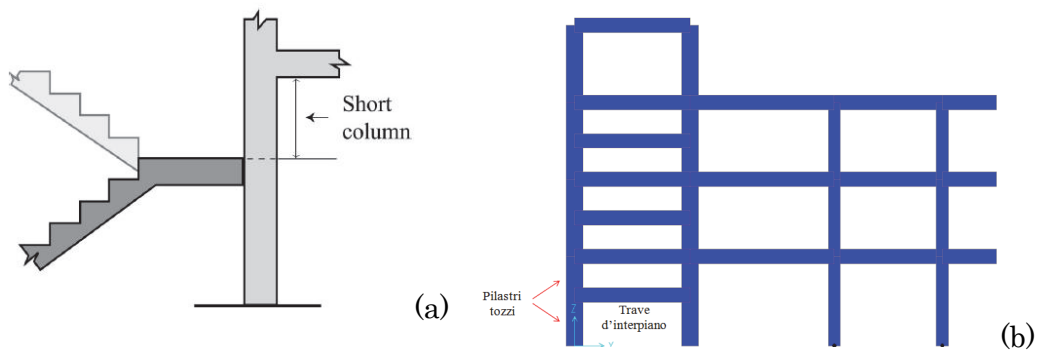


Figura 5.6 Schema di pilastro tozzo dovuto alla presenza della trave d'interpiano (a); telaio della struttura in esame con modellazione del pilastro tozzo (b)

Come è possibile notare dalla Figura 5.7, la capacità della struttura è governata dai meccanismi fragili in quanto la prima crisi duttile si manifesta ad un $I_R=76\%$ che risulta essere maggiore della soglia minima $I_R=60\%$ da attingere con interventi atti al miglioramento sismico previsto nella O.P.C.M. 3790 del 17/07/2009 [46] e relativi indirizzi.

Tale condizione permette, una volta risolte le crisi fragili della struttura, il raggiungimento di una condizione di miglioramento sismico. Nella Figura 5.7 si riporta il quadro delle crisi della struttura per un $I_R=76\%$.

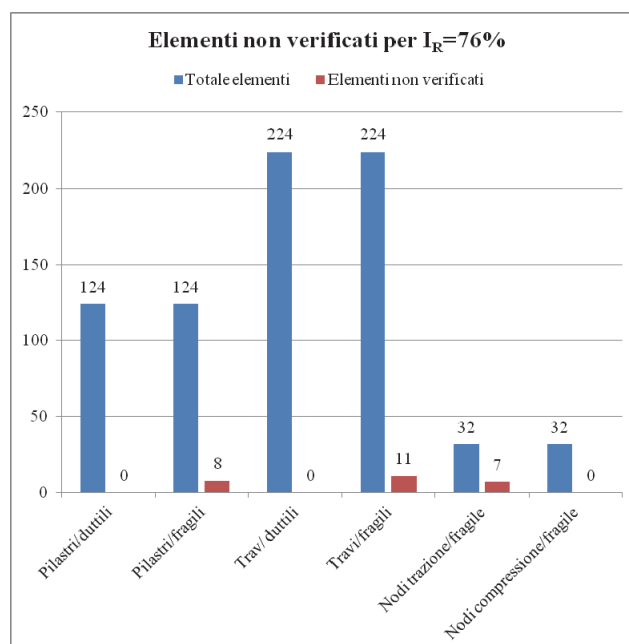


Figura 5.7 Quadro sintetico numero di elementi non verificati per meccanismi di rottura duttili/fragili per $I_R=76\%$

Da tale quadro delle crisi per raggiungere uno stato di **miglioramento sismico** è necessario intervenire mediante:

- incremento di capacità a taglio (8 pilastri e 11 travi);
- incremento della resistenza diagonale a trazione (7 nodi).

Per il raggiungimento di uno stato di **adeguamento sismico** della struttura è stato condotto l'involuppo delle crisi per le sedici pushover nei confronti di meccanismi di crisi duttile/fragile, con riferimento ad azioni sismiche che conducono ad un $I_R=100\%$.

Come prevedibile, il numero degli elementi non verificati risulta maggiore, rispetto al caso precedente per $I_R=76\%$, come riportato in Figura 5.8.

Da tale quadro delle crisi per raggiungere uno stato di **adeguamento sismico**, corrispondente ad un $I_R=100\%$, è necessario intervenire mediante:

- Incremento della capacità rotazionale (21 pilastri);
- Incremento della capacità a taglio (12 pilastri, 13 travi);

- Incremento della resistenza diagonale a trazione (17 nodi).

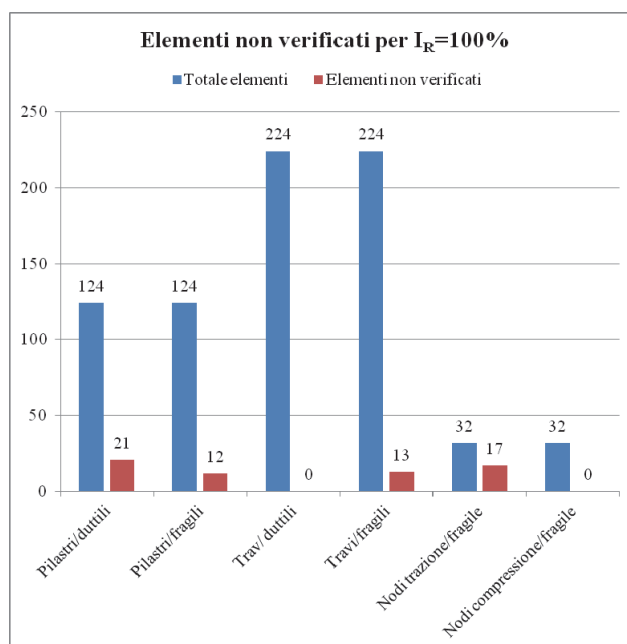


Figura 5.8 Quadro sintetico numero di elementi non verificati per meccanismi di rottura duttili/fragili per $I_R=100\%$

Le verifiche a taglio per travi e pilastri sono state condotte con l'Eurocodice 8 [47] [48], e si è riscontrata una netta diminuzione, tra un $I_R=76\%$ ed un $I_R=100\%$, di elementi non verificati rispetto alle NTC08, che comporta elevati vantaggi in termini economici dovuti ad un minor numero di interventi da realizzare per il miglioramento e/o adeguamento.

Nelle formule per la verifica a taglio secondo l'EC8, è stato considerato un valore di $\mu_{pl}=5$ potendo considerare, allo SLV, completamente degradata la resistenza a taglio delle sezioni.

5.3 STRATEGIE DI CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE

Note le crisi degli elementi strutturali, rilevate durante la fase di analisi della capacità strutturale dell'edificio, è possibile definire le diverse strategie di intervento mirate al rinforzo strutturale sia per il raggiungimento di un miglioramento sismico, sia per ottenere l'adeguamento sismico.

Si può dimostrare che, al soddisfacimento dello SLV, la legge che lega la capacità della struttura in termini di resistenza e quella in termini di spostamento ultimo è rappresentata graficamente da un'iperbole nel piano (S_a, S_d) . A tal proposito, detti F_e il taglio alla base che la struttura dovrebbe sopportare se avesse un comportamento indefinitamente elastico ed F_d il taglio alla base che la struttura dovrebbe sopportare con comportamento inelastico, essi sono legati tramite duttilità μ della struttura, come espresso dalla seguente relazione:

$$F_d = \frac{F_e}{\mu} \rightarrow F_d \mu = F_e \quad \text{Eq. 5.6}$$

Ed essendo:

$$F_e = m \cdot S_{ae}(T) = \text{cost} \rightarrow F_d \mu = \text{cost} \quad \text{Eq. 5.7}$$

Nel piano $(F_d; \mu)$, l' Eq. 5.7, rappresenta un'iperbole che può essere rappresentata anche nel piano (Capacità Resistente; Capacità Deformativa).

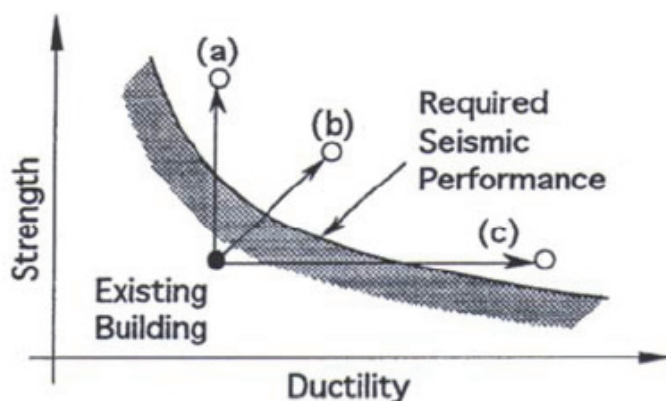


Figura 5.9 Rappresentazione della capacità di un edificio esistente del piano (Capacità Resistente; Capacità Deformativa)

In tale grafico, un edificio esistente che presenta delle deficienze in termini di caratteristiche di resistenza e di duttilità è rappresentato da un punto posto al di sotto dell'iperbole e quindi nel piano che rappresenta tutte le possibili condizioni statiche che risulterebbero non soddisfatte allo SLV.

Adeguare sismicamente un edificio, quindi, significa portare il punto che rappresenta l'edificio esistente al di sopra dell'iperbole, con un ragionevole margine di sicurezza e cioè nel piano in cui siano verificate le condizioni allo SLV.

Per fare ciò, non esiste una soluzione univoca e ciascuna strategia di adeguamento e/o miglioramento può comportare:

- un prevalente aumento della capacità resistente della struttura;
- un contemporaneo aumento della capacità resistente e deformativa della struttura;
- un esclusivo aumento della capacità deformativa della struttura;
- una riduzione della domanda sismica (isolamento sismico)

Le strategie di intervento individuate dalle NTC '08 (Cap.8.4) si differenziano come segue.

- Interventi di adeguamento atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalla norma.
- Interventi di miglioramento atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente pur senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza richiesti dalla norma.
- Riparazioni o interventi locali che interessano elementi isolati, e che comunque comportano miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

Nel presente lavoro si è scelto di sviluppare una strategia di intervento volta all'ottenimento di un miglioramento sismico, con lo scopo di incrementare la capacità strutturale fino all'indice di rischio corrispondente alla prima crisi duttile e quindi per un $I_R=76\%$. Successivamente si è deciso di sviluppare il progetto di adeguamento sismico della struttura mediante l'utilizzo di diverse tecniche di rinforzo sismico, per ottenere standard di sicurezza previsti dalla normativa per lo stato limite considerato (SLV).

Per il conseguimento del miglioramento sismico si è adottata un'unica tecnica di intervento, cioè l'utilizzo esclusivo di materiali compositi fibrorinforzati FRP per ottenere la risoluzione sia delle crisi a taglio di travi e pilastri mediante fasciatura che delle crisi per taglio trazione dei nodi mediante applicazione di rinforzi esterni quadriassiali

Per il conseguimento, invece, dell'adeguamento sismico, si è scelto di utilizzare tre tecniche diverse.

- Utilizzo esclusivo di materiali compositi fibrorinforzati FRP per ottenere un incremento della capacità deformativa mediante confinamento dei pilastri, risoluzione delle crisi a taglio di travi e

pilastrini mediante fasciatura, risoluzione delle crisi per taglio trazione dei nodi mediante applicazione di rinforzi esterni quadriassiali Figura 5.9(c).

- Inserimento di pareti sismoresistenti all'interno del organismo strutturale allo scopo di ottenere un prevalente aumento della capacità resistente strutturale, con utilizzo di FRP per la risoluzione delle crisi a taglio delle travi Figura 5.9(a).
- Incamiciatura in calcestruzzo armato per un piccolo numero di pilastrini per ottenere un incremento di capacità resistente a taglio dei pilastrini e utilizzo di FRP sia per la risoluzione delle crisi a taglio delle travi, che per ottenere un incremento della capacità deformativa della struttura mediante confinamento dei pilastrini Figura 5.9(b).

5.3.1 Miglioramento sismico con FRP

Come visto al § 5.2.2, per raggiungere una condizione di miglioramento sismico, pari ad un $I_R = 76\%$, è necessario risolvere le crisi fragili della struttura e quindi attuare interventi di rinforzo sismico per 8 pilastrini, 11 travi e 8 nodi.

La strategia di rinforzo sismico in FRP di elementi in c.a., in zona sismica, è finalizzato al conseguimento dei seguenti obiettivi:

- Incrementare la resistenza a flessione semplice o a pressoflessione mediante l'applicazione di compositi con fibre disposte nella direzione dell'asse dell'elemento;
- Incrementare la resistenza a taglio degli elementi mediante l'applicazione di FRP con le fibre disposte ortogonalmente all'asse dell'elemento e, in aggiunta anche in altre direzioni;
- Incrementare la duttilità delle sezioni terminali di travi e/o pilastrini mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
- Migliorare l'efficienza delle giunzioni per sovrapposizione, mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
- Impedire lo svergolamento delle barre longitudinali soggette a compressione mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
- Incrementare la resistenza a trazione dei pannelli di nodo trave-pilastrino mediante applicazione di fasce di FRP con le fibre disposte secondo le isostatiche di trazione.

Le prescrizioni normative di riferimento per la valutazione dei modelli di capacità per elementi rinforzati mediante FRP sono le NTC08 e la Circolare n.617/2009 che rimandano alle Istruzioni CNR-DT 200/04 [49]. Queste sono a loro volta riprese ed aggiornate secondo la nuova normativa attraverso le Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP approvata dall'Assemblea Generale Consiglio Superiori Lavori Pubblici il 24 luglio 2009 [50]. Sono di riferimento anche le Linee Guida per riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni [51].

Rinforzo a taglio dei pilastri con FRP

Per il rinforzo a taglio dei pilastri si è scelto un tessuto in carbonio unidirezionale MAPEWRAP C UNI-AX HM 300 g/m², e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Le specifiche tecniche del tessuto vengono riportate nella Figura 5.10.

MAPEWRAP C UNI-AX HM		
Grammatura (g/m²):	300	600
Massa volumica (kg/m³):	1.820	1.820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,329
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	164,8	329,6
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²):	4.410	4.410
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 700	> 1.400
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	390.000	390.000
Allungamento a rottura (%):	1,1	1,1

Figura 5.10 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)

Si riportano nella Tabella 5.2 i valori di resistenza a taglio prima e dopo l'intervento riferiti a tutti elementi su cui sono stati effettuati gli interventi.

Per il progetto dell'intervento, per ogni elemento in crisi, si sono considerati i valori maggiori del rapporto tra domanda, relativa ad una azione sismica che conduce ad un indice di rischio pari a $I_R=76\%$, e la capacità, valutata come già detto in precedenza considerando la formulazione della resistenza a taglio presente all'interno dell'EC8 considerando $\mu_{pl}=5$, tra le 16 analisi pushover condotte sulla nostra struttura

Elementi	Resistenza a taglio stato di fatto				Resistenza a taglio dopo il rinforzo					
	V_{Rd} EC8 [kg]	V_{sd} [kg]	verifica	D/C	strati	V_{rdf} [kg]	V_{Rd} [kg]	V_{sd} [kg]	verifica	D/C
PIL1-3	7857,8	18586,0	non verificato	2,37	2	11141,0	18998,8	18586,0	verificato	0,98
PIL1-7	7756,8	15128,1	non verificato	1,95	2	11141,0	18897,8	15128,1	verificato	0,80
PIL2-3	7558,7	7626,9	non verificato	1,01	1	6533,1	14091,7	7626,9	verificato	0,54
PIL1-14	9115,9	17766,7	non verificato	1,95	2	11141,0	20256,8	17766,7	verificato	0,88
PIL1-18	9240,9	14136,3	non verificato	1,53	1	6533,1	15774,0	14136,3	verificato	0,90
PIL2-7	7453,1	7628,0	non verificato	1,02	1	6533,1	13986,2	7628,0	verificato	0,55
PIL2-14	8809,4	9049,4	non verificato	1,03	1	6533,1	15342,5	9049,4	verificato	0,59
PIL2-18	8885,8	9724,9	non verificato	1,09	1	6533,1	15418,9	9724,9	verificato	0,63

Tabella 5.2 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e miglioramento

Rinforzo a taglio delle travi con FRP

L' incremento di resistenza a taglio delle estremità delle travi viene ottenuto mediante fasciatura ad U con tessuto in carbonio unidirezionale disposto con direzione delle fibre ortogonali all'asse della trave e con strisce poste in adiacenza.

La realizzazione di tale rinforzo funge anche da ancoraggio per il rinforzo con tessuto quadriassiale del pannello di nodo.

Per il rinforzo a taglio delle estremità delle travi si è scelto un tessuto in carbonio unidirezionale MAPEWRAP C UNI-AX HM 300 gr, e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Le specifiche tecniche del tessuto vengono riportate nella Figura 5.11:

MAPEWRAP C UNI-AX HM		
Grammatura (g/m²):	300	600
Massa volumica (kg/m³):	1.820	1.820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,329
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	164,8	329,6
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²):	4.410	4.410
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 700	> 1.400
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	390.000	390.000
Allungamento a rottura (%):	1,1	1,1

Figura 5.11 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)

Si riporta di seguito in Tabella 5.3 i valori di resistenza a taglio prima e dopo l'intervento riferite a tutti elementi su cui sono stati effettuati gli interventi.

Analogamente ai pilastri, per ogni elemento in crisi, si sono considerati i valori maggiori del rapporto tra domanda, relativa ad una azione sismica che conduce ad un indice di rischio pari a $I_R=75\%$, e la capacità, valutata

come già detto in precedenza considerando la formulazione della resistenza a taglio presente all'interno dell'EC8 considerando $\mu_{pl}=5$, tra le 16 analisi pushover condotte sulla nostra struttura.

elementi	Resistenza a taglio stato di fatto			D/C	strati	Resistenza a taglio dopo il rinforzo			verifica	D/C
	$V_{Rd,EC8}$ [kg]	V_{sd} [kg]	verifica			$V_{Rd,r}$ [kg]	V_{Rd} [kg]	V_{sd} [kg]		
T1-213	4381,6	7479,1	non verificato	1,71	1	3383,1	7764,7	7479,1	verificato	0,96
T1-617	4381,6	5699,8	non verificato	1,30	1	3383,1	7764,7	5699,8	verificato	0,73
T1-2332	8467,2	13346,5	non verificato	1,58	2	4637,7	13104,9	13346,5	verificato	0,97
T1-2433	8828,6	12768,3	non verificato	1,45	2	4637,7	13466,3	12768,3	verificato	0,95
T1-2534	8467,2	12612,4	non verificato	1,49	2	4637,7	13104,9	12612,4	verificato	0,96
T2-2332	8467,2	11941,7	non verificato	1,41	2	4637,7	13104,9	11941,7	verificato	0,91
T2-2433	8828,6	11966,5	non verificato	1,36	1	3383,1	12211,7	11966,5	verificato	0,98
T2-2534	8467,2	11851,1	non verificato	1,40	2	4637,7	13104,9	11851,1	verificato	0,90
T3-2332	8467,2	10153,2	non verificato	1,20	1	3383,1	11850,4	10153,2	verificato	0,86
T3-2433	8828,6	10375,1	non verificato	1,18	1	3383,1	12211,7	10375,1	verificato	0,85
T3-2534	8467,2	10299,9	non verificato	1,22	1	3383,1	11850,4	10299,9	verificato	0,87

Tabella 5.3 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e miglioramento

Rinforzo dei nodi con FRP

L'incremento di resistenza a taglio del pannello di nodo è conseguito mediante disposizione di tessuto quadriassiale in carbonio. Si fa riferimento alle verifiche di resistenza dei nodi trave-pilastro presenti nell'NTC, in cui la resistenza del nodo a seguito della fessurazione diagonale può essere garantita integralmente da staffe orizzontali, assenti in questo caso. È opportuno utilizzare un tessuto quadriassiale in quanto la formazione di fessure può verificarsi in qualsiasi direzione. In direzione orizzontale si ha l'azione combinata delle fibre disposte secondo la medesima direzione più le componenti orizzontali delle fibre disposte nelle due direzioni $\pm 45^\circ$.

Per quanto riguarda l'intervento previsto sulla struttura in oggetto si è valutato tra i nodi in crisi quello con il quantitativo di armatura inferiore maggiore, e su questo si è dimensionato l'intervento che, a vantaggio di sicurezza, è stato poi utilizzato anche su tutti gli altri nodi che hanno raggiunto la crisi per taglio trazione.

Per l'intervento di rinforzo si è scelto un tessuto in carbonio quadriassiale MAPEWRAP C QUADRI-AX 760 g/m², e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Le specifiche tecniche del tessuto vengono riportate nella Figura 5.12.

Mediante l'utilizzo di due strati di tessuto, il nodo risulta essere verificato.

MAPEWRAP C QUADRI-AX 760/30 E MAPEWRAP C QUADRI-AX 760/48	
Grammatura (g/m ²):	760
Spessore equivalente di tessuto secco:	0,106
Area resistente per unità di larghezza (mm ² /m):	106,1
Resistenza meccanica a trazione (MPa):	> 4800
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 500
Modulo elastico a trazione (GPa):	230
Allungamento a rottura (%):	2,1

Figura 5.12 Scheda tecnica MAPEWRAP C QUADRI-AX (Mapei S.P.A.)

5.3.2 Adeguamento sismico con FRP ($I_R=100\%$)

Mediante l'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati FRP, si è incrementata la capacità strutturale per garantire il conseguimento dei livelli di sicurezza previsti dalla vigente normativa nei confronti di una azione sismica che conduce ad un $I_R=100\%$.

Come rappresentato nel cap. 5.2.2 per raggiungere una condizione di adeguamento sismico è necessario intervenire incrementando la capacità rotazionale di 21 pilastri, incrementando la capacità a taglio di 12 pilastri e 13 travi ed infine incrementando la resistenza diagonale a trazione di 17 nodi.

Incremento della capacità rotazionale dei pilastri mediante confinamento con FRP

Per gli elementi/meccanismi duttili, la capacità è da intendersi in termini di deformazione ed è definita con riferimento alla rotazione rispetto alla corda θ della sezione di estremità dell'elemento valutata rispetto alla congiungente di tale sezione con l'ascissa di momento nullo posta ad una distanza pari alla luce di taglio $L_V=M/V$. Tale rotazione rispetto alla corda può essere incrementata mediante confinamento con FRP.

L'intervento di confinamento è stato effettuato mediante un tessuto in carbonio unidirezionale MAPEWRAP C UNI-AX HM 300 gr, e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Le specifiche tecniche del tessuto vengono riportate nella figura successiva:

MAPEWRAP C UNI-AX HM		
Grammatura (g/m²):	300	600
Massa volumica (kg/m³):	1.820	1.820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,329
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	164,8	329,6
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²):	4.410	4.410
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 700	> 1.400
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	390.000	390.000
Allungamento a rottura (%):	1,1	1,1

Figura 5.13 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)

Il progetto dell'intervento è stato svolto sul pilastro in crisi duttile con il rapporto domanda su capacità maggiore tra le 16 analisi di pushover. In accordo con la normativa vigente la capacità rotazionale rispetto alla corda in condizioni di Stato Limite di salvaguardia della vita (SLV) è stata valutata come aliquota della rotazione ultima come definito in Appendice B al paragrafo B.1.6, e cioè pari a:

$$\theta_{u,SLV} = 0.75 \theta_u$$

La domanda, $\theta_{d,SLV}$, invece, è relativa alla rotazione che si registra quando sulla struttura agisce un'azione sismica che conduce ad un $I_R=100\%$. Dopo aver verificato il rinforzo sul pilastro più sfavorito, a vantaggio di sicurezza, lo stesso rinforzo è stato applicato su tutti gli altri pilastri che hanno presentato una crisi duttile.

Nella Tabella 5.4 si riporta il valore della rotazione capace $\theta_{u,SLV}$, allo stato di fatto e dopo l'intervento di confinamento con relativo incremento di capacità rotazionale.

elemento	stato di fatto					adeguamento						
	ecu	$\theta_{d,SLV}$	$\theta_{u,SLV}$	D/C	verifica	strati	ecu	θ_u	$\theta_{u,SLV}$	$\theta_{d,SLV}$	D/C	verifica
PIL1-19	0,35%	0,00659	0,00870	1,32	non verificato	1	0,64%	0,02010	0,01508	0,00870	0,58	verificato

Tabella 5.4 Confronto rotazione capace tra stato di fatto e adeguamento

Rinforzo a taglio dei pilastri con FRP

Per incrementare la resistenza a taglio dei pilastri si è scelto di utilizzare una disposizione in avvolgimento con fibre ortogonali all'asse dei pilastri da rinforzare ($\beta=90^\circ$), con strisce poste in adiacenza il dunque il rapporto w_f/p_f può essere considerato unitario.

La scelta del materiale utilizzato per il rinforzo anche in questo caso è ricaduta su un tessuto in carbonio unidirezionale MAPEWRAP C UNI-AX HM 300 g/m², e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31.

Nella Figura 5.14 vengono riportate le specifiche tecniche del tessuto utilizzato.

MAPEWRAP C UNI-AX HM		
Grammatura (g/m²):	300	600
Massa volumica (kg/m³):	1.820	1.820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,329
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	164,8	329,6
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²):	4.410	4.410
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 700	> 1.400
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	390.000	390.000
Allungamento a rottura (%):	1,1	1,1

Figura 5.14 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)

Nella Tabella 5.5 vengono riportati i valori di resistenza a taglio prima e dopo l'intervento per ogni singolo elemento.

elementi	Resistenza a taglio stato					Resistenza a taglio dopo il rinforzo				
	V _{Rd} EC8 [kg]	V _{sd} [kg]	verifica	D/C	strati	V _{RdR} [kg]	V _{Rd} [kg]	V _{sd} [kg]	verifica	D/C
PIL1-3	7857,8	23377,9	crisi	2,98	3	14273,8	24100,9	23377,9	verificato	0,97
PIL1-7	7756,8	18935,6	crisi	2,44	3	14273,8	22030,7	18935,6	verificato	0,86
PIL2-3	7558,7	9118,7	crisi	1,21	1	6533,1	14091,7	9118,7	verificato	0,65
PIL2-7	7453,1	8248,3	crisi	1,11	1	6533,1	13986,2	8248,3	verificato	0,59
PIL1-14	9115,9	22016,6	crisi	2,42	3	14273,8	23389,7	22016,6	verificato	0,94
PIL1-18	9240,9	17611,2	crisi	1,91	3	14273,8	23514,7	17611,2	verificato	0,75
PIL2-14	8809,4	12442,7	crisi	1,41	1	6533,1	15342,5	12442,7	verificato	0,81
PIL2-18	8885,8	11481,1	crisi	1,29	1	6533,1	15418,9	11481,1	verificato	0,74
PIL3-14	7242,4	8141,9	crisi	1,12	1	6533,1	13775,4	8141,9	verificato	0,59
PIL3-18	7293,3	7409,3	crisi	1,02	1	6533,1	13826,4	7409,3	verificato	0,54
PIL3-3	6355,5	6971,9	crisi	1,10	1	6533,1	12888,6	6971,9	verificato	0,54
PIL3-7	6293,9	6938,3	crisi	1,10	1	6533,1	12827,0	6938,3	verificato	0,54

Tabella 5.5 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e adeguamento

Rinforzo a taglio delle estremità delle travi con FRP

L'incremento di resistenza a taglio delle estremità delle travi viene ottenuto mediante fasciatura ad U con tessuto in carbonio unidirezionale disposto con direzione delle fibre ortogonali all'asse della trave e con strisce

poste in adiacenza. Il progetto segue le norme e le linee guida già elencate nel paragrafo 5.3.1.

Anche in questo caso si è stato utilizzato un tessuto in carbonio unidirezionale MAPEWRAP C UNI-AX HM 300 g/m², e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Nella Figura 5.15 si riportano le specifiche tecniche del rinforzo utilizzato.

MAPEWRAP C UNI-AX HM		
Grammatura (g/m²):	300	600
Massa volumica (kg/m³):	1.820	1.820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,329
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	164,8	329,6
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²):	4.410	4.410
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 700	> 1.400
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	390.000	390.000
Allungamento a rottura (%):	1,1	1,1

Figura 5.15 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)

Di seguito di riporta la Tabella 5.6 dove vengono riportati i valori di resistenza a taglio prima e dopo l'intervento con le specifiche per ogni singolo intervento.

elementi	Resistenza a taglio stato				Resistenza a taglio dopo il rinforzo					
	V _{Rd} EC8 [kg]	V _{sd} [kg]	verifica	D/C	strati	V _{RdF} [kg]	V _{Rd} [kg]	V _{sd} [kg]	verifica	D/C
T1-213	4381,6	10228,2	crisi	2,33	2	5811,7	10248,7	10228,2	verificato	0,99
T1-617	4381,6	8245,1	crisi	1,88	1	4283,4	8665,0	8245,1	verificato	0,95
T1-2332	8467,2	14240,0	crisi	1,68	2	5811,7	14278,9	14240,0	verificato	0,99
T1-2433	8828,6	13527,1	crisi	1,53	2	5811,7	14640,3	13527,1	verificato	0,92
T1-2534	8467,2	13323,6	crisi	1,57	2	5811,7	14278,9	13323,6	verificato	0,93
T2-2332	8467,2	12199,7	crisi	1,44	1	4283,4	12750,6	12199,7	verificato	0,96
T2-2433	8828,6	12183,4	crisi	1,38	1	4283,4	13111,9	12183,4	verificato	0,93
T2-2534	8467,2	12040,5	crisi	1,42	1	4283,4	12750,6	12040,5	verificato	0,94
T3-2332	8467,2	10288,3	crisi	1,22	1	4283,4	12750,6	10288,3	verificato	0,81
T3-2433	8828,6	10485,8	crisi	1,19	1	4283,4	13111,9	10485,8	verificato	0,80
T3-2534	8467,2	10408,7	crisi	1,23	1	4283,4	12750,6	10408,7	verificato	0,82
T1-13B22	15107,5	15134,0	crisi	1,00	1	4283,4	19390,9	15134,0	verificato	0,78
T2-213	4381,6	6979,5	crisi	1,59	1	4283,4	8665,0	6979,5	verificato	0,81
T2-617	4381,6	5194,8	crisi	1,19	1	4283,4	8665,0	5194,8	verificato	0,60

Tabella 5.6 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e adeguamento

Rinforzo dei nodi con FRP

L'incremento di resistenza a taglio del pannello di nodo è stato effettuato mediante l'utilizzo di un tessuto quadriassiale in carbonio.

Per quanto riguarda l'intervento sviluppato sulla struttura in questione, è stato valutato, tra i nodi in crisi, quello con il rapporto domanda su capacità maggiore tra le 16 analisi pushover. Su tale nodo si è stato

dimensionato l'intervento che, a vantaggio di sicurezza, è stato poi utilizzato anche su tutti gli altri nodi che hanno raggiunto la crisi per taglio trazione.

Per l'intervento di rinforzo si è stato utilizzato un tessuto in carbonio quadriassiale MAPEWRAP C QUADRI-AX 760 g/m², e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Le specifiche tecniche del tessuto vengono riportate nella Figura 5.16 successiva.

MAPEWRAP C QUADRI-AX 760/30 E MAPEWRAP C QUADRI-AX 760/48	
Grammatura (g/m²):	760
Spessore equivalente di tessuto secco:	0,106
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	106,1
Resistenza meccanica a trazione (MPa):	> 4800
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 500
Modulo elastico a trazione (GPa):	230
Allungamento a rottura (%):	2,1

Figura 5.16 Scheda tecnica MAPEWRAP C QUADRI-AX (Mapei S.P.A.)

Mediante l'utilizzo di due strati di tessuto, il nodo risulta essere verificato.

5.3.3 Adeguamento con pareti sismoresistenti

Un altro intervento, alternativo all'utilizzo degli FRP, per il raggiungimento di una soglia di adeguamento sismico della struttura oggetto del caso di studio è l'inserimento di due pareti lungo tutta l'altezza dell'edificio. L'intervento si colloca tra le strategie atte ad incrementare la resistenza globale della struttura in quanto permette un notevole incremento della rigidezza dell'edificio, riducendo lo spostamento globale e le sollecitazioni sui telai. La valutazione del posizionamento dei nuovi setti deve essere ben ponderata, in quanto, possono verificarsi drastiche variazioni di rigidezza, sia in pianta che in elevazione, causando un peggioramento della risposta sismica dell'organismo strutturale. I criteri principali che hanno condizionato la scelta del posizionamento delle pareti sono principalmente un miglioramento della regolarità plano altimetrica, una perfetta interazione con gli elementi strutturali ed una logica funzionale degli spazi. A tal proposito, l'intervento consiste nell'inserimento di due pareti tra i due pilastri posti in corrispondenza dei vani scala in

direzione trasversale Y, dove sono presenti anche le travi di interpiano che determinano un comportamento tozzo dei pilastri stessi che di conseguenza attirano elevate sollecitazioni per effetto dell'elevata rigidità, come già approfondito nel capitolo 5.2.2. La soluzione proposta prevede l'inserimento delle pareti nella maglia strutturale esistente e l'incapsulamento dei pilastri nella parete di progetto in modo tale da sopperire alle carenze strutturali degli stessi.



Figura 5.17 Costruzione di parete all'interno della maglia strutturale

La soluzione scelta permette di estendere i nuovi elementi resistenti per tutta l'altezza dell'edificio, minimizzando l'impatto estetico.

Tutti gli elementi che si innestano nelle pareti di progetto quali, pilastri travi e solette devono garantire una completa collaborazione al sistema strutturale globale e tale aspetto viene curato con il dimensionamento di appositi connettori a taglio che possono essere anche gli stessi ferri di armatura delle pareti che vengono collegati mediante fori e successivamente riempiti di calcestruzzo.

Particolare attenzione è stata dedicata alle fondazioni, in quanto, il comportamento sismico delle pareti determina un notevole momento ribaltante in fondazione che potrebbe causare un sollevamento della stessa determinando una perdita di funzionalità delle pareti.

L'intervento è stato oggetto di modellazione al SAP2000 mediante l'utilizzo di elementi frame con dimensioni, in sezione ed in altezza, equivalenti alla parete da realizzare in modo tale garantire le caratteristiche geometriche ed inerziali della stessa. Il collegamento, dei frame della parete, con gli elementi esistenti è stato caratterizzato dall'utilizzo di link rigidi in modo tale da garantire la collaborazione tra il

nuovo elemento strutturale ed il modello iniziale. Le caratteristiche dei materiali utilizzati per la parete sono un calcestruzzo di tipo C25/30 e barre di acciaio ad aderenza migliorata di tipo B450C.

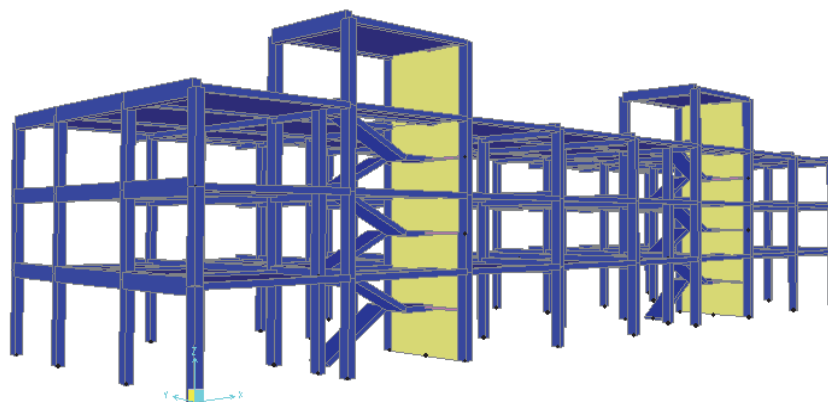


Figura 5.18 Modello SAP2000 tridimensionale con pareti sismoresistenti

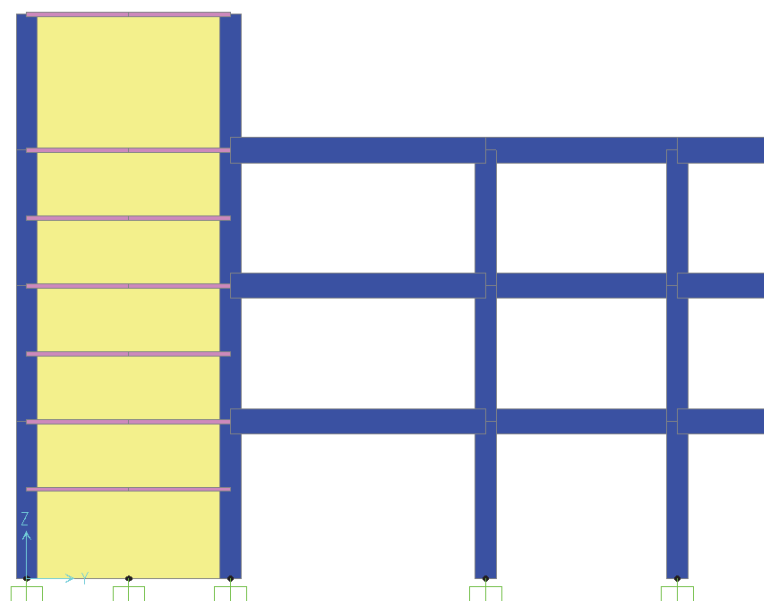


Figura 5.19 Modellazione della parete con collegamento mediante link rigidi alla struttura esistente

Come ben noto, l'inserimento di pareti nella maglia strutturale esistente, determina una variazione del comportamento globale della

struttura per cui, sia il progetto dell'intervento, che la verifica degli elementi resistenti devono essere eseguite sull'intera costruzione.

Il progetto dell'intervento è stato sviluppato mediante l'utilizzo di una dinamica modale con spettro di progetto ottenuto dallo spettro elastico ridotto del fattore di struttura q . In tale intervento di adeguamento il sistema strutturale resistente all'azione orizzontale è integralmente sostituito da nuovi elementi, pertanto, secondo le indicazioni fornite dalla Circ. 617/2009, è possibile adottare, in fase di progettazione, valori del fattore di struttura per le nuove costruzioni.

La tipologia strutturale è definita come struttura mista telaio-parete dove la resistenza alle azioni verticali è affidata prevalentemente ai telai, mentre, la resistenza alle azioni orizzontali è affidata in parte ai telai ed in parte alle pareti. Si prevede che più del 50% dell'azione orizzontale sia assorbita dalle pareti, pertanto la struttura si definisce *struttura mista equivalente a pareti*. Per tali strutture in classe di duttilità bassa, le NTC08 prevedono per q_0 l'utilizzo del valore $3,0 \alpha_w/\alpha_1$. Questo rapporto di sovra resistenza, per strutture miste equivalenti a pareti con regolarità in pianta, vale 1.2 pertanto il fattore di struttura da considerare, nella definizione dello spettro di progetto, risulta essere:

$$q = q_0 \cdot K_R = 3 \cdot 1,2 \cdot 0,8 = 2,88 \quad \text{Eq. 5.8}$$

Per prevenire il collasso delle strutture, a seguito della rottura delle pareti, i valori di q devono essere ulteriormente ridotti mediante il fattore K_w che per strutture miste equivalenti a pareti vale:

$$K_w = 0,5 \leq \frac{(1 + \alpha_0)}{3} \leq 1 \quad \text{Eq. 5.9}$$

Dove con α_0 dipende dal rapporto tra le altezze e larghezze delle pareti. Nel nostro caso K_w è maggiore di uno quindi si assume valore unitario.

Definito il fattore di struttura ed ottenuto lo spettro di progetto è stata condotta un'analisi dinamica lineare seguendo le prescrizioni delle NTC al paragrafo 7.3.3.1:

- determinazione dei modi di vibrare della costruzione (analisi modale);

- calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare individuati;
- combinazione di questi effetti.

Sono stati considerati tutti i modi con massa partecipante superiore al 5% e comunque un numero di modi la cui massa partecipante totale superiore all'85%.

Modo	T [s]	Massa partecipante		
		x	y	z
1	1,13	80,61%	0,00%	0,01%
2	0,40	2,74%	0,07%	0,00%
3	0,37	9,01%	0,09%	0,01%
4	0,34	0,00%	77,66%	0,01%
5	0,23	4,38%	0,00%	0,03%
6	0,17	0,00%	0,03%	0,27%
7	0,15	0,01%	0,04%	0,09%
8	0,15	2,07%	0,00%	0,00%
9	0,15	0,00%	0,07%	0,74%
10	0,13	0,00%	0,03%	0,20%
11	0,13	0,00%	0,00%	0,02%
12	0,13	0,00%	0,00%	0,00%

Tabella 5.7 Periodi dei 12 modi di vibrare e massa partecipante al modo

La combinazione dei modi, al fine del calcolo delle sollecitazioni e degli spostamenti è stata effettuata attraverso una combinazione quadratica completa (CQC). Una volta ottenute le sollecitazioni di progetto è stato condotto il progetto delle armature della parete come riportato nella Figura 5.20. Come detto precedentemente, l'inserimento di pareti nella maglia struttura esistente modifica il comportamento globale della struttura, per cui, la verifica degli elementi resistenti è stata eseguita mediante un'analisi statica non lineare definendo le nuove sedici combinazioni di carico. La non linearità della parete è stata prevista come prescritto nella Circolare n.617 §C8.7.2.5., in particolare, valutando la rotazione di snrvamento in funzione della corrispondente curvatura, e dei due contributi dovuti al taglio e allo scorrimento delle armature:

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_V}{3} + 0.002 \left(1 + 0.125 \frac{L_V}{h} \right) + 0.13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \text{Eq. 5.10}$$

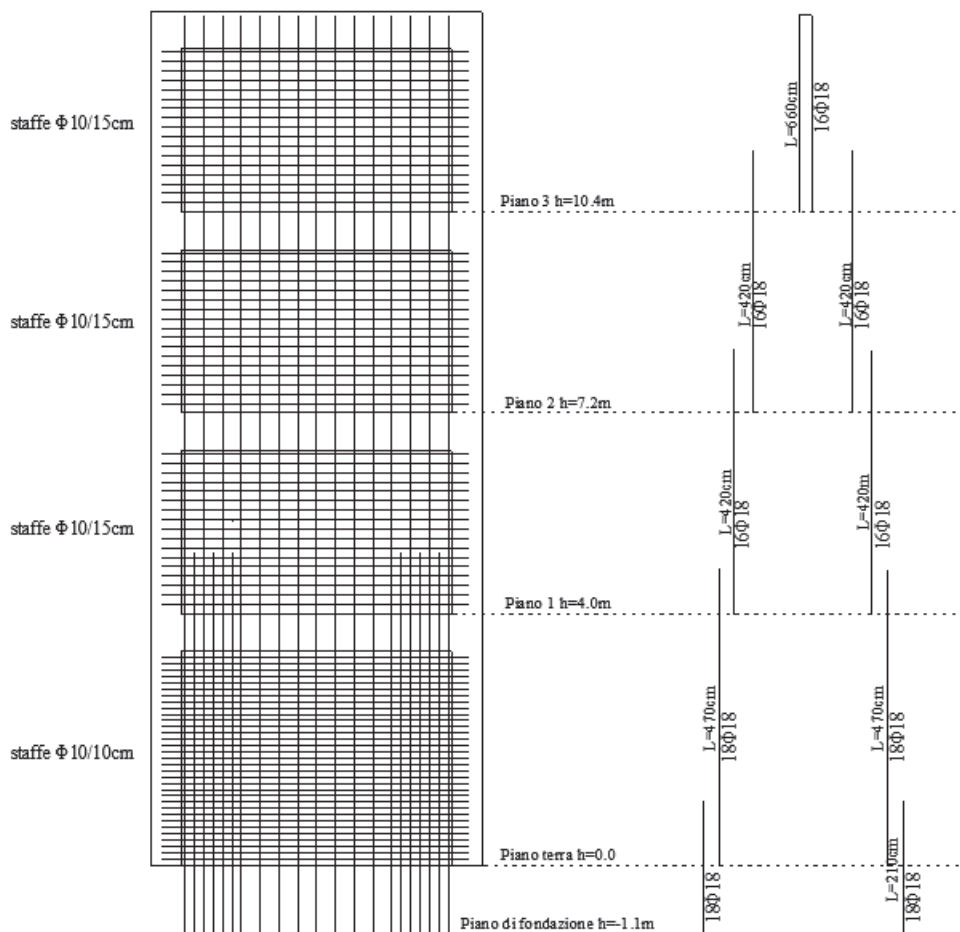


Figura 5.20 Distinta di armatura longitudinale e trasversali

Per semplicità di trattazione si riportano nelle tabelle di seguito solo i risultati della domanda di spostamento della struttura con i setti.

	Direzione X+,e+		Direzione X+,e-	
	Massa	Modo	Massa	Modo
T* [sec]	1,589	1,768	1,589	1,766
S _{de} (T*) [m]	0,009	0,010	0,009	0,010
d* _{max} [m]	0,090	0,101	0,090	0,100
d _{max} [m]	0,118	0,131	0,117	0,131

Tabella 5.8 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione X-,e-		Direzione X-,e+	
	Massa	Modo	Massa	Modo
T* [sec]	1,546	1,715	1,547	1,716
S _{de} (T*) [m]	0,009	0,010	0,009	0,010
d* _{max} [m]	0,088	0,098	0,088	0,098
d _{max} [m]	0,114	0,127	0,114	0,127

Tabella 5.9 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione X-,e-		Direzione X-,e+	
	Massa	Modo	Massa	Modo
T* [sec]	1,546	1,715	1,547	1,716
S _{de} (T*) [m]	0,009	0,010	0,009	0,010
d* _{max} [m]	0,088	0,098	0,088	0,098
d _{max} [m]	0,114	0,127	0,114	0,127

Tabella 5.10 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione Y-,e-		Direzione Y-,e+	
	Massa	Modo	Massa	Modo
T* [sec]	0,552	0,611	0,552	0,613
S _{de} (T*) [m]	0,003	0,004	0,003	0,004
d* _{max} [m]	0,031	0,035	0,031	0,035
d _{max} [m]	0,041	0,046	0,041	0,046

Tabella 5.11 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

Ottenuta la richiesta di spostamento d_{\max} si valuta quella deformativa per gli elementi/meccanismi duttili e quella statica per gli elementi/meccanismi fragili in corrispondenza della configurazione deformata dell'edificio definita da un valore dello spostamento del punto di controllo pari a d_{\max} . La verifica di sicurezza consiste pertanto nel confrontare le suddette richieste con le corrispondenti capacità da intendersi deformative per gli elementi/meccanismi duttili e resistenti per gli elementi/meccanismi fragili.

Le verifiche di sicurezza sono state condotte con le stesse formulazioni riportate in Appendice B al paragrafo B.1.5.

Di seguito si riporta il diagramma riassuntivo degli elementi non verificati ottenuto dall'involuppo delle crisi per le sedici pushover eseguite sulla struttura con pareti sismoresistenti.

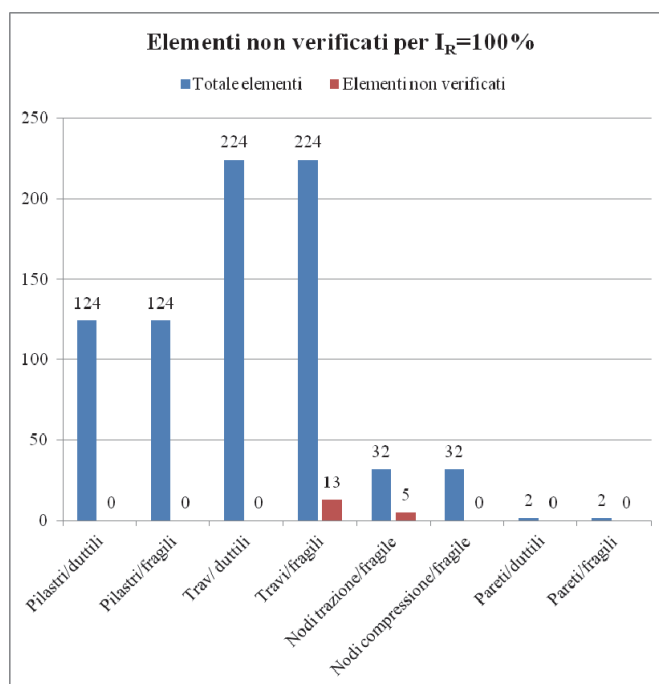


Figura 5.21 Quadro sintetico numero di elementi non verificati per meccanismi di rottura duttili/fragili per $I_R=100\%$

Da tale quadro sintetico delle crisi è possibile notare che l'inserimento delle pareti sismoresistenti è capace di eliminare tutte le crisi duttili/fragili relative ai pilastri, in quanto, le stesse attirano un'elevata aliquota delle sollecitazioni dovute al sisma a vantaggio dei pilastri che pertanto risultano verificati. Un altro effetto generato dalle pareti è la notevole diminuzione delle crisi dei nodi per trazione, mentre, il numero delle travi in crisi risulta invariato ma è stato registrato un notevole decremento del loro rapporto D/C. Per ottenere, quindi il completo adeguamento della struttura è stato necessario disporre anche i seguenti interventi:

- Incremento della capacità a taglio di 13 travi;
- Incremento della resistenza diagonale di trazione di 5 nodi.

Per l'incremento della resistenza a taglio delle estremità delle travi si è adottato un rinforzo in FRP mediante fasciatura ad U con tessuto in

carbonio unidirezionale disposto con direzione delle fibre ortogonali all'asse della trave e con strisce poste in adiacenza.

Si è scelto un tessuto in carbonio unidirezionale MAPEWRAP C UNI-AX HM 300 gr, e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Le specifiche tecniche del tessuto vengono riportate nella Figura 5.22.

MAPEWRAP C UNI-AX HM		
Grammatura (g/m²):	300	600
Massa volumica (kg/m³):	1.820	1.820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,329
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	164,8	329,6
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²):	4.410	4.410
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 700	> 1.400
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	390.000	390.000
Allungamento a rottura (%):	1,1	1,1

Figura 5.22 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)

Nella Tabella 5.12 si riportano i valori di resistenza a taglio prima e dopo l'intervento per ogni singolo elemento.

Elementi	Resistenza stato di fatto				Resistenza a taglio dopo il rinforzo					
	V _{Rd} EC8 [kg]	V _{Ed} [kg]	verifica	D/C	stati	V _{Rdf} [kg]	V _{Rd} [kg]	V _{Ed} [kg]	verifica	D/C
T1-617	4381,6	5483,4	non verificato	1,25	1	3383,1	7764,7	5483,4	verificato	0,71
T2-617	4381,6	4776,7	non verificato	1,09	1	3383,1	7764,7	4776,7	verificato	0,62
T2-213	4381,6	5076,1	non verificato	1,16	1	3383,1	7764,7	5076,1	verificato	0,65
T1-213	4381,6	6079,8	non verificato	1,39	1	3383,1	7764,7	6079,8	verificato	0,78
T1-2332	8467,2	12952,0	non verificato	1,53	2	4637,7	13104,9	12952,0	verificato	0,99
T1-2433	8828,6	12437,8	non verificato	1,41	2	4637,7	13466,3	12437,8	verificato	0,92
T1-2534	8467,2	12305,6	non verificato	1,45	2	4637,7	13104,9	12305,6	verificato	0,94
T2-2332	8467,2	12013,1	non verificato	1,42	2	4637,7	13104,9	12013,1	verificato	0,92
T2-2433	8828,6	12159,5	non verificato	1,38	1	3383,1	12211,7	12159,5	verificato	1,00
T2-2534	8467,2	12064,0	non verificato	1,42	2	4637,7	13104,9	12064,0	verificato	0,92
T3-2332	8467,2	10181,2	non verificato	1,20	1	3383,1	11850,4	10181,2	verificato	0,86
T3-2433	8828,6	10677,0	non verificato	1,21	1	3383,1	12211,7	10677,0	verificato	0,87
T3-2534	8467,2	10616,9	non verificato	1,25	1	3383,1	11850,4	10616,9	verificato	0,90

Tabella 5.12 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e adeguamento

Per quanto riguarda, invece, l'intervento effettuato sui nodi il dimensionamento è stato fatto per il nodo con il quantitativo di armatura inferiore maggiore, per cui, a vantaggio di sicurezza tale intervento è stato applicato anche sugli altri nodi. Per l'intervento di rinforzo si è scelto un tessuto in carbonio quadriassiale MAPEWRAP C QUADRI-AX 760 g/m², e

resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Le specifiche tecniche del tessuto vengono riportate nella Figura 5.23.

MAPEWRAP C QUADRI-AX 760/30 E MAPEWRAP C QUADRI-AX 760/48	
Grammatura (g/m ²):	760
Spessore equivalente di tessuto secco:	0,106
Area resistente per unità di larghezza (mm ² /m):	106,1
Resistenza meccanica a trazione (MPa):	> 4800
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 500
Modulo elastico a trazione (GPa):	230
Allungamento a rottura (%):	2,1

Figura 5.23 Scheda tecnica MAPEWRAP C QUADRI-AX (Mapei S.P.A.)

Mediante l'utilizzo di due strati di tessuto, il nodo risulta verificato.

5.3.4 Adeguamento sismico misto con incamiciatura in c.a. ed FRP

La strategia di adeguamento prevede l'utilizzo congiunto di incamiciatura in cemento armato e di materiali compositi fibrorinforzati. L'incamiciatura in c.a. incrementa la capacità resistente dell'elemento, in termini di momento e taglio attraverso nuovi dettagli strutturali, diminuisce la richiesta di spostamento, in quanto, aumentando la rigidezza degli elementi il periodo "T" della struttura diminuisce a fronte comunque di maggiori sollecitazioni.

Per questi motivi l'intervento di incamiciatura in c.a. deve essere ben ponderato oltre ad essere anche molto invasivo e di difficile applicazione per le travi, dove, anche in questo caso si è scelto di utilizzare gli FPR.

L'intervento di incamiciatura in c.a., come riportato nella Circolare n.617, è stato utilizzato per il conseguimento dei seguenti obiettivi:

- aumento della capacità portate verticale;
- aumento delle resistenza a flessione e/o a taglio;
- aumento della capacità deformativa;
- miglioramento dell'efficienza delle giunzioni per sovrapposizione.

Lo spessore dell'incamiciatura deve essere dimensionato in modo tale da permettere il posizionamento delle armature longitudinali e trasversali con un copriferro adeguato. Nel caso di intervento volto all'incremento della resistenza flessionale, le barre longitudinali devono attraversare il solaio

con apposite forature ed ancorate con adeguata staffatura alle estremità del pilastro. Nel caso, invece, di intervento per l'aumento della resistenza a taglio e deformabilità le barre longitudinali devono fermarsi a circa 10mm dal solaio.

Il progetto delle incamiciature in c.a. è stato condotto con l'ausilio di alcune ipotesi semplificative:

- l'elemento incamiciato si comporta in maniera monolitica, con piena aderenza tra il calcestruzzo vecchio e nuovo;
- si trascura che il carico assiale è applicato alla sola porzione preesistente dell'elemento, e si considera che esso agisca sull'intera sezione incamiciata;
- le proprietà meccaniche del calcestruzzo della camicia si considerano estese all'intera sezione se le differenze tra i due materiali non sono eccessive.

La scelta dei pilastri da ringrossare è stata fatta dopo un'accurata analisi delle crisi della struttura. Le crisi a taglio dei pilastri sono localizzate in corrispondenza del vano scala, in particolare, nei pilastri collegati alle travi di interpiano di appoggio del pianerottolo, nei cosiddetti "pilastri tozzi". L'intervento di ringrosso è stato previsto sulle quattro pilastrate che presentano le suddette caratteristiche, cioè quelle localizzate nel vano scala. Tale scelta ha comportato un incremento di rigidità, seppur minimo, della struttura, da cui ne è conseguito una leggera diminuzione del periodo della struttura T . La diminuzione del periodo ha generato una riduzione di richiesta di spostamento con parallelo aumento della richiesta in termini di sollecitazioni.

Tale diminuzione del periodo della struttura ha generato una diminuzione della richiesta di spostamento con parallelo aumento della richiesta in termini di sollecitazioni.

L'incamiciatura dei quattro pilastri ha conferito alla struttura un incremento di capacità in termini di resistenza e anche un incremento della capacità in termini di spostamento. Tuttavia la capacità strutturale in termini di spostamento, seppur incrementata, non soddisfa la richiesta allo SLV, per cui, è stato necessario ricorrere al confinamento di alcuni pilastri mediante FRP.

Per l'incremento di resistenza a taglio delle travi e dei nodi si sono utilizzate fasciature in FRP.

Inoltre non sono stati necessari interventi di adeguamento delle fondazioni.

Le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati per l'intervento di incamiciatura sono un calcestruzzo di tipo C25/30 ed un acciaio ad aderenza migliorata di tipo B450C.

Il progetto a taglio dei pilastri ringrossati è stato condotto seguendo l'iter proposto dalle NTC08 e richiamato in Appendice A. In particolare, è stato necessario utilizzare staffe ϕ 10 a due braccia con un passo delle stesse di 10 cm.

La verifica degli elementi resistenti è stata eseguita mediante un'analisi statica non lineare definendo le nuove sedici combinazioni di carico e seguendo la stessa procedura riportata in Appendice A.

Per semplicità di trattazione si riportano nelle tabelle di seguito solo i risultati della domanda di spostamento della struttura con la presenza di incamiciature in c.a.

	Direzione X+,e+		Direzione X+,e-	
	Massa	Modo	Massa	Modo
T* [sec]	1,805	2,007	1,805	2,007
S _{de} (T*) [m]	0,010	0,012	0,010	0,012
d* _{max} [m]	0,103	0,114	0,103	0,114
d _{max} [m]	0,133	0,147	0,133	0,147

Tabella 5.13 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione X-,e-		Direzione X-,e+	
	Massa	Modo	Massa	Modo
T* [sec]	1,792	1,996	1,829	1,999
S _{de} (T*) [m]	0,010	0,012	0,011	0,012
d* _{max} [m]	0,102	0,114	0,104	0,114
d _{max} [m]	0,132	0,147	0,134	0,147

Tabella 5.14 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione Y+,e+		Direzione Y+,e-	
	Massa	Taglio	Massa	Taglio
T* [sec]	0,904	0,994	0,921	0,915
S _{de} (T*) [m]	0,005	0,006	0,005	0,006
d* _{max} [m]	0,051	0,057	0,052	0,061
d _{max} [m]	0,065	0,072	0,066	0,077

Tabella 5.15 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione Y-,e-		Direzione Y-,e+	
	Massa	Taglio	Massa	Taglio
T* [sec]	0,822	0,910	0,786	0,878
S _{de} (T*) [m]	0,005	0,005	0,005	0,005
d* _{max} [m]	0,047	0,052	0,045	0,052
d _{max} [m]	0,059	0,066	0,057	0,066

Tabella 5.16 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

Ottenuta la richiesta di spostamento d_{max} si valuta quella deformativa per gli elementi/meccanismi duttili e quella statica per gli elementi/meccanismi fragili in corrispondenza della configurazione deformata dell'edificio definita da un valore dello spostamento del punto di controllo pari a d_{max} . La verifica di sicurezza consiste pertanto nel confrontare le suddette richieste con le corrispondenti capacità da intendersi deformative per gli elementi/meccanismi duttili e resistenti per gli elementi/meccanismi fragili.

Le verifiche di sicurezza sono state condotte con le stesse formulazioni riportate in Appendice B al paragrafo B.1.5.

Di seguito si riporta il diagramma riassuntivo degli elementi non verificati ottenuto dall'involuppo delle crisi per le sedici pushover eseguite sulla struttura con incamiciature in c.a.

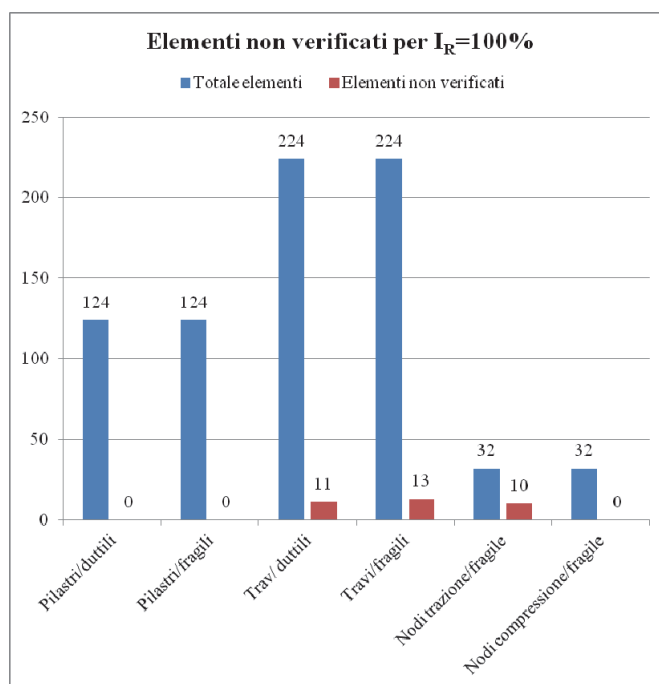


Figura 5.24 Quadro sintetico numero di elementi non verificati per meccanismi di rottura duttili/fragili per $I_R=100\%$

Da tale quadro sintetico delle crisi si evince che la realizzazione di incamicature in c.a. ha permesso di risolvere le crisi fragili relative agli elementi pilastri. Si è riscontrato anche una netta diminuzione delle crisi duttili allo SLV, in quanto, i ringrossi oltre a determinare una richiesta di spostamento minore, contribuiscono anche all'incremento della capacità deformativa dell'intera struttura. Il numero delle crisi delle travi risulta invariato rispetto alla condizione iniziale ma si nota un notevole decremento del rapporto D/C e del numero di nodi in crisi per taglio trazione.

Per il conseguimento del completo adeguamento della struttura è stato necessario effettuare anche i seguenti interventi:

- Incremento della capacità rotazionale di 11 pilastri;
- Incremento della capacità a taglio di 13 travi
- Incremento della resistenza diagonale di trazione di 10 nodi.

Tali interventi sono stati condotti mediante l'utilizzo di FRP. Per l'incremento della capacità rotazionale dei pilastri il progetto è stato svolto sul pilastro con il rapporto domanda/capacità maggiore tra le 16 analisi pushover. Il tessuto utilizzato per realizzare il confinamento è un tessuto in carbonio unidirezionale MAPEWRAP C UNI-AX HM 300 gr, e resina

epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31 come riportato nelle specifiche tecniche in

MAPEWRAP C UNI-AX HM		
Grammatura (g/m²):	300	600
Massa volumica (kg/m³):	1.820	1.820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,329
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	164,8	329,6
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²):	4.410	4.410
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 700	> 1.400
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	390.000	390.000
Allungamento a rottura (%):	1,1	1,1

Figura 5.25 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)

In accordo con la normativa vigente la capacità rotazionale rispetto alla corda in condizioni di Stato Limite della Vita (SLV) è stata valutata come aliquota della rotazione ultima definita precedentemente, e cioè pari a:

$$\theta_{u,SLV} = 0.75 \cdot \theta_u$$

La domanda, $\theta_{d,SLV}$, invece è relativa alla rotazione che si registra quando sulla struttura agisce un azione sismica che conduce ad un $I_R=100\%$. Dopo aver verificato il rinforzo sul pilastro sopra citato si è utilizzato, a vantaggio di sicurezza, lo stesso rinforzo su tutti gli altri pilastri che hanno presentato una crisi duttile. Nella tabella si riporta il valore della rotazione allo stato di fatto e dopo l'intervento di confinamento con il relativo incremento di capacità rotazionale.

elemento	stato di fatto					adeguamento						
	ecu	$\theta_{d,SLV}$	$\theta_{u,SLV}$	D/C	verifica	strati	eccu	θ_u	$\theta_{u,SLV}$	$\theta_{d,SLV}$	D/C	verifica
PIL1-19	0,35%	0,00659	0,00870	1,32	non verificato	1	0,64%	0,02010	0,01508	0,00870	0,58	verificato

Tabella 5.17 Confronto capacità rotazionale tra stato di fatto e adeguamento

Per quanto riguarda l'incremento a taglio delle estremità delle travi l'intervento è stato eseguito mediante fasciatura ad U con tessuto in carbonio unidirezionale MAPEWRAP C UNI-AX HM 300 gr, disposte con direzione delle fibre ortogonali all'asse della trave e con strisce in adiacenza, e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31.

MAPEWRAP C UNI-AX HM		
Grammatura (g/m²):	300	600
Massa volumica (kg/m³):	1.820	1.820
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,329
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	164,8	329,6
Resistenza meccanica a trazione (N/mm²):	4.410	4.410
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 700	> 1.400
Modulo elastico a trazione (N/mm²):	390.000	390.000
Allungamento a rottura (%):	1,1	1,1

Figura 5.26 Scheda tecnica MAPEWRAP C UNI-AX HM (Mapei S.P.A.)

Si riporta nella Tabella 5.18 i valori di resistenza a taglio prima e dopo l'intervento con le specifiche per ogni singolo intervento:

Elementi	V _{Rd} EC8 [kg]	V _{Ed} [kg]	verifica	D/C	strati	V _{RdR} [kg]	V _{Rd} [kg]	V _{Ed} [kg]	verifica	D/C
T1-213	4381,6	9452,7	non verificato	2,16	2	5811,7	10193,3	9452,7	verificato	0,93
T1-617	4381,6	7546,4	non verificato	1,72	1	4283,4	8665,0	7546,4	verificato	0,87
T1-2332	8467,2	14081,6	non verificato	1,66	2	5811,7	14278,9	14081,6	verificato	0,99
T1-2433	8828,6	13351,4	non verificato	1,51	2	5811,7	14640,3	13351,4	verificato	0,91
T1-2534	8467,2	13152,3	non verificato	1,55	2	5811,7	14278,9	13152,3	verificato	0,92
T2-2332	8467,2	12195,9	non verificato	1,44	1	4283,4	12750,6	12195,9	verificato	0,96
T2-2433	8828,6	12245,6	non verificato	1,39	1	4283,4	13111,9	12245,6	verificato	0,93
T2-2534	8467,2	12115,6	non verificato	1,43	1	4283,4	12750,6	12115,6	verificato	0,95
T3-2332	8467,2	9944,7	non verificato	1,17	1	4283,4	12750,6	9944,7	verificato	0,78
T3-2433	8828,6	9246,9	non verificato	1,05	1	4283,4	13111,9	9246,9	verificato	0,71
T3-2534	8467,2	9311,3	non verificato	1,10	1	4283,4	12750,6	9311,3	verificato	0,73
T1-17B26	15107,5	15129,2	non verificato	1,00	1	4283,4	19390,9	15129,2	verificato	0,78
T2-213	4381,6	4443,7	non verificato	1,01	1	4283,4	8665,0	4443,7	verificato	0,51
T2-617	4381,6	5621,5	non verificato	1,28	1	4283,4	8665,0	5621,5	verificato	0,65

Tabella 5.18 Confronto resistenza a taglio tra stato di fatto e adeguamento

Per quanto riguarda, invece, l'intervento effettuato sui nodi il dimensionamento è stato fatto per il nodo con il quantitativo di armatura inferiore maggiore, per cui, a vantaggio di sicurezza tale intervento è stato applicato anche sugli altri nodi. Per l'intervento di rinforzo si è scelto un tessuto in carbonio quadriassiale MAPEWRAP C QUADRI-AX 760 g/m², e resina epossidica per l'impregnazione con sistema a secco MAPEWRAP 31. Le specifiche tecniche del tessuto vengono riportate nella Figura 5.27.

Mediante l'utilizzo di due strati di tessuto, il nodo risulta essere verificato.

MAPEWRAP C QUADRI-AX 760/30 E MAPEWRAP C QUADRI-AX 760/48	
Grammatura (g/m²):	760
Spessore equivalente di tessuto secco:	0,106
Area resistente per unità di larghezza (mm²/m):	106,1
Resistenza meccanica a trazione (MPa):	> 4800
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 500
Modulo elastico a trazione (GPa):	230
Allungamento a rottura (%):	2,1

Figura 5.27 Scheda tecnica MAPEWRAP C QUADRI-AX (Mapei S.P.A.)

5.4 LCA DELLE STRATEGIE DI CONSOLIDAMENTO

Nel presente capitolo si affronta la valutazione degli impatti ambientali, mediante l'utilizzo della metodologia LCA, delle diverse tecniche di rinforzo sismico utilizzate sia per ottenere il miglioramento sismico della struttura che del suo adeguamento. Per il raggiungimento di tali obiettivi sono state applicate le seguenti tecniche.

- Intervento esclusivo con l'utilizzo di FRP.
- Inserimento di pareti sismoresistenti.
- Utilizzo combinato di incamiciatura in c.a.

Lo studio si è focalizzato sulla valutazione delle performance ambientali delle singole tecniche di rinforzo e consecutivamente è stata condotta un'analisi comparativa delle stesse in modo da poter riconoscere la soluzione con il più basso impatto ambientale.

5.4.1 Definizione degli obiettivi (Goal and scope definition)

L'obiettivo del caso di studio è quello di valutare l'impatto ambientale, mediante l'approccio LCA, di tre tecniche di adeguamento sismico: a) intervento con esclusivo uso di FRP; b) inserimento di pareti sismoresistenti in c.a.; c) uso combinato di incamiciatura in cemento armato ed FRP.

Al fine di eseguire analisi di LCA di tipo comparativo delle diverse tecniche le stesse sono state applicate alla struttura per ottenere la stessa performance strutturale, definendo in tal modo l'unità funzionale dell'analisi. In particolare, le diverse tecniche di rinforzo sismico sono state progettate per ottenere lo stesso incremento di capacità strutturale e quindi

di resistere ad un'azione sismica corrispondente ad un indice di rischio $I_R=100\%$, condizione per garantire l'adeguamento sismico della struttura.

Le analisi di LCA delle singole tecniche sono state condotte considerando tutte le fasi previste da un approccio “dalla culla al cancello”, e quindi: i) estrazione delle materie prime, ii) produzione, iii) fase di preparazione dell'intervento ed iv) installazione del rinforzo.

Per quanto riguarda la prima strategia di intervento, utilizzo esclusivo di FRP, l'analisi di impatto ambientale è stata sviluppata per un m^2 di intervento. Ottenuto l'impatto ambientale di un m^2 di rinforzo è immediato risalire, dal progetto di consolidamento della struttura, ai m^2 necessari per il conseguimento dell'adeguamento sismico. Con semplici operazioni di moltiplicazione è stato possibile risalire all'impatto ambientale dell'intervento sull'intera struttura.

Per quanto riguarda la strategia di intervento che ha previsto l'inserimento di pareti sismoresistenti in c.a. è stato necessario ipotizzare un intervento in fondazione, poiché, il loro comportamento sismico determina un notevole momento ribaltante che può causare un potenziale sollevamento o oscillazione della fondazione e quindi una perdita di funzionalità della parete.

E' stato, dunque, ipotizzato un intervento di ringrosso della trave rovescia di fondazione che viene dimensionato per completezza dell'analisi di LCA.

Il sistema di fondazioni della struttura esistente è stato ipotizzato, nel rispetto delle usanze costruttive dell'epoca, come travi T rovesce di altezza 90 cm e larghezza 80 cm. L'intervento in fondazione consiste nell'aumento della loro sezione a T di dimensioni pari a 110 x 110 cm, mentre, la quantità di armatura è stata valutata come il 4% della sezione di calcestruzzo. La fase di realizzazione di tale intervento in fondazione prevede operazioni di scavo e di messa a nudo della fondazione in modo tale da permettere il posizionamento delle barre di armatura, delle casseformi e per eseguire il getto di calcestruzzo. L'intervento, come visto nel § 5.3.3, prevede l'inserimento di due pareti identiche per cui l'analisi LCA è stata condotta per la singola parete considerando anche l'intervento in fondazione. In questo modo si è ottenuto l'impatto ambientale del singolo elemento che viene moltiplicato per il numero delle pareti inserite per ottenere l'impatto ambientale dell'intervento globale. Per ottenere l'adeguamento della struttura è stato necessario anche dell'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati per la risoluzione delle crisi fragili delle travi e dei nodi,

dunque si valuta l'impatto ambientale per m² di intervento e lo si moltiplica per il numero di m² necessari per il conseguimento dei predefiniti standard di capacità strutturale. A questo punto è banale ottenere l'impatto ambientale connesso all'adeguamento dell'intera struttura per un I_R=100%.

La terza strategia utilizzata consiste nell'utilizzo congiunto di incamiciatura in cemento armato di 4 pilastrate e dell'utilizzo di FRP per l'incremento della capacità deformativa dei pilastri e per il rinforzo a taglio di travi e nodi. Anche in questo caso è stato necessario prevedere un intervento di ringrosso per le travi di fondazione. L'intervento consiste nell'aumento della sezione delle travi di fondazioni alla base dei pilastri ringrossati fino ad una dimensione di 90 x 90 cm, mentre, la quantità di armatura viene valutata come il 4% della sezione di calcestruzzo. L'analisi di impatto ambientale è stata condotta per il ringrosso di una singola pilastrata, considerando anche l'intervento di ringrosso della fondazione, e consecutivamente esteso numero complessivo delle pilastrate ringrossate. La valutazione dell'impatto connesso all'utilizzo di FRP, necessario per il raggiungimento dell'adeguamento sismico della struttura, è stata condotta in analogia a quanto descritto per l'intervento di pareti sismoresistenti. Noti gli impatti dei ringrossi e dell'FRP è possibile valutare l'impatto connesso all'adeguamento strutturale per un I_R=100%.

Per le analisi di LCA sono state considerate le seguenti fasi:

- Produzione del materiale: tale fase include l'estrazione di materie prime ed il processo di produzione dei materiali usati nelle tecniche di adeguamento;
- Preparazione del substrato dove verrà applicato il rinforzo;
- Installazione del rinforzo.

Di seguito si descrivono nel dettaglio le fasi considerate per le singole strategie di rinforzo sismico:

Rinforzo con FRP

1. Produzione dei materiali:
 - Fibre di carbonio;
 - Processo di tessitura;
 - Resina epossidica
2. Fase di preparazione:
 - Rimozione dell'intonaco;
 - Rimozione delle tamponature che convergono nel pilastro;
 - Rimozione del calcestruzzo ammalorato dalla superficie del pilastro;

- Pulitura delle armature per eliminare eventuali zone ammalorate;
- Trattamento con malta cementizia anticorrosiva delle barre di armatura per ridurre il pericolo di ossidazione delle stesse;
- Ripristino del calcestruzzo rimosso dalla superficie del pilastro;
- Trasporto materiale demolito.

3. Fase di installazione

- Applicazione di uno strato di Primer sulla superficie del pilastro;
- Applicazione di uno strato di resina epossidica per garantire l'incollaggio del tessuto di carbonio utilizzato per il rinforzo;
- Applicazione del tessuto in carbonio;
- Applicazione di un ulteriore strato di resina epossidica;
- Trasporto del materiale da costruzione;
- Ripristino delle tamponature.

Realizzazione parete sismoresistente

1. Produzione dei materiali:

- Calcestruzzo C25/30
- Acciaio B450C.

2. Fase di preparazione:

- Rimozione del solaio al piano terra;
- Rimozione tamponature intercettate dal nuovo setto;
- Scavi fino alla quota della fondazione per la messa a nudo delle stesse;
- Trasporto del materiale demolito.

3. Fase di installazione:

- Posizionamento armature longitudinali e trasversali per il rinforzo della fondazione;
- Esecuzione del getto del ringrosso della fondazione;
- Posizionamento armature longitudinali e trasversali della parete;
- Esecuzione del getto della parete;
- Ripristino del solaio a piano terra;
- Trasporto del materiale da costruzione.

Ringrosso del pilastro

1. Produzione dei materiali:

- Calcestruzzo C25/30;
- Acciaio B450C.

2. Fase di preparazione:

- Rimozione dell'intonaco;
- Rimozione del copriferro di calcestruzzo;
- Rimozione delle tamponature che convergono nel pilastro;
- Scappellatura della superficie;
- Correzione di eventuali difetti dell'armatura;
- Perforazione della fondazione per il passaggio delle armature longitudinali;
- Rimozione del solaio al piano terra;
- Scavi per messa a nudo fondazioni;
- Trasporto del materiale demolito.

Nelle figure di seguito si riportano schematicamente i confini del sistema per ciascuna delle strategie considerate.

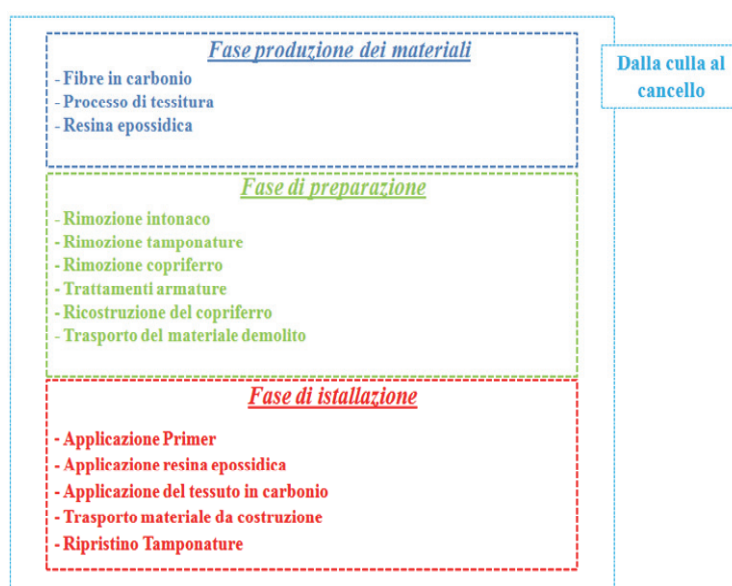


Figura 5.28 Confini del sistema C-FRP

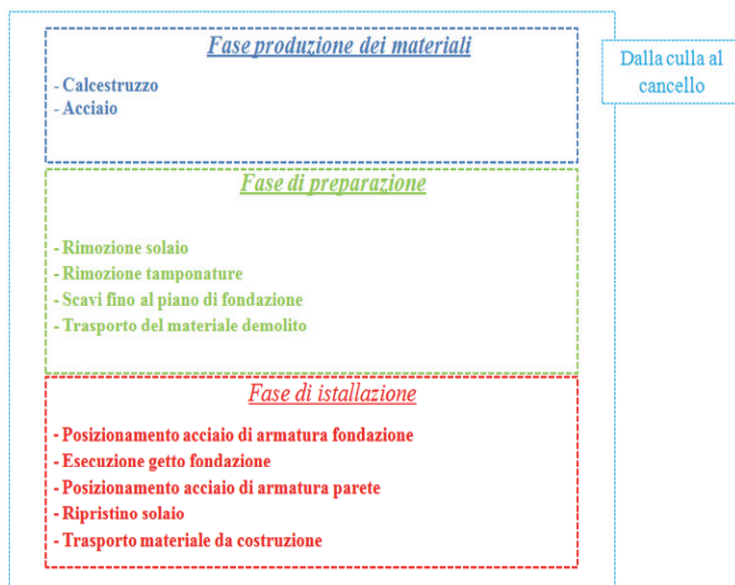


Figura 5.29 Confini del sistema parete in c.a.

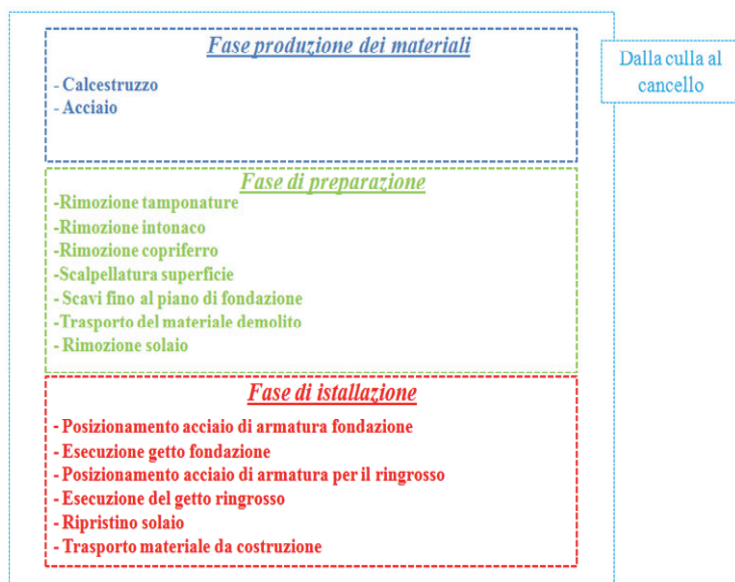


Figura 5.30 Confini del sistema ringrosso in c.a.

5.4.2 Inventario (Inventory Analysis)

Nel presente caso di studio sono stati utilizzati per l'analisi di inventario sia i dati primari che i dati secondari. I dati primari sono stati utilizzati per

caratterizzare l'acciaio (armature trasversali e armature longitudinali) e l'FRP in carbonio (schede tecniche Mapei S.P.A.).

I dati secondare sono stati ricavati dal database Ecoinvent e IDEMAT. Nelle tabelle di seguito si riportano tutti i dati e le quantità di energia/materiali usati per ciascuna fase delle singole strategie di consolidamento utilizzate nel progetto di adeguamento sismico della struttura.

Inventario per la realizzazione di 1 m² di rinforzo in FRP in carbonio

Fase produzione del materiale				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
fibre in carbonio	Carbon fiber	IDEMAT	kg	2,4
processo di produzione	tessitura	Ecoinvent	kg	2,4
impregnazione	resina epossidica	Ecoinvent	kg	1,1

Tabella 5.19 Dati di inventario per la fase produzione materiali per un m² di rinforzo

Fase di preparazione				
Input				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
Rimozione intonaco	elettricità	Ecoinvent	kwh	0,1083
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	0,29
Rimozione copriferro	trasporto a centro riciclo	Ecoinvent	tkm	0,088
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	0,44
	elettricità	Ecoinvent	kwh	0,1083
trattamento armature	malta cementizia	Ecoinvent	kg	0,084
rimozione tamponature	elettricità	Ecoinvent	kwh	0,0217
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	48,9
Ripristino copriferro	calcestruzzo	Ecoinvent	m ³	0,02
Output				
produzione rifiuti	laterizi da tamponatura	Ecoinvent	kg	192
	materiale inerte	Ecoinvent	kg	36,5
materiale riciclato	materiale inerte	Ecoinvent	kg	36,5

Tabella 5.20 Dati di inventario per la fase di preparazione per un m² di rinforzo

Fase di applicazione				
Input				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
Applicazione Primer	resina epossidica	Ecoinvent	kg	1,7
Ripristino tamponaure	laterizi	Ecoinvent	kg	192
	malta cementizia	Ecoinvent	kg	10
Aplicazione del rinforzo	C-FRP	analisi	m ²	1

Tabella 5.21 Dati di inventario per la fase di applicazione per un m² di rinforzo

Inventario per la realizzazione di una singola parete

Fase produzione del materiale				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
Calcestruzzo	Calcestruzzo	Ecoinvent	m ³	49,76
Acciaio	Acciaio	Ecoinvent	kg	3150,5

Tabella 5.22 Dati di inventario per la fase produzione materiali per la singola parete

Fase di preparazione				
Input				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
Rimozione solaio	elettricità	Ecoinvent	kwh	0,65
	trasporto a centro riciclo	Ecoinvent	tkm	11,02
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	55,12
rimozione tamponature	elettricità	Ecoinvent	kwh	1,3
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	200,58
Output				
produzione rifiuti	laterizi da tamponatura	Ecoinvent	kg	4912,3
	materiale inerte	Ecoinvent	kg	2756
materile riciclato	materiale inerte	Ecoinvent	kg	2756

Tabella 5.23 Dati di inventario per la fase di preparazione per la singola parete

Fase di applicazione				
Input				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
Getto calcestruzzo	elettricità	Ecoinvent	kwh	44
Ripristino solaio	laterizi	Ecoinvent	kg	680
	calcestruzzo	Ecoinvent	m ³	0,45
	acciaio	Ecoinvent	kg	14,7
Trasporto materiali	trasporto al cantiere	Ecoinvent	tkm	424,6

Tabella 5.24 Dati di inventario per la fase di applicazione per la singola parete

Inventario per la realizzazione di una singola pilastrata

Fase produzione del materiale				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
Calcestruzzo	Calcestruzzo	Ecoinvent	m ³	3,63
Acciaio	Acciaio	Ecoinvent	kg	514,75

Tabella 5.25 Dati di inventario per la fase produzione materiali per la singola pilastrata

Fase di preparazione				
Input				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
Rimozione intonaco	elettricità	Ecoinvent	kwh	5,2
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	571,2
Rimozione copriferro	trasporto a centro riciclo	Ecoinvent	tkm	2,85
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	14,28
	elettricità	Ecoinvent	kwh	5,2
Scalpellatura superficie	trasporto a centro riciclo	Ecoinvent	tkm	0,7
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	3,5
	elettricità	Ecoinvent	kwh	2,6
Rimozione solaio	elettricità	Ecoinvent	kwh	0,43
	trasporto a centro riciclo	Ecoinvent	tkm	1,05
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	5,28
rimozione tamponature	elettricità	Ecoinvent	kwh	1,95
	trasporto a discarica	Ecoinvent	tkm	68,544
Output				
produzione rifiuti	laterizi da tamponatura	Ecoinvent	kg	3427
	materiale inerte	Ecoinvent	kg	1320,5
materiale riciclato	materiale inerte	Ecoinvent	kg	1320,5

Tabella 5.26 Dati di inventario per la fase di preparazione per la singola pilastrata

Fase di applicazione				
Input				
Materiali/ processo	dati	fonte	unità	quantità
Getto calcestruzzo	elettricità	Ecoinvent	kwh	3,63
Ripristino solaio	laterizi	Ecoinvent	kg	136
	calcestruzzo	Ecoinvent	m ³	0,09
	acciaio	Ecoinvent	kg	2,9
Trasporto materiali	trasporto al cantiere	Ecoinvent	tkm	32,2
Ripristino tamponaure	laterizi	Ecoinvent	kg	3427
	malta cementizia	Ecoinvent	kg	100

Tabella 5.27 Dati di inventario per la fase di applicazione per la singola pilastrata

5.4.3 Analisi di impatto ambientale (Impact Assessment)

Le analisi di impatto ambientale sono state condotte con il metodo Impact2000+ ed i risultati vengono presentati in termini di “End point category” o categorie di danno (Human health, Ecosystem quality, Climate change e Resouces).

I primi risultati, mostrati in Figura 5.31, fanno riferimento agli impatti ambientali associati ad un m² di rinforzo in FRP in carbonio. E’ possibile notare, da tali risultati, che tra le diverse fasi analizzate quella della produzione dei materiali pesa in maniera maggiore su tre dei quattro indicatori utilizzati.

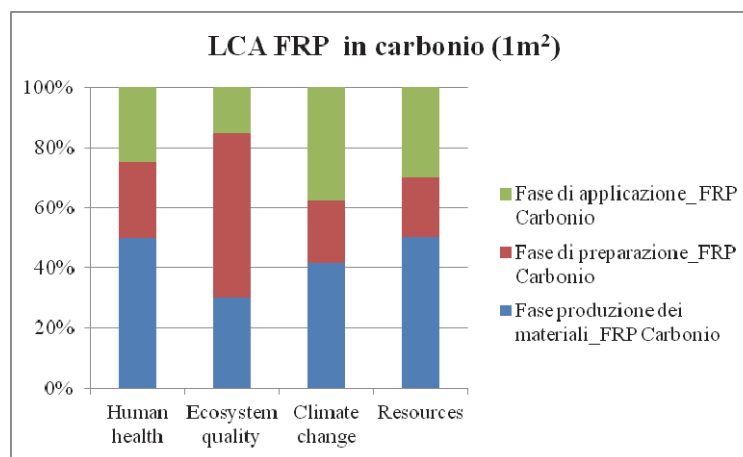


Figura 5.31 Risultati LCA FRP in carbonio (1 m²)

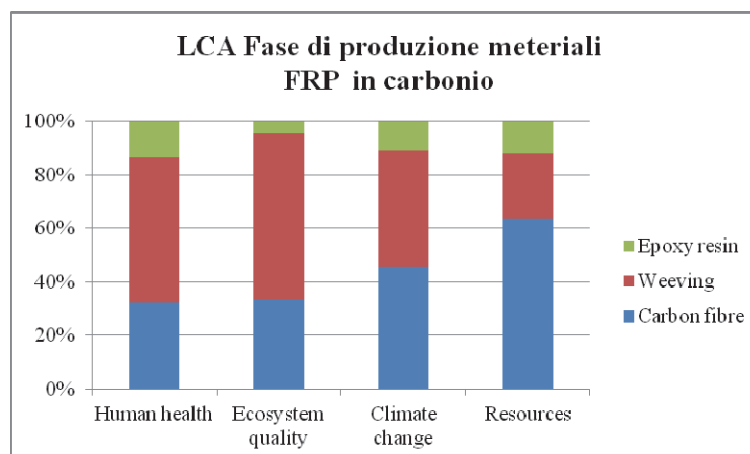


Figura 5.32 Risultati LCA fase produzione materiali FRP in carbonio (1 m²)

Analizzando, quindi, l'impatto delle singole fasi di produzione dei materiali per il rinforzo in FRP in carbonio è possibile stabilire che il processo di fabbricazione del tessuto, il processo di tessitura, presenta le prestazioni ambientali peggiori per tre dei quattro indicatori, come si evince in Figura 5.32. Anche nel caso della valutazione degli impatti ambientali relativi alla realizzazione della parete in calcestruzzo armato, la fase di produzione dei materiali, incide in maniera prevalente sull'impatto globale dell'intervento. L'impatto associato alla fase di produzione dei materiali, come mostrato in Figura 5.33, presenta valori che superano il 90% del totale relativo alla realizzazione dell'intera parete per tutte e quattro le categorie di danno. E' possibile stabilire, quindi, che l'impatto ambientale per la realizzazione di una parete è governato dalla fase di produzione dei materiali.

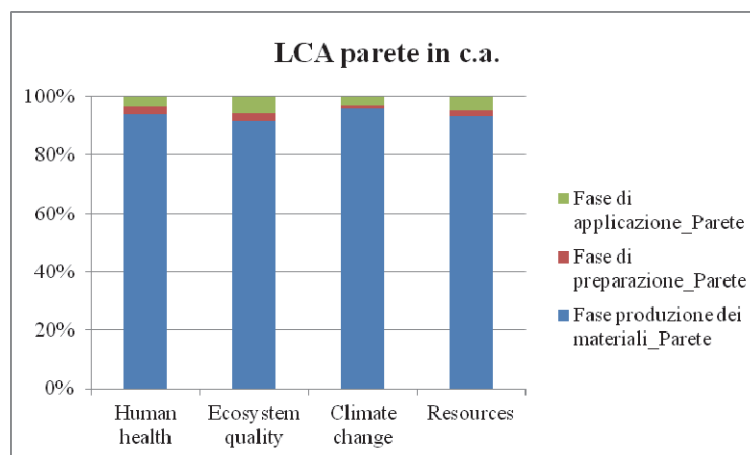


Figura 5.33 Risultati LCA parete in c.a.

Analizzando la fase di produzione dei materiali della parete, riportata in Figura 5.34, è possibile stabilire che la produzione dell'acciaio incide in maniera maggiore in termini di impatti ambientali, su tre dei quattro indicatori.

In riferimento ai risultati delle analisi di impatto ambientale relativi alla realizzazione del ringrosso in c.a. di una pilastrata, come riportato , si conferma di nuovo la fase di produzione dei materiali ad avere il maggior impatto ambientale superando il 50% per i quattro indicatori.

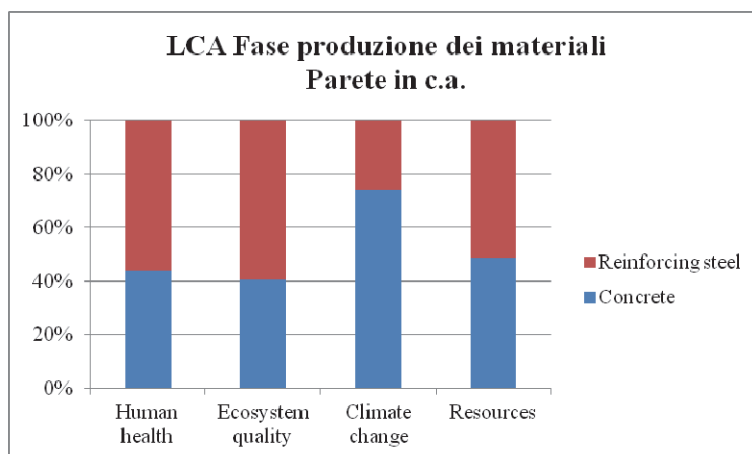


Figura 5.34 Risultati LCA fase produzione materiali parete in c.a.

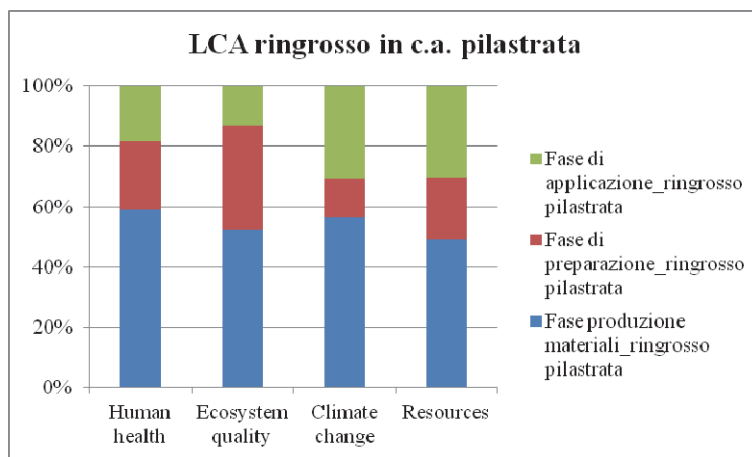


Figura 5.35 Risultati LCA ringrosso in c.a. pilastrata

Anche in questo caso è stata condotta un'analisi di LCA per la fase di produzione dei materiali al fine di indagare il materiale che presenta un impatto maggiore. Analogamente al caso della parete, il maggiore impatto è determinato dalla produzione dell'acciaio come riportato in Figura 5.36.

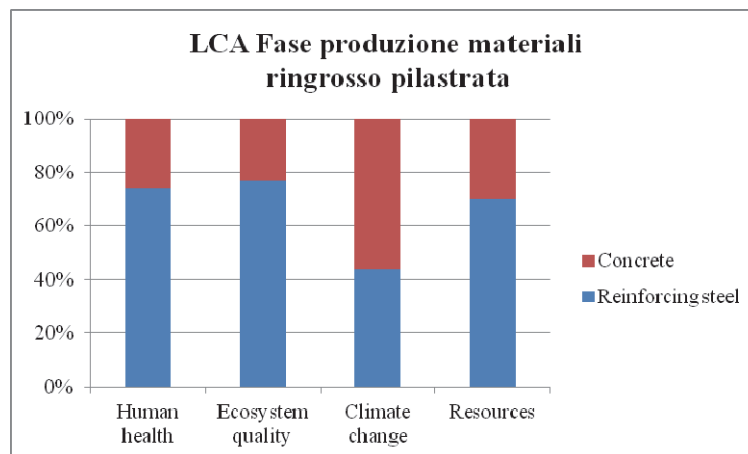


Figura 5.36 Risultati LCA fase produzione materiali ringrosso in c.a. pilastrata

Una volta condotte le analisi di LCA per i singoli interventi di rinforzo sismico è possibile passare alla valutazione delle strategie per il raggiungimento dell'adeguamento sismico della struttura.

In riferimento alla strategia con utilizzo esclusivo di FRP, per ottenere l'adeguamento sismico, è stato necessario predisporre circa 190,34 m² di FRP. Noto l'impatto per un m² di rinforzo di FRP e la quantità totale di rinforzo per ottenere l'adeguamento sismico è stato possibile ottenere l'impatto della strategia globale.

La seconda strategia di adeguamento sismico è caratterizzata dalla realizzazione di due pareti sismoresistenti, di identiche caratteristiche, inserite all'interno della maglia strutturale esistente. Noti i valori degli indicatori di impatto ambientale della singola parete è stato possibile ottenere l'impatto della strategia di adeguamento raddoppiando gli stessi. Come visto nel § 5.3.3, per ottenere l'adeguamento della struttura, è stato necessario predisporre anche 63 m² di FRP in carbonio per la risoluzione delle crisi fragili delle travi e dei nodi, per cui, noto l'impatto ambientale per un m² di intervento e moltiplicato per il numero di m² necessari si ottiene l'impatto ambientale relativo a questi ultimi interventi. A questo punto è banale ottenere l'impatto ambientale relativo alla strategia di adeguamento sismico dell'intera struttura per un I_R=100%.

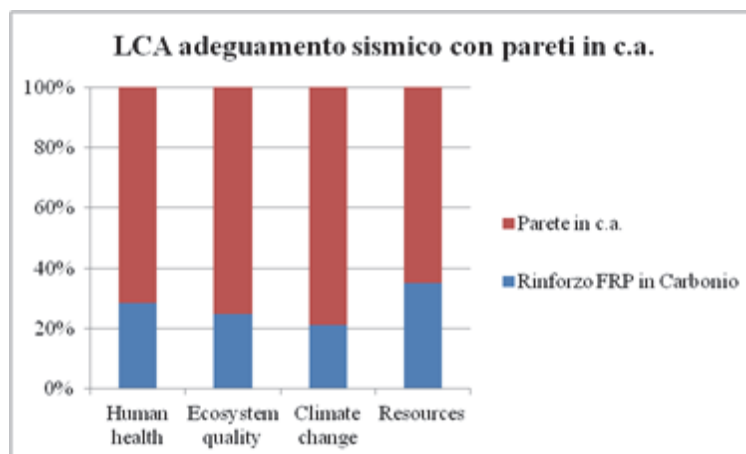


Figura 5.37 Risultati LCA adeguamento sismico con pareti in c.a.

La terza strategia utilizzata consiste nell'utilizzo congiunto di incamiciatura in cemento armato di 4 pilastrate più utilizzo di 126 m² di FRP, come visto nel § 5.3.4, per l'incremento di capacità deformativa dei pilastri e rinforzo a taglio per travi e nodi. Essendo noti gli impatti del ringrosso della singola pilastrata e del m² di rinforzo di FRP in carbonio, è possibile valutare l'impatto associato all'adeguamento sismico della struttura. L'analisi di impatto ambientale per la terza strategia di adeguamento, viene mostrata in Figura 5.38, dalla quale si evince che, a differenza del caso precedente, l'impatto maggiore è causato dall'utilizzo di FRP in carbonio al quale è possibile attribuire un valore di circa il 60 % per i quattro indicatori delle categorie di danno.

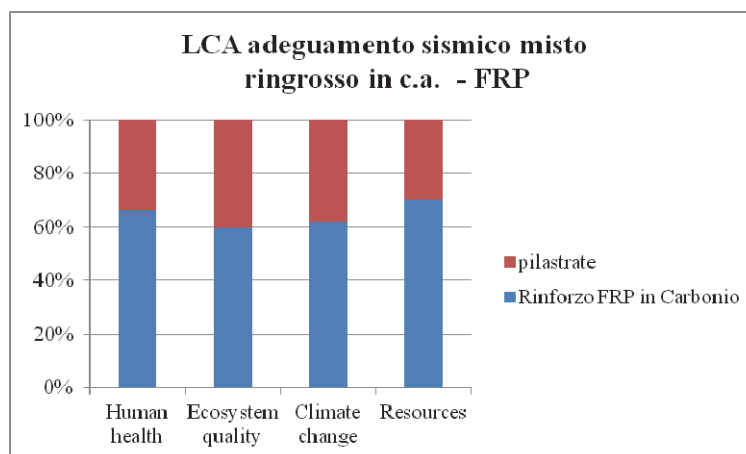


Figura 5.38 Risultati LCA adeguamento sismico misto con ringrossi in c.a. ed FRP

Una volta condotte le analisi di LCA per le singole strategie di adeguamento sismico è stata condotta un'analisi comparativa tra le diverse strategie con l'obiettivo di valutare quale, tra quelle utilizzate, presenta le migliori performance ambientali.

Nella si riportano i risultati dell'analisi comparativa delle diverse strategie di adeguamento sismico. I risultati dell'analisi comparativa vengono presentati con valori normalizzati rispetto al valore di impatto massimo per ciascuna categoria di danno.

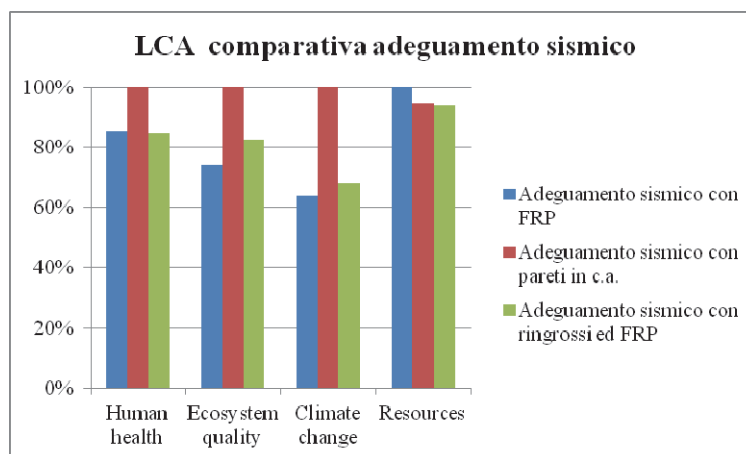


Figura 5.39 Risultati LCA comparativa tra le tre strategie di adeguamento sismico

Da tale analisi è stato possibile stabilire che l'intervento con l'utilizzo di pareti in cemento armato sia quello con l'impatto maggiore in tre delle quattro categorie di danno. Per l'intervento misto e l'intervento con esclusivo uso di FRP, i valori di impatto si equivalgono in due delle quattro categorie, nelle restanti due invece è l'intervento con esclusivo uso di FRP ad avere le performance ambientali migliori.

E' stata inoltre condotta un'ulteriore analisi, per valutare la differenza di impatto che esiste tra le tre strategie di adeguamento sismico, e la strategia di miglioramento sismico che è stata progettata considerando l'uso esclusivo di FRP per l'eliminazione solo delle crisi fragili connesse a travi pilastri e nodi. Per ottenere il miglioramento sismico sono stati necessari 73 m² di FRP in carbonio.

Analizzando i risultati dell'analisi riportati in Figura 5.40, si evince che l'impatto ambientale connesso al conseguimento del miglioramento sismico risulta essere di circa il 70% in meno rispetto alla strategia con pareti in c.a.

e di circa il 50% se comparato con le altre due tecniche di adeguamento sismico.

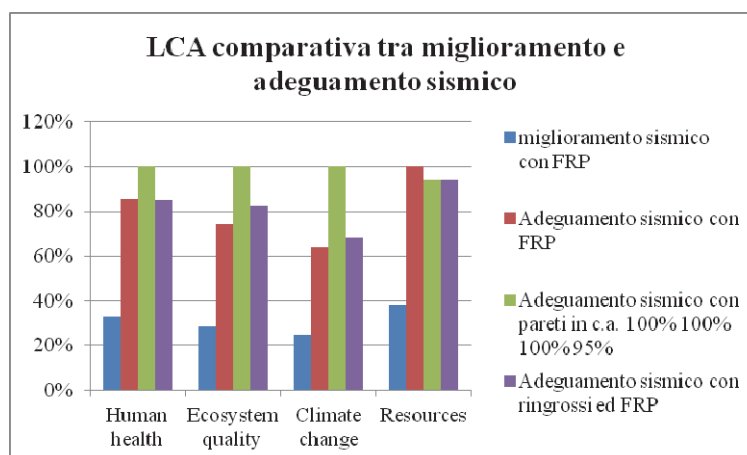


Figura 5.40 Risultati LCA comparativa tra miglioramento e adeguamento sismico

5.5 CONCLUSIONI

Negli ultimi anni si sta assistendo ad un notevole incremento, nello sviluppo, nell'implementazione e nell'adozione da parte degli operatori del settore edilizio, di strumenti volti alla valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici, dei materiali e dei processi edilizi.

La metodologia Life Cycle Assessment rappresenta uno dei più validi strumenti per il conseguimento di tali obiettivi. Tale strumento garantisce risultati affidabili che vanno oltre la semplice certificazione energetica, infatti, si analizzano tutti gli aspetti e gli impatti associati al ciclo di vita del costruito: dalla produzione dei materiali, la realizzazione, l'uso fino alla demolizione.

In letteratura sono presenti diversi studi basati sull'applicazione della metodologia LCA nel settore dell'industria dei prodotti e delle nuove costruzioni, di contro, esistono pochi studi basati sulla valutazione di LCA di tecniche di rinforzo sismico per strutture esistenti.

L'attenzione del caso di studio presentato, invece, si è focalizzato principalmente sull'applicazione di tale strumento a tecniche di retrofit su una struttura esistente tipica dell'area mediterranea.

L'Italia è tra i paesi con maggior rischio sismico dell'area mediterranea sia per la frequenza e l'intensità dei terremoti che storicamente hanno interessato il territorio nazionale, ma soprattutto per la vulnerabilità del

patrimonio edilizio italiano. A tal proposito, dai dati raccolti nel censimento della popolazione e degli edifici del 2001, si evince che il 35% degli edifici sono stati costruiti prima dell'emanazione della Legge 2/274 n.64, in cui compaiono le prime disposizioni in materia antisismica, mentre, il 30% è costruito tra il 1972-1981. Un altro effetto che incide negativamente sulla sicurezza strutturale è il ricorso diffuso dell'abusivismo edilizio sul territorio italiano. Da tali considerazioni è possibile dedurre che gran parte del patrimonio edilizio esistente in Italia presenta un basso livello di sicurezza sismica e quindi necessita di interventi di consolidamento sismico. Da questo nasce l'interesse verso l'impatto ambientale che tali interventi possono avere sull'ambiente.

Esistono diverse tecniche di retrofit che possono essere utilizzate al fine di ottenere livelli di sicurezza accettabili. In particolare, nel caso studio, si è ottenuto un miglioramento sismico mediante l'utilizzo di materiali fibrorinforzati in carbonio ed adeguamento sismico relativo allo stato limite considerato (SLV), mediante l'utilizzo di diverse strategie di rinforzo. Nello specifico, le tecniche di adeguamento sismico applicate sono: intervento con esclusivo uso di FRP, inserimento di pareti sismoresistenti in calcestruzzo armato e uso combinato di incamiciatura in cemento armato ed FRP.

L'obiettivo raggiunto non è stato solo quello di valutare le performance ambientali delle singole strategie di intervento ma anche quello di effettuare un'analisi comparativa tra queste in modo tale da poter valutare quella che tra tutte presenta il più basso impatto ambientale.

Al fine di eseguire un'analisi LCA di tipo comparativo, tra le tre strategie, si è fatta l'ipotesi che le diverse tecniche di intervento siano progettate per ottenere la stessa performance strutturale, definendo in questo modo l'unità funzionale dell'analisi ($I_R=100\%$).

I risultati dell'analisi sono stati presentati con valori normalizzati rispetto al valore di impatto massimo per ciascuna delle quattro categorie di danno previste dalla metodologia Impact2002+ (Human Health, Ecosystem Quality, Climate Change e Resources).

I risultati di tale caso di studio hanno dimostrato che l'intervento con l'utilizzo di pareti in cemento armato presenta il maggiore impatto ambientale in tre delle quattro categorie di danno. Per quanto riguarda l'intervento misto e l'intervento con uso esclusivo di FRP, i valori di impatto si equivalgono in due delle quattro categorie, mentre, nelle restanti due l'intervento con esclusivo uso di FRP mostra performance ambientali migliori.

Tale aspetto è riassunto nella Figura 5.41 riportata di seguito.

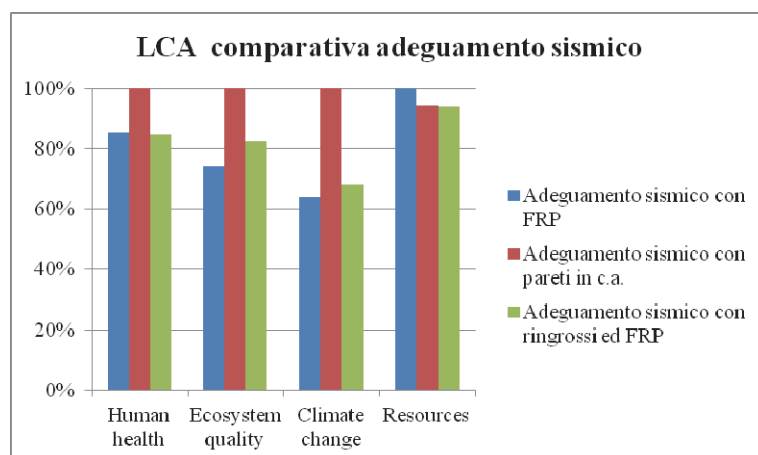


Figura 5.41 Analisi comparativa tecniche di adeguamento sismico

Sulla base di tali dati è possibile affermare che tra le tre strategie di adeguamento sismico proposte, l'utilizzo esclusivo di FRP è quella che presenta le performance ambientali migliori.

Un altro importante risultato è scaturito dall'analisi comparativa delle analisi di LCA tra la strategia di miglioramento sismico, ottenuta con uso esclusivo di FRP, e le strategie di adeguamento sismico proposte.

Gli impatti ambientali riferiti alla strategia di miglioramento sismico risultano essere circa il 70% in meno rispetto all'intervento con pareti in c.a. e di circa il 50% in meno rispetto alle altre due tecniche di adeguamento sismico.

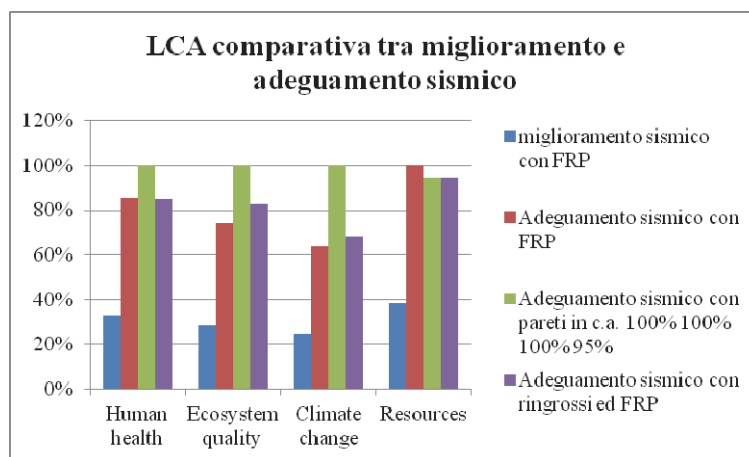


Figura 5.42 Analisi comparativa tra miglioramento e adeguamento sismico

La notevole differenza in termini di impatto ambientale tra l'ottenimento del miglioramento sismico ed il completo adeguamento rende tale risultato di estremo interesse per sviluppi di studi futuri. Nel caso in cui le strutture non siano interessate da meccanismi di piano soffice, è possibile rappresentare, facendo riferimento a dati statistici, l'andamento dell'indice di rischio associato alle varie tipologie di crisi strutturale.

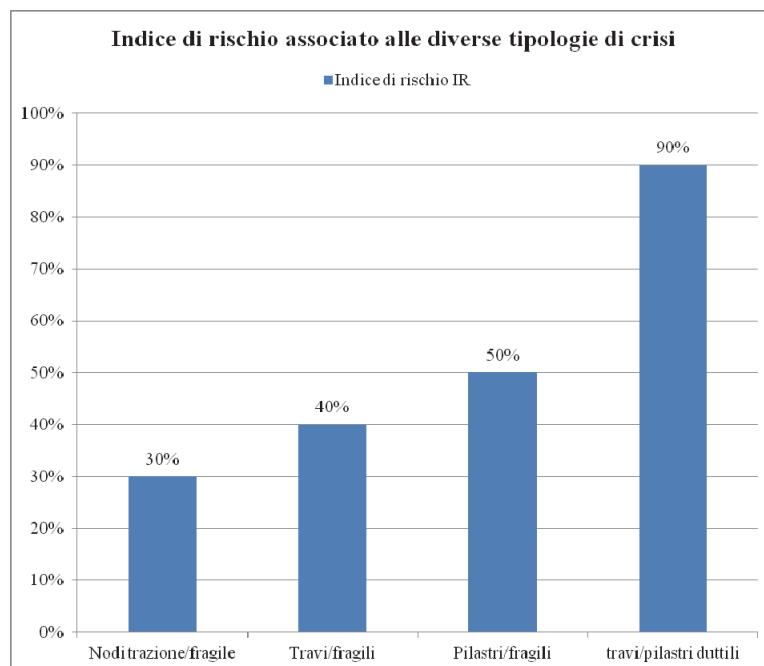


Figura 5.43 Andamento dell'indice di rischio in funzione delle crisi strutturali

Come mostrato in Figura 5.43, i primi meccanismi di crisi che si manifestano su una struttura sono di tipo fragile ed in genere sono associati ad indici di rischio minori della soglia minima $I_R=60\%$ corrispondente intervento di miglioramento sismico secondo quanto riportato dalla O.P.C.M. 3790 del 17/07/2009, mentre i meccanismi di crisi di tipo duttile si presentano in genere per I_R al di sopra di questa soglia. I meccanismi di crisi di tipo fragile possono essere eliminati, come fatto anche nel presente caso di studio, con strategie di intervento che risultano poco invasive, con costi molto ridotti, e soprattutto con performance molto elevate da un punto di vista ambientale.

Sulla base dei risultati ottenuti, e se si tiene conto dello scopo fondamentale dello sviluppo sostenibile, ovvero del simultaneo raggiungimento di obiettivi sociali, economici e ambientali, e della

complessità, in molti casi, del raggiungimento del completo adeguamento sismico, uno studio approfondito di tipo comparativo su tecniche di intervento locali, che possano garantire il raggiungimento degli standard di miglioramento sismico, risulterebbe essere sicuramente molto utile al fine di avere un quadro maggiormente chiaro in fase decisionale.

E' importante, però, sottolineare che i dati ottenuti in questo caso di studio, non hanno valenza universale ma che sono fortemente dipendenti dalla tipologia della struttura, dal sito di riferimento e dalle condizioni locali.

A tal proposito, non è possibile fare una classifica generale in termini di performance strutturali tra le diverse strategie di rinforzo sismico, allo stesso modo non è possibile fare una classificazione univoca delle performance ambientali di tali tecniche. Bisogna tener conto, infatti, dei limiti delle analisi di Life Cycle Assessment quali:

- La tecnica non consente la valutazione di impatti definiti a livello locale; i risultati di uno studio condotto a livello regionale o globale possono risultare non rappresentativi delle condizioni locali;
- Gli impatti ambientali sono descritti come impatti potenziali perché non sono definiti nello spazio e nel tempo adottando, quindi, un approccio di tipo stazionario;
- La natura delle scelte e assunzioni compiute, come ad esempio fissare i confini del sistema, scegliere la provenienza dei dati e fissare le categorie di impatto, può essere influenzata da aspetti soggettivi;
- I modelli applicati nella valutazione degli impatti ambientali potrebbero non essere disponibili per tutte le applicazioni in quanto in quanto sono direttamente dipendenti da assunzioni fatte.

In definitiva, analizzate le varie incertezze connesse all'utilizzo del metodo LCA, si può concludere che, il presente caso di studio può essere utilizzato come linea guida per gli operatori del settore della progettazione per avere un ulteriore elemento decisionale nella fase di scelta della strategia di intervento da adottare e come punto di partenza per eventuali studi futuri per altre alternative di rinforzo strutturale degli edifici esistenti.

CONCLUSIONI

Molteplici sono gli obiettivi raggiunti durante questi anni di dottorato e presentati nel presente elaborato di tesi, ma non meno gli spunti per eventuali sviluppi futuri volti allo sviluppo sostenibile, dell'edilizia e dei suoi processi, governato da innovativi strumenti di gestione ed ottimizzazione, attualmente a disposizione, come nel caso specifico il Building Information Modeling.

Nella parte iniziale è stata presentata una ricognizione globale della metodologia BIM.

Tale ricognizione si è resa necessaria per due aspetti principali, il primo è stato quello di chiarire alcuni concetti e definizioni che spesso risultano inflazionati e distorti dall'enorme mole di informazioni che circolano sul BIM nella comunità tecnica; il secondo è stato quello di indagare a fondo in merito a tutte le potenzialità espresse da tale metodologia nelle singole fasi del processo edilizio.

Il risultato di questa approfondita ricerca ha dimostrato che l'andamento del settore delle costruzioni, inteso nella sua accezione più ampia, che comprende, quindi, tutte le fasi del processo edilizio, dall'industria dei materiali e componenti, dalla progettazione al cantiere fino ad arrivare alla gestione dell'opera nella sua fase di utilizzo, si sta muovendo verso la digitalizzazione e l'interoperabilità di tutte le informazioni utili per la gestione dello stesso in maniera ottimizzata.

Questo approccio *life cycle thinking* del processo edilizio unito al forte avanzamento tecnologico dei moderni strumenti hardware e software a supporto degli operatori del settore, sanciscono un cambiamento epocale reso inevitabile dalla moltitudine di vantaggi che essi trasferiscono all'industria delle costruzioni. Come descritto nel Primo Capitolo diversi paesi, che uniti rappresentano gran parte dell'economia mondiale, stanno adottando strategie politiche per incentivare l'utilizzo del BIM e per portare, tale metodologia, ad un livello di conoscenza sempre più avanzato. Un forte segnale in questa direzione è stato dato dalla Comunità Europea approvando il 15 Gennaio 2014 la European Union Public Procurement Directive (EUPPD), la nuova direttiva europea in tema di appalti pubblici asserendo: "*For public works contracts and design contests, Member States*

may require the use of specific electronic tools, such as of building information electronic modelling tools or similar”.

Oltre all'analisi del contesto di riferimento sulla metodologia BIM, nello stesso capitolo, sono state trattate tutte le sue potenzialità per ogni fase del processo produttivo ed i consecutivi vantaggi connessi al suo utilizzo. Pertanto, la prima parte del presente elaborato di tesi ha condotto alla conclusione che la metodologia Building Information Modeling nel settore delle costruzioni è già uno strumento ampiamente diffuso tra gli operatori del settore con la tendenza a consolidarsi sempre di più fino ad arrivare ad essere, in un prossimo futuro, uno strumento di comune utilizzo.

Tutte queste note positive del BIM si scontrano, però, con un'elevata complessità ed onere computazionale delle fasi iniziali di un progetto condotto con tale metodologia. Tali deduzioni sono il risultato delle esperienze del Secondo e Terzo Capitolo, dove sono stati trattati rispettivamente alcuni casi di implementazione parametrica di oggetti BIM e successivamente è stato sviluppato il caso di studio della Cassa Edile di Napoli. In tali esperienze è stato possibile riscontrare, mediante applicazioni reali, i molteplici vantaggi del BIM, ma è giusto evidenziare anche le difficoltà derivate da una fase di impostazione iniziale del progetto molto onerosa caratterizzata dal reperimento ed inserimento, nei modelli BIM, di un numero elevato di parametri e dati. Nel caso della progettazione della Cassa Edile di Napoli, si è riscontrato che la fase di caratterizzazione degli oggetti BIM, che compongono il modello globale dell'opera, ed il successivo controllo della loro corrispondenza con le prestazioni, dichiarate nelle schede tecniche, sono risultate non solo le fasi più onerose in termini di tempi e risorse impiegate ma anche le più delicate per garantire una buona riuscita del progetto. L'impiego maggiore di tempo e risorse, impiegate nella fase iniziale, vengono recuperate nelle fasi successive del progetto, quali, la fase di computo dei materiali, di definizione dei dettagli costruttivi, nella redazione degli elaborati finali di progetto e del cronoprogramma dei lavori.

Un altro aspetto, evidenziato da tale attività, è il diverso approccio alla progettazione della metodologia BIM rispetto all'approccio tradizionale alla progettazione. In un approccio tradizionale i diversi livelli di progettazione preliminare, definitivo ed esecutivo, spesso, vengono trattati come tre progettazioni differenti accomunate da una logica progettuale e prestazionale dell'opera che si vuole realizzare, ma che comunque sono caratterizzate da modelli, elaborati, calcoli e documenti diversi tra loro, la

cui produzione genera inevitabilmente una perdita di informazioni che certamente non giova al processo edilizio globale. In un approccio BIM, invece, il progetto, partendo dalla fase di ideazione fino alla sua realizzazione e gestione, è un continuo accrescimento ed arricchimento del modello 3D, unico e condiviso, che permette il costante aggiornamento di tutti i soggetti interessati al progetto e riduce al minimo la perdita di informazioni durante tutte le fasi del processo.

Diversi sono stati gli elementi del BIM che hanno rivestito un notevole interesse da parte dei progettisti della Cassa Edile di Napoli, durante i vari confronti avuti nell'attività di trasferimento del progetto in BIM, ma tra questi quello principale è stato il "Clash Detection"; si tratta della sovrapposizione dei livelli progettuali, strutturale, architettonico ed impiantistico in un unico modello, che ha garantito un'elevata coerenza tra tutti gli elaborati progettuali esecutivi, impossibile da ottenere con l'approccio tradizionale.

Da queste ultime esperienze descritte e dalla necessità di ridurre gli impatti sull'ambiente del settore delle costruzioni, quale comparto che incide in maniera massiccia sull'inquinamento globale, che nasce l'attività trattata nel Capitolo 4.

L'obiettivo principale di tale attività è stata quella di definire una procedura che, sfruttando le enormi potenzialità del BIM di archiviazione e gestione dei dati, permetta di poter effettuare la valutazione degli impatti sull'ambiente delle opere civili basate su analisi di Life Cycle Assessment. Per il raggiungimento di tale obiettivo è stato sviluppato un tool "ad hoc" partendo da un software, BIM-oriented, molto utilizzato nella pratica professionale per la stima delle quantità e dei prezzi. Questo ha permesso l'integrazione dei dati relativi ai risultati di LCA di materiali e lavorazioni, utilizzate nell'edilizia, in un processo BIM-based conducendo in maniera immediata ai risultati di LCA dell'intero edificio oggetto del caso di studio.

Quest'attività non solo ha condotto a diversi risultati interessanti in merito al singolo caso di studio ma ha fornito grandi spunti per favorire lo sviluppo sostenibile nel settore edilizio. Integrare i dati di LCA, in un processo di progettazione gestito in BIM, permette ai progettisti di disporre di un parametro aggiuntivo al complesso delle variabili che caratterizzano la ricerca multi-obiettivo dell'ottimo progettuale. Tale aspetto, in passato non era ipotizzabile data la complessità nel condurre analisi di LCA, soprattutto per aggregati complessi come le opere civili, infatti, tale

metodologia di valutazione degli impatti ambientali è molto diffusa nell'ambito della ricerca ma poco in ambito professionale.

Con la procedura proposta, in ottica di sviluppo sostenibile, è possibile ipotizzare diversi scenari progettuali, modificando materiali, componenti o procedure realizzative e contestualmente monitorare e controllare i parametri che incidono sulla sostenibilità dell'intervento, quali, costi, tempi, impatti sull'ambiente, in modo tale da scegliere la soluzione progettuale che ottimizza tutti gli aspetti che caratterizzano la sostenibilità.

La procedura proposta, precedentemente descritta, trova applicazione però soprattutto in opere di nuova realizzazione ed è per questo motivo che si è deciso di affrontare la problematica degli edifici esistenti e nella fattispecie della sostenibilità degli interventi di consolidamento sismico.

Pertanto, nel Quinto Capitolo è stata condotta un'analisi di impatto ambientale di diverse soluzioni di rinforzo sismico, mirate a ridurre la vulnerabilità sismica di un caso di studio, rappresentato da una struttura in cemento armato, tipica dell'area mediterranea, progettata e realizzata per uso abitativo alla fine degli anni 70'.

In dettaglio, una volta condotta un'analisi sismica della struttura as-built, è stato effettuato il progetto di consolidamento mediante l'utilizzo di diverse tecniche di rinforzo sismico. L'obiettivo principale, del progetto di consolidamento, è stato quello di garantire un livello di sicurezza corrispondente all'adeguamento sismico della struttura, pari ad un indice di rischio $I_R=100\%$, con tecniche di rinforzo completamente diverse. A tal proposito, il consolidamento della struttura è stato ottenuto mediante l'utilizzo di (i)FRP, (ii) intervento misto incamiciatura in c.a ed FRP e (iii) pareti sismoresistenti.

Di tali tecniche è stata effettuata l'analisi di impatto ambientale, mediante l'utilizzo della metodologia LCA, considerando tutti i materiali e le lavorazioni necessarie per rinforzare la struttura con diverse tecniche e successivamente un'analisi comparativa delle stesse al fine di confrontarle per conoscere tra queste le tecniche con le prestazioni ambientali migliori.

I risultati, rappresentati in termini di categorie di danno (Human Health, Ecosystem Quality, Climate Change e Resources), secondo la metodologia IMPACT2002+, hanno dimostrato che le pareti in cemento armato presentano dati peggiori in tre delle quattro categorie, mentre, per quanto riguarda l'intervento misto e l'intervento con uso esclusivo di FRP, essi presentano valori simili per due delle quattro categorie, mentre, negli altri due indicatori l'uso di FRP mostra delle performance ambientali

migliori. Sulla base di tali dati è possibile affermare che, tra le tre strategie di adeguamento sismico proposte, l'utilizzo esclusivo di FRP è quella che presenta le performance ambientali migliori.

Tali analisi sono fortemente influenzate da effetti locali e da scelte progettuali soggettive, per cui, non è corretto attribuire ai risultati così ottenuti una validità generale, ma è giusto ritenere l'approccio utilizzato valido per progettare interventi che limitino i loro impatti sull'ambiente.

Un risultato importante è scaturito poi dall'analisi comparativa delle analisi di LCA tra la strategia di miglioramento sismico, ottenuta con uso esclusivo di FRP, fino ad un I_R pari al 76%, e le strategie di adeguamento sismico proposte.

Gli impatti legati alla strategia di miglioramento sismico sono risultati circa il 70% in meno rispetto all'intervento con pareti in c.a. e di circa il 50% in meno rispetto alle altre due tecniche di adeguamento sismico.

Tale risultato era abbastanza prevedibile, data la diminuzione degli elementi da rinforzare per ottenere un miglioramento sismico rispetto all'adeguamento, ma la notevole differenza in termini di impatto ambientale rende tale risultato di estremo interesse per sviluppi futuri.

In conclusione, quindi, tale elaborato di tesi intende analizzare i vantaggi offerti dall'utilizzo di metodologie BIM-based per la progettazione ed investigare le opportunità offerte da questi nuovi approcci nel gestire le numerose informazioni legate alle analisi di impatto ambientale nel ciclo di vita delle opere, affinché tali informazioni possano orientare le scelte progettuali verso interventi realmente sostenibili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CRESME ricerche SPA. Industria Costruzioni Napoli - I.Co.Na. 2013.
- [2] Tam C., Tam VW., Tsui W. Green construction assessment for environmental management in the construction industry of Hong Kong. *Int J Proj Manag* 2004;22:563–71. doi:10.1016/j.ijproman.2004.03.001.
- [3] Volk R, Stengel J, Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Autom Constr* 2014;38:109–27. doi:10.1016/j.autcon.2013.10.023.
- [4] Greenstreet N, Mcphee A, Young G, Pearson P, Small D, Beazley S, et al. NATSPEC BIM Scheduling guidelines 2010.
- [5] NATSPEC BIM Reference Schedule 2011:0–3.
- [6] Fox K, Morton B. SmartMarket Report The Business Value of BIM in Australia and New Zealand: SmartMarket Report Managing Editor. n.d.
- [7] Analysis MT. SmartMarket Report The Business Value of BIM in North America SmartMarket Report. 2012.
- [8] Parliament THEE, Council THE, The OF, Union E. 28.3.2014 2014:243–374.
- [9] Fox K, Morton B, Ramos J. SmartMarket Report The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets: SmartMarket Report. n.d.
- [10] Modeling BI, Exhibit DD, Digital P, Protocol D, Building P, Modeling I, et al. Guide , Instructions and Commentary to the 2013 AIA Digital Practice Documents 2013:1–62.

-
- [11] Nbims. National Building Information Modeling Standard. Building 2007:183.
- [12] Yan H, Damian P. Benefits and Barriers of Building Information Modelling n.d.
- [13] Porwal A, Hewage KN. Building Information Modeling (BIM) partnering framework for public construction projects. Autom Constr 2013;31:204–14. doi:10.1016/j.autcon.2012.12.004.
- [14] Information B, Bim M, Party W. A report for the Government Construction Client Group 2011.
- [15] Bray M, Ollmann M. BiM Paper 2013.
- [16] Investing in BIM: a guide for architects n.d.
- [17] Wix J, Bjørkhaug L. EU-project STAND-INN – Integration of Standards for Sustainable Construction into Business Processes Using IFC Standards 2008.
- [18] Barlish K, Sullivan K. How to measure the benefits of BIM — A case study approach. Autom Constr 2012;24:149–59. doi:10.1016/j.autcon.2012.02.008.
- [19] Salzano A, De Astis F, Zinno A. I Share BIM - Il progetto per la Cassa Edile di Napoli. Ingenio 2014.
- [20] Duell R, Hathorn T, Harthorn Reist T. Autodesk Revit Architecture 2015 - Essentials. 2014.
- [21] Autodesk Robot Structural Analysis Professional Analisi completa per i progetti Analisi strutturale integrata più facile Il software Autodesk Robot TM Structural Analysis Professional integra il Building Information Modeling (BIM) con l ' analisi e la pr n.d.
- [22] Revit A, Structural R. Integrating Autodesk Revit , Revit Structure , and Robot Structural Analysis Professional 2013:1–27.

- [23] World Commission on Environment and Development. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (The Brundtland Report). *Med Confl Surviv* 1987;4:300. doi:10.1080/07488008808408783.
- [24] Jørgensen A, Herrmann IT, Bjørn A. Analysis of the link between a definition of sustainability and the life cycle methodologies. *Int J Life Cycle Assess* 2013;18:1440–9. doi:10.1007/s11367-013-0617-x.
- [25] Klöpffer W. Life-Cycle based methods for sustainable product development. *Int J Life Cycle Assess* 2003;8:157–9. doi:10.1007/BF02978462.
- [26] Terzic V, Mahin SA, Comerio MC. COMPARATIVE LIFE-CYCLE COST AND PERFORMANCE ANALYSIS OF STRUCTURAL SYSTEMS FOR BUILDINGS n.d. doi:10.4231/D3930NW0G.
- [27] Pulselli RM, Simoncini E, Pulselli FM, Bastianoni S. Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy Build* 2007;39:620–8. doi:10.1016/j.enbuild.2006.10.004.
- [28] Azhar S, Carlton W a., Olsen D, Ahmad I. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Autom Constr* 2011;20:217–24. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.019.
- [29] Cabeza LF, Rincón L, Vilariño V, Pérez G, Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;29:394–416. doi:10.1016/j.rser.2013.08.037.
- [30] Asdrubali F, Baldassarri C, Fthenakis V. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy Build* 2013;64:73–89. doi:10.1016/j.enbuild.2013.04.018.
- [31] Lewis A, Thittaker J. The role of BIM and overcoming the complexities of big data 2013.

-
- [32] Eadie R, Browne M, Odeyinka H, McKeown C, McNiff S. BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. *Autom Constr* 2013;36:145–51. doi:10.1016/j.autcon.2013.09.001.
- [33] Ortiz O, Castells F, Sonnemann G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Constr Build Mater* 2009;23:28–39. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.
- [34] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G. Presemng a New Meth6d IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology 2003;8:324–30.
- [35] Olinzock M a., Landis AE, Saunders CL, Collinge WO, Jones AK, Schaefer L a., et al. Life cycle assessment use in the North American building community: summary of findings from a 2011/2012 survey. *Int J Life Cycle Assess* 2015;20:318–31. doi:10.1007/s11367-014-0834-y.
- [36] Abdulla R. INTEGRATING BUILDING INFORMATION MODELING AND LIFE CYCLE ASSESSMENT TOOLS TO DESIGN n.d.:17–9.
- [37] Gu N, London K. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Autom Constr* 2010;19:988–99. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.002.
- [38] Volk R, Stengel J, Schultmann F. Corrigendum to “Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs” [*Autom. Constr.* 38 (March 2014) 109–127]. *Autom Constr* 2014;43:204. doi:10.1016/j.autcon.2014.02.010.
- [39] Precettive D. Legge 5 Novembre 1971 n . 1086 Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato , normale e precompresso ed a struttura metallica 1971:1–4.
- [40] DECRETO MINISTERO LLPP 30 MAGGIO 1974 Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche 1974.

- [41] Computer and Structures inc. University Avenue Berkley California 94704 USA. CSI Analysis Reference Manual for SAP200, ETABS, and SAFE 2013:496.
- [42] Ministro IL, Infrastrutture D. Decreto del Ministero delle infrastrutture 14 gennaio 2008 Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni . 2009;2008.
- [43] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. C.M. Infrastrutture e Trasporti 2 febbraio 2009, n° 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni." Gazz Uff Della Repubb Ital 26 Febbrario 2009, N° 47, Suppl Ord N° 27 2009.
- [44] Manfredi G, Masi A, Pinho R, Verderame G, Vona M. Valutazione degli edifici esistenti in cemento armato. IUSS PRESS. 2007.
- [45] Verderame GM, Iervolino I, Ricci P. Report on the damages on buildings following the seismic event of 6th of april 2009, V1.20 2009.
- [46] Delegato C. Indirizzi per l' esecuzione degli interventi di cui all ' Ordinanza del Presidente del 2009.
- [47] Eurocode C. 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1: 2004). Eur Comm Norm Brussels 2004;1.
- [48] Uni En. BS EN 1998-3:2005 - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Eurocode 8 2005;3.
- [49] Cnr. DT-200/2014 - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati (in Italian), Consiglio Nazionale delle Ricerche 2014.
- [50] Ll.Gg. Linee guida per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP 2009.

- [51] Dolce M, Manfredi G. LINEE GUIDA PER RIPARAZIONE E RAFFORZAMENTO. Doppiovoce. n.d.
- [52] Frascadore R. INFLUENZA DEI MECCANISMI FRAGILI SULLA SICUREZZA SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A. (in Italian) 2011.

Appendice A.

ANALISI DEI CARICHI E PROGETTO PER TENSIONI AMMISSIBILI

Nella seguente appendice si riporta l'analisi dei carichi e il progetto per tensioni ammissibili relativi all'edificio di cui al Capitolo 5.

A.1 ANALISI DEI CARICHI

Nell'analisi dei carichi, per il calcestruzzo armato si considera un peso specifico pari a 2500 kg/m^3 , per le tamponature ed i tramezzi in laterizio forato un peso pari a 800 kg/m^3 . Il peso proprio degli elementi strutturali (travi, pilastri e scala) è tenuto in conto direttamente dal programma SAP2000. Essendo i pesi proprio degli elementi strutturali già computati dal software, i carichi da assegnare alle travi sono dovuti ai seguenti contributi:

- Solaio (travetti, pignatte, soletta, massetto, pavimento, intonaco e tramezzi);
- Fascia piena di solaio (di larghezza di 15 cm);
- Tamponature esterne.

Solaio:

Per i solai si valutano i carichi considerando le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali e delle finiture dedotte dagli elaborati di progetto a disposizione e considerando dei carichi permanenti plausibili in base al periodo di costruzione. Per quanto riguarda, invece, i carichi accidentali si è fatto riferimento alle norme del Consiglio Nazionale delle Ricerche: "*Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione e la manutenzione delle costruzioni metalliche*" (Pagano, 1963). Il carico accidentale considerato agente sui solai di piano è pari a 200 kg/m^2 , considerando civile abitazione e pari a 150 kg/m^2 per la copertura.

Il solaio ha un'altezza pari a 24 cm. In particolare, il solaio presenta le seguenti caratteristiche:

- Travetti in c.a. di larghezza pari a 10 cm ed interasse di 50 cm;
- Laterizi di larghezza pari a 40 cm e di altezza pari a 20 cm;

- Soletta di altezza pari a 4 cm.

La determinazione dei carichi che gravano sulla struttura è effettuata facendo riferimento ad un m² di solaio. Nella Tabella A.1 si riportano i carichi utilizzati per la analisi strutturali:

Pesi propri strutturali		
G _{soletta}	1.00	kN/m ²
G _{travetti}	1.00	kN/m ²
G _{k1,tot}	2.00	kN/m ²
Pesi propri non strutturali		
G _{laterizi}	1.28	kN/m ²
G _{intonaco}	0.36	kN/m ²
G _{massetto}	0.60	kN/m ²
G _{pavimento}	0.40	kN/m ²
G _{tramezzi}	1.00	kN/m ²
G _{k2,tot}	3.64	kN/m ²

Tabella A.1 Carichi derivanti dai pesi propri strutturali e non strutturali

Il carico sulle travi dovuto allo scarico del solaio si valuta in base al criterio di fascia per cui i solai sono orditi tutti in direzione X scaricando sulle travi con alle parallelo ad Y (travi emergenti).

Per l'assegnazione dello scarico del solaio sulle travi si sono applicate delle aree, nel modello SAP2000, con peso proprio nullo in modo tale da simulare la presenza delle solette ed a tali aree si sono associate tre aree di carico differenti (G_{k1}, G_{k2} e Q_k), utilizzando il comando *“Uniform to Frame (shell)”* scaricando in tal modo i carichi in direzione dell'orditura dei solai e quindi sulle travi emergenti.

E' stato considerando, in aggiunta, anche il carico derivante dalla fascia piena come ulteriore carico sulle travi afferenti. La fascia piena è presente solo in corrispondenza delle travi emergenti con una larghezza pari a 15 cm.

$$G_{fp} = b_{fp} \cdot H_{solaio} \cdot \gamma_{cls} \tag{Eq. A.1}$$

Il peso della fascia piena alla trave a cui afferisce viene assegnato con un carico distribuito sulla trave $G_{k, trave}$.

Tamponature

Il tipo di tramezzatura utilizzata è a doppia fodera, nella Tabella A.2 si riportano i valori del peso delle stesse:

Peso delle Tamponature	
Fodera interna (10 cm)	0.80 kN/m ²
Fodera esterna (15 cm)	1.20 kN/m ²
Intonaco (2 cm)	0.36 kN/m ²
Totale peso proprio non strutturale	2.36 kN/m ²

Tabella A.2 Peso delle tamponature interne/esterne

Nel calcolo della struttura è stato considerato un peso ridotto del 25% per tenere conto dei vuoti (finestre e porte) si ha:

$$G_{tamp \rightarrow trave} = 0.75 \cdot G_{tamponatura} \cdot \left(h_{interpiano} - \frac{h_{trave,i}}{2} - \frac{h_{trave,j}}{2} \right) \quad \text{Eq. A.2}$$

Dove la trave i-esima è quella per cui si sta valutando il carico da applicare mentre la trave j-esima è quella immediatamente superiore. Tale carico viene applicato solo per le travi dove sono presenti le tamponature.

Il carico viene applicato come carico distribuito sulla trave $G_{k, trave}$.

In definitiva le sollecitazioni vengono valutate mediante un'analisi statica considerando solo la presenza di carichi gravitazionali. Come indicato nella norma di riferimento per tali analisi la combinazione di carico utilizzata è la seguente:

$$Combo_{grav} = G_k + Q_k \quad \text{Eq. A.3}$$

Le sollecitazioni sono state valutate mediante il programma di calcolo strutturale SAP 2000.

A.2 PROGETTO ARMATURA LONGITUDINALE

Una volta ricavate le sollecitazioni le armature sono state progettate secondo le procedure presenti nei manuali e nei testi di tecnica delle costruzioni diffusi all'epoca del progetto. Nella fattispecie, sono state progettate le armature delle sezioni di mezzeria e di appoggio.

Il dimensionamento delle armature è stato effettuato mediante la formulazione semplificata, presente anche nei manuali dell'epoca, ossia:

$$A_{s,nec} = \frac{M}{0.9 d \sigma_{a,f}} \quad \text{Eq. A.4}$$

I valori di armatura strettamente necessari così ottenuti sono stati trasformati in barre di acciaio in numero e diametro tali da avvicinarsi il più possibile all'area richiesta sfruttando al massimo la resistenza dell'acciaio, coerentemente con quelle che erano le modalità di progetto dell'epoca.

Per quanto riguarda l'armatura compressa si è tenuto conto delle indicazioni progettuali dell'epoca considerando:

$$A'_{s,nec} = 0.25 \cdot A_{s,nec} \quad \text{Eq. A.5}$$

La progettazione è stata effettuata facendo una distinzione tra le travi appartenenti ai telai trasversali (travi emergenti) e le travi appartenenti ai telai longitudinali (travi a spessore). Tale distinzione è stata fatta, sia per tenere conto della differente tipologia di trave, sia perché lo scarico del solaio si ha quasi totalmente sulle travi emergenti comportando sollecitazioni molto maggiori su queste e richiedendo un'armatura più robusta rispetto alle travi a spessore.

Le armature utilizzare per le due tipologie di travi sono:

- Travi emergenti: ϕ 22; ϕ 18
- Travi a spessore: ϕ 14; ϕ 10.

L'armatura longitudinale è stata considerata sagomata a 45°, come usanza dell'epoca, in modo tale da sfruttare il contributo di tale armatura a Taglio.

Travate in direzione longitudinale X (travi a spessore)

Elementi	Travata Y=0m			Armatura tesa		Armatura compressa	
	b mm	h mm	sezione -	ferri -	A _s mm ²	ferri -	A' _s mm ²
T1-12	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-23	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-34	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-45	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-56	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-67	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-78	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-89	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157

Tabella A.3 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanze y=0

Elementi	Travata Y=4,8m			Armatura tesa		Armatura compressa	
	b mm	h mm	sezione -	ferri -	A _s mm ²	ferri -	A' _s mm ²
T1-1213	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-1415	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-1516	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-1617	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-1819	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-1920	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-13A14	350	240	appoggio	3φ14	462	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-17A18	350	240	appoggio	3φ14	462	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157

Tabella A.4 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanza y=4,8m

Elementi	Travata Y=10,8m			Armatura tesa		Armatura compressa	
	b mm	h mm	sezione -	ferri -	A _s mm ²	ferri -	A' _s mm ²
T1-2122	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-2223	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-2324	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-2425	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-2526	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-2627	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-2728	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1-2829	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157

Tabella A.5 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanza y=10,8m

Elementi	Travata Y=15,3 m			Armatura tesa		Armatura compressa	
	b mm	h mm	sezione -	ferri -	A _s mm ²	ferri -	A' _s mm ²
T1-3031	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-3132	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-3233	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-3334	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-3435	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-3536	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-3637	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1-3738	350	240	appoggio	4φ14	615	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157

Tabella A.6 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanza y=15,3m

Elementi	Travata Y=17,55m		Armatura tesa		Armatura compressa		
	b mm	h mm	sezione -	ferri -	A _s mm ²	ferri -	A' _s mm ²
T1-3940	350	240	appoggio	2φ10	157	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1S-12	350	240	appoggio	2φ14	308	2φ10	157
			campata	2φ14	308	2φ10	157
T1S-34	350	240	appoggio	2φ14	308	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157
T1S-45	350	240	appoggio	2φ14	308	2φ10	157
			campata	2φ10	157	2φ10	157

Tabella A.7 Armatura a flessione travata in direzione longitudinale x a distanza y=17,55m

La verifica delle sezioni progettate (mezzeria delle campate e i due appoggi), è condotta determinando i valori massimi delle tensioni su acciaio e calcestruzzo secondo le usuale procedure del metodo delle tensioni ammissibili per sezioni in c.a. a doppia armatura soggette a flessione semplice. Nota la posizione dell'asse neutro x_c , è possibile determinare le tensioni massime nei materiali determinate dal momento agenti M_s , utilizzando le seguenti espressioni:

$$x_c = \frac{n \cdot (A_s + A'_s)}{b} \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot (A_s \cdot d + A'_s \cdot c)}{n \cdot (A_s + A'_s)^2}} \right] \quad \text{Eq. A.6}$$

$$\sigma_c = \frac{M_s}{\frac{b \cdot x_c}{2} \cdot \left(h - \frac{x_c}{3} \right) + \frac{n \cdot A'_s}{x_c} \cdot (x_c - c) \cdot (d - c)} \quad \text{Eq. A.7}$$

$$\sigma_a = n \cdot \sigma_c \cdot \frac{d - x_c}{x_c} \quad \text{Eq. A.8}$$

$$\sigma'_a = n \cdot \sigma_c \cdot \frac{x_c - c}{x_c} \quad \text{Eq. A.9}$$

Le tensioni sollecitanti così calcolate si vanno a confrontare con le tensioni ammissibili dei materiali. In accordo con la normativa di

riferimento le sezioni risultano verificate se sono soddisfatte le seguenti disequazioni:

$$\sigma_c < \sigma_{a,cf} \quad \text{Eq. A.10}$$

$$\sigma_c < \sigma_{a,f} \quad \text{Eq. A.11}$$

$$\sigma'_c < \sigma_{a,f} \quad \text{Eq. A.12}$$

Le verifiche per gli elementi trave risultano essere tutte verificati.

A.3 PROGETTO E VERIFICA ARMATURA A TAGLIO

La normativa di riferimento prescriveva che la tensione tangenziale massima τ da valutarsi prescindendo dall'armatura eventualmente disposta per assorbirla, deve essere contenuta all'interno dei seguenti limiti:

Caso 1:

$$\tau_{c0} < \tau < \tau_{c1} \quad \text{Eq. A.13}$$

Il valore limite inferiore τ_{c0} può essere valutato come:

$$\tau_{c0} = 4 + \left(\frac{R_{ck} - 150}{75} \right) \quad \text{Eq. A.14}$$

Il valore del limite superiore τ_{c1} può essere valutato come:

$$\tau_{c1} = 14 + \left(\frac{R_{ck} - 150}{35} \right) \quad \text{Eq. A.15}$$

In questo caso la resistenza al taglio va affidata integralmente ad armature metalliche.

Caso 2:

$$\tau < \tau_{c0}$$

Eq. A.16

Non occorre armatura a taglio essendo le tensioni tangenziali assorbite interamente dal solo conglomerato. In ogni caso nelle travi si devono prevedere staffe per un minimo di tre a metro.

Caso 3:

$$\tau_{c1} < \tau$$

Eq. A.17

Per valori della tensione tangenziale maggiori dell'estremo superiore, occorre ridimensionare la sezione di calcestruzzo della trave, in quanto l'effetto della presenza delle armature risulterebbe inefficace. L'incremento delle dimensioni della sezione deve continuare fino al rispetto della condizione:

$$\tau < \tau_{c1}$$

Eq. A.18

La staffatura si esegue utilizzando tondini di diametro ϕ 6, ϕ 8, ϕ 10 generalmente a due braccia.

In fase di progettazione, quindi, la prima cosa da effettuare è quella di calcolare il valore della τ_{\max} . Il valore della tensione tangenziale τ_{\max} massima, viene determinato con la formula di *Jourawsky*:

$$\tau_{\max} = \frac{V_s \cdot S_n}{I_n \cdot b}$$

Eq. A.19

dove S_n rappresenta il momento statico rispetto all'asse neutro, e può essere valutato come:

$$S_n = n \cdot A'_s \cdot (d - X_c) \quad \text{Eq. A.20}$$

I_n rappresenta il momento d'inerzia rispetto all'asse neutro, ed è valutato come:

$$I_n = \frac{b \cdot X_c^3}{3} + n \cdot A_s \cdot (X_c - c)^2 + n \cdot A'_s \cdot (d - X_c)^2 \quad \text{Eq. A.21}$$

Il calcolo della tensione tangenziale massima viene fatto nelle sezioni dove si registra il taglio massimo.

Per la progettazione dell'armatura a taglio si è inoltre tenuto conto del contributo di resistenza a taglio dei ferri sagomati. Tale contributo è valutabile con la seguente formula:

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s_p} \cdot d \cdot \sigma_{s,f} \cdot (1 + \cot g_a) \cdot \sin a \quad \text{Eq. A.22}$$

;

Dove:

- A_{sw} è l'area dei ferri piegati;
- α è l'inclinazione dei ferri sagomati a 45°;
- $\sigma_{s,f}$ è la tensione di snervamento dell'acciaio
- d è l'altezza utile,
- s_p è il passo dei sagomati che può essere valutato con la seguente formula nel caso di $\alpha=45^\circ$:

$$s_p = \frac{A_{sw} \cdot d \cdot \sigma_{s,f} \cdot \sqrt{2}}{V_{sd}} \quad \text{Eq. A.23}$$

In cui V_{sd} è il taglio sollecitante massimo.

Si passa dunque alla progettazione dell'armatura trasversale a taglio. La norma dell'epoca imponeva che almeno il 40% del taglio sollecitante deve essere assorbito dall'armatura trasversale.

Dopo aver deciso il diametro delle staffe e l'angolazione rispetto all'orizzontale pari a 90°, si procede dunque con il calcolo delle staffe invertendo la formula di *Ritter-Möersch* ottenendo:

$$s = \frac{2 \cdot \omega_{st} \cdot \sigma_{s,f}}{0.4 \cdot \tau_{\max} \cdot b}$$

Eq. A.24

Il passo così calcolato viene arrotondato per difetto in modo tale da ottenere un numero intero. Per il progetto delle armature a taglio è stata fatta una distinzione analoga a quella fatta per il progetto dell'armatura a flessione, in particolare tra le travi appartenenti ai telai trasversali (travi emergenti) e le travi appartenenti ai telai longitudinali (travi a spessore).

L'armatura adottata per entrambe le tipologie di trave è caratterizzata da:

- staffe diametro ϕ 8;
- passo staffe pari a 25 cm, per ogni trave il passo viene assunto costante.

Si sono dunque rispettati anche i minimi di normativa che prescrivevano almeno 3 staffe a metro. Nella Figura A.1 si riporta un esempio di armatura utilizzata nel progetto oggetto dello studio.

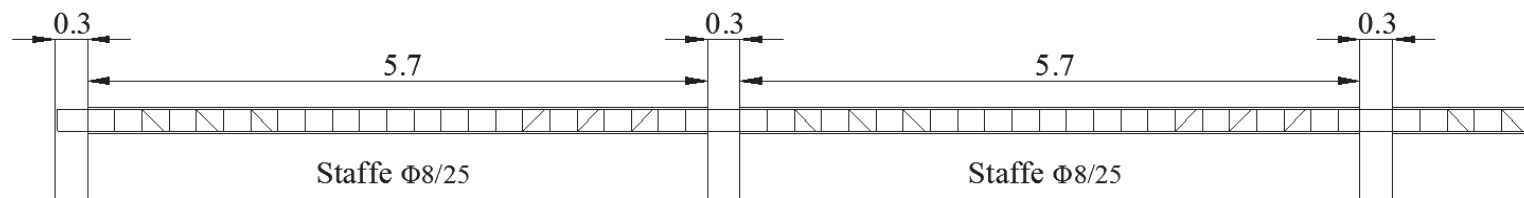


Figura A.1 Armature trasversali nelle travi

A.4 PROGETTO E VERIFICA ARMATURA DEI PILASTRI PER SFORZO NORMALE CENTRATO

Le armature dei pilastri, considerati sottoposti a sola compressione centrata, sono stati progettati considerando i minimi di normativa. Si è ritenuto che nel progetto originario non siano stati considerati effetti flessionali dovuti ai carichi verticali o all'azione del vento, trascurata in virtù anche dell'altezza limitata e della compattezza dell'edificio. I valori dei carichi verticali presenti ai diversi piani per i pilastri sono stati ricavati dalle analisi lanciate in SAP2000.

Il D.M. 30/05/74 prevedeva nei pilastri soggetti a compressione centrata o ad eccentricità, un quantitativo di armatura longitudinale di sezione non minore dello 0.6% della sezione di conglomerato strettamente necessaria per carico assiale, in base alla tensione ammissibile adottata, e compresa tra lo 0.3% e il 5% della sezione effettiva. Era prevista una staffatura di diametro minimo pari a 6mm, con un passo non superiore a 15 volte il diametro minimo delle barre longitudinali e con un massimo di 25 cm. Nel nostro caso, essendo noti i dati geometrici della sezione dei pilastri si passa direttamente al dimensionamento delle armature longitudinali, valutando la quantità minima di armatura fornita dal limite inferiore proposto dalla normativa:

$$A_{s,\min} = 0.003 \cdot A_{cls,eff} \qquad \text{Eq. A.25}$$

I risultati dei calcoli sono tradotti in quantitativi effettivi di armatura espressi in termini di numero e diametro di barre d'acciaio. In tutti i pilastri l'armatura è costituita da barre di diametro 14 mm. Nella Tabella A.8 vengono riportate nel dettaglio le armature per i pilastri del primo piano.

Elementi	b mm	h mm	ferri F	As,eff mm ²
PIL1-19	300	500	6φ14	923
PIL1-15	300	500	6φ14	923
PIL1-16	300	500	6φ14	923
PIL1-18	300	500	6φ14	923
PIL1-14	300	500	4φ14	615
PIL1-24	300	500	4φ14	615
PIL1-25	300	500	4φ14	615
PIL1-23	300	500	4φ14	615
PIL1-27	300	500	4φ14	615
PIL1-37	300	500	4φ14	615
PIL1-28	300	500	4φ14	615
PIL1-26	300	500	4φ14	615
PIL1-22	300	500	4φ14	615
PIL1-31	300	500	4φ14	615
PIL1-36	300	500	4φ14	615
PIL1-32	300	500	4φ14	615
PIL1-3	300	500	4φ14	615
PIL1-7	300	500	4φ14	615
PIL1-20	300	500	4φ14	615
PIL1-12	300	500	4φ14	615
PIL1-21	300	500	4φ14	615
PIL1-33	300	500	4φ14	615
PIL1-34	300	500	4φ14	615
PIL1-29	300	500	4φ14	615
PIL1-38	300	500	4φ14	615
PIL1-35	300	500	4φ14	615
PIL1-4	300	500	4φ14	615
PIL1-5	300	500	4φ14	615
PIL1-8	300	500	4φ14	615
PIL1-10	300	500	4φ14	615
PIL1-11	300	500	4φ14	615
PIL1-2	300	500	4φ14	615
PIL1-6	300	500	4φ14	615
PIL1-17	300	500	4φ14	615
PIL1-1	300	500	4φ14	615
PIL1-13	300	600	4φ14	615
PIL1-9	300	500	4φ14	615
PIL1-30	300	500	4φ14	615
PIL1-40	300	300	4φ14	615
PIL1-39	300	300	4φ14	615

Tabella A.8 Armatura Pilastri

Le armature ai piani superiori vengono riportate in allegato. In riferimento all'armatura trasversale, si è scelto di utilizzare staffe φ8 con passo costante pari a 25 cm.

Veridiche all'instabilità

Tale verifica viene condotta nel piano di massima snellezza del pilastro impiegando così il metodo ω , che consiste nel ridurre la tensione ammissibile $\sigma_{a,cc}$, per tener conto del carico di punta. Detto $\omega > 1$, il coefficiente riduttore delle tensioni risulta:

$$\frac{\omega \cdot N}{A_{ib}} \leq \sigma_{a,cc} \quad \text{Eq. A.26}$$

Il coefficiente ω diventa così un amplificatore dei carichi in funzione della snellezza $\lambda = \frac{l_0}{i}$.

I fenomeni di instabilità devono essere presi in considerazione per $\lambda > 50$, cosa che nel nostro progetto in esame non accade per nessun pilastro. Si è proceduto dunque con la seguente verifica:

$$\frac{N}{A_{ib}} \leq \sigma_{a,cc} \quad \text{Eq. A.27}$$

Con:

$$A_{ib} = A_{cls,eff} + n \cdot A_{s,eff} \quad \text{Eq. A.28}$$

Appendice B.

VALUTAZIONE DI VULNERABILITÀ SISMICA

Viene di seguito riportata la Valutazione di Vulnerabilità Sismica dell'edificio descritto al §5.2 a partire dalla definizione dell'azione sismica fino alla caratterizzazione delle cerniere plastiche e delle curve definizione di pushover.

B.1 VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicando la vita nominale V_N per un coefficiente d'uso C_U funzione della classe d'uso [2.4.3-NTC]. Per la struttura in esame è stato considerato un normale affollamento (classe d'uso II) [2.4.2-NTC], per cui, il coefficiente d'uso C_U assume un valore unitario. La vita nominale V_N è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter assolvere allo scopo al quale è stata destinata. La vita nominale dei diversi tipi di opere è riportata nella Tab. 2.4.1 delle NTC e deve essere precisata nei documenti di progetto. Per la struttura in esame si assume:

$$V_V = 50\text{anni} \quad \text{Eq. B.1}$$

Per cui

$$V_N = C_U \cdot V_N = 1 \cdot 50 = 50\text{anni} \quad \text{Eq. B.2}$$

Noto il periodo di riferimento, le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla *Pericolosità sismica di base* del sito di costruzione definita in termini di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione $S_e(T)$,

con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} , nel periodo di riferimento V_R .

Nei confronti delle azioni sismiche, gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti. Le NTC prevedono quattro stati limite: due di esercizio, Stato Limite di Operatività (SLO) e Stato Limite di Danno (SLD); e due ultimi: Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV, Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC) [3.2.1 – NTC].

Facendo riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) la probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente è:

$$SLV \rightarrow P_{VR} = 10\% \quad \text{Eq. B.3}$$

Note P_{VR} , il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R , espresso in anni è pari a [Allegato A-NTC]:

$$SLV \rightarrow T_R = -\frac{V_R}{\ln(1-P_{VR})} = -\frac{50}{\ln(1-0.10)} = 475 \text{anni} \quad \text{Eq. B.4}$$

Noto il periodo di ritorno dell'azione sismica, le forme spettrali sono definite a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione.

B.1.1 Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche

La forma dello spettro di risposta elastico inoltre dipende dalla categoria di sottosuolo e dalle condizioni topografiche attraverso i coefficienti S_s , S_r e C_c (par. 3.2.3.2.1, NTC 2008). Nel presente caso di studio si è ipotizzato che il sottosuolo rientri all'interno della categoria di sottosuolo B (Tabella 3.2.II, NTC 2008). Si suppone inoltre che la struttura sorga su una superficie

pianeggiante per cui secondo la classificazione delle NTC (cap.3.2.2. Tabella 3.2. IV) si è assunta una categoria topografica T₁.

B.1.2 Spettri di risposta

L'azione sismica di riferimento è definita a partire dai parametri a_g, F₀, T_c * individuati nell'allegato B alle NTC in funzione dei punti del reticolo di riferimento in cui è stata suddiviso tutto il territorio italiano e del periodo di ritorno dell'azione sismica T_R. I punti del reticolo sono in totale 10751 definiti in termini di Latitudine e Longitudine. Supposto che le coordinate geografiche del sito siano:

Longitudine=14,3466

Latitudine=40,9102

Dalla tabella 1 dell'allegato B delle NTC 2008 si ricavano i valori riportati nella tabella di seguito:

S.L.V. T _R =475	
anni	
a _g (g)	0,169
F ₀	2,386
T _c *	0,348

Tabella B.1 Parametri di pericolosità sismica di base

Nota il periodo di ritorno e quindi lo stato limite considerato, lo spettro di risposta elastico della componente orizzontale è definito dalle Eq. 3.2.4 [3.2.3.2.1-NTC] di seguito riportate:

$$\begin{aligned}
 0 \leq T \leq T_B & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T \leq T_C & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \\
 T_C \leq T \leq T_D & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)
 \end{aligned}$$

Dove S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione dove S_s è il coefficiente

di amplificazione stratigrafica [Tabella 3.2.V-NTC], S_T è il coefficiente di amplificazione topografica [Tabella 3.2.VI-NTC] pari 1,0 per categoria topografica T_1 ;

T_C è il periodo corrispondente alla fine del tratto ad accelerazione costante dato da $T_C = C_C \cdot T_C^*$, in cui C_C è in funzione della categoria di sottosuolo [tabella 3.2.C-NTC] e pari a:

$$C_C = 1.05 \cdot (T_C^*)^{-0.33} \quad \text{Eq. B.5}$$

T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante, pari a:

$$T_B = \frac{T_C}{3} \quad \text{Eq. B.6}$$

T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, espresso in secondi mediante la relazione:

$$T_D = 4,0 \cdot \left(\frac{a_g}{g} \right) + 1.6 \quad \text{Eq. B.7}$$

Nella Tabella B.2 sono presenti tutti i parametri necessari per la costruzione dello spettro elastico all'SLV:

a_g [g]	F_0 [-]	T_C^* [s]	S_S [-]	C_C [-]	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
0,169	2,38	0,34	1,2	1,36	0,16	0,47	2,28

Tabella B.2 Parametri per il calcolo dello spettro elastico all'SLV

Lo spettro di risposta elastico delle componenti orizzontali del sisma vengono valutati con riferimento ad uno smorzamento convenzionale del 5% e sono definiti a partire dai valori della Tabella B.2.

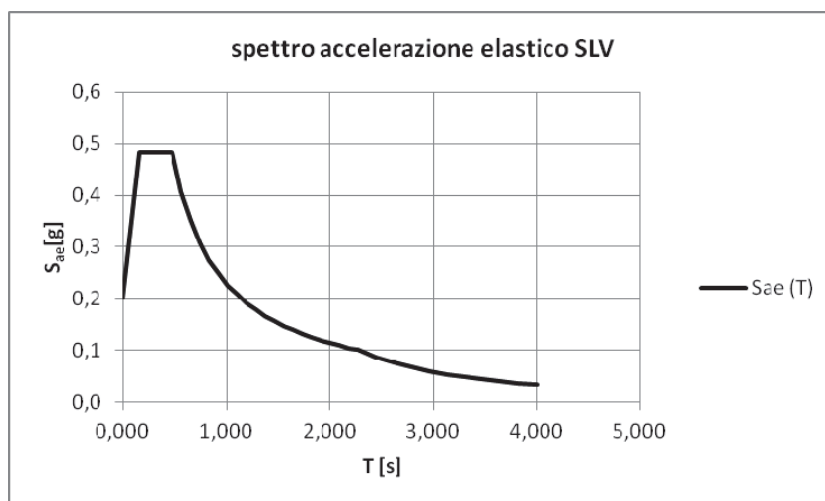


Figura B.1 Spettro elastico in accelerazione allo SLV

Lo spettro di risposta elastico in termini di spostamento $S_{De}(T)$, potrà ottenersi per trasformazione diretta dello spettro di risposta elastico delle accelerazioni usando la seguente espressione:

$$S_{De}(T) = S_e(T) \times \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \tag{Eq. B.8}$$

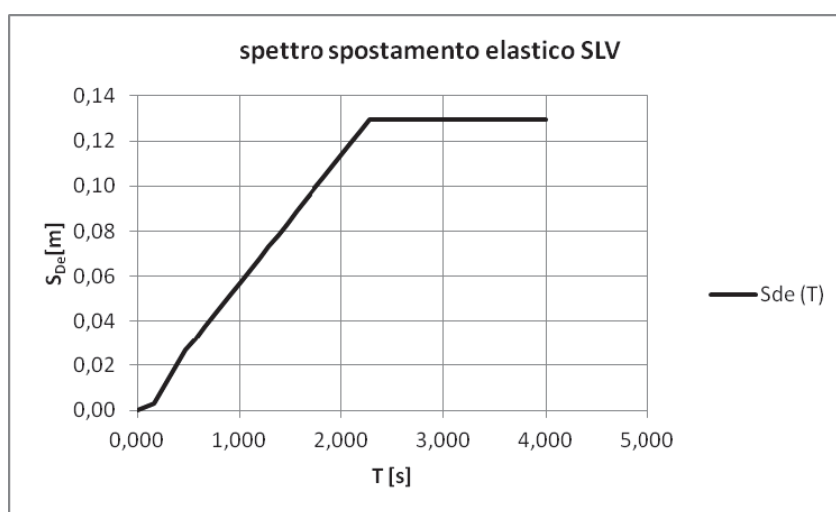


Figura B.2 Spettro elastico in spostamento allo SLV

B.1.3 Analisi statica non lineare

Per la valutazione di vulnerabilità sismica dell'edificio è stata utilizzata l'analisi statica non lineare (*Pushover*), dove, si applicano in maniera incrementale al modello della struttura particolari distribuzioni di carichi orizzontali; queste hanno il compito di spingere in campo non lineare la struttura fino a portarla al collasso. In particolare durante l'analisi, i carichi orizzontali vengono tutti scalati, mantenendo invariati i rapporti relativi fra gli stessi ai vari piani, in modo da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale di un punto di controllo della struttura.

Un importante aspetto riguarda la scelta di un'appropriata distribuzione per le forze orizzontali: essa deve approssimare, infatti, la distribuzione delle forze d'inerzia presenti sulla struttura durante il sisma. Il campo delle assunzioni ragionevoli è relativamente ristretto e conduce a risultati simili per distribuzioni in due gruppi: le distribuzioni principali e le distribuzioni di forze secondarie. Si devono considerare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti l'una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2) di seguito illustrate.

Le distribuzioni di forze principali (Gruppo 1) sono:

- Distribuzione proporzionale alle forze statiche;
- Distribuzione corrispondente ad una distribuzione di accelerazioni proporzionali al modo di vibrare;
- Distribuzione corrispondente alla distribuzione dei tagli di piano calcolati da un'analisi dinamica lineare.

Le prime due possono essere applicate soltanto se il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa non superiore al 75%, mentre per la terza è necessario che il periodo fondamentale della struttura sia superiore a T_c .

Le distribuzioni secondarie (Gruppo 2) sono invece le seguenti:

- Distribuzione uniforme di forze, da intendersi come derivata da una distribuzione uniforme di accelerazioni lungo l'altezza della costruzione;
- Distribuzione adattiva, che cambia al crescere dello spostamento del punto di controllo in funzione della plasticizzazione della struttura.

Modellazione delle cerniere plastiche

Il comportamento post-elastico (non lineare) è valutato mediante un modello a plasticità concentrata nel quale si considera la plasticità tutta

concentrata in punti localizzati agli estremi degli elementi definiti come cerniere plastiche. E' in questi punti, che una volta superata la soglia elastica, si concentrano le deformazioni anelastiche ed esse si definiscono mediante una relazione momento-curvatura in ciascuna estremità dell'elemento strutturale (trave e pilastro). Nel caso in esame, la valutazione del legame momento curvatura dei pilastri è effettuata nell'ipotesi di uno sforzo assiale pari a quello agente in condizione di carico gravitazionale da combinazione sismica. La definizione della curva caratteristica della cerniera plastica è stata effettuata sulla base del comportamento non lineare della sezione di estremità dell'elemento e della luce di taglio L_v . In generale, il comportamento non lineare della sezione di estremità, definito dal legame momento curvatura $M-\phi$, può sinteticamente esprimersi mediante una legge quadrilineare definita da una fase elastico-lineare sino alla formazione della prima fessura, (θ_{cr}, M_{cr}) ; da una fase fessurata durante la quale si registra la formazione/apertura di ulteriori fessure fino allo snervamento (θ_y, M_y) ; da una fase post-elastica, definita da una notevole diminuzione di rigidità con conseguente aumento di deformabilità sino all'attingimento di un picco di resistenza flessionale (θ^*, M_{max}) ed infine, da una fase discendente caratterizzata da una diminuzione di capacità resistente e da un'elevata capacità deformativa fino all'attingimento della condizione ultima (θ_u, M_u) .

Nel caso in esame le cerniere plastiche sono state modellate con un legame momento-rotazione del tipo trilineare che offre la possibilità di tenere in conto anche del momento di prima fessurazione (i.e. *cracking*). I punti caratteristici del diagramma momento rotazione delle cerniere plastiche del modello in esame sono:

- Rotazione di prima fessurazione;
- Rotazione di snervamento;
- Rotazione ultima;
- Momento di prima fessurazione;
- Momento di snervamento;
- Momento ultimo.

Il momento di cracking è calcolato attraverso la seguente espressione:

$$M_{cr} = \left(\frac{N}{A} + f_{ctm} \right) \cdot \frac{bh^2}{6} \quad \text{Eq. B.9}$$

Dove f_{ctm} è la resistenza a trazione del calcestruzzo.

La rotazione associata al cracking è stata calcolata come il prodotto della curvatura di cracking per la luce di taglio considerando quindi una formulazione di tipo elastica:

$$\theta_{cr} = \frac{M_{cr} \cdot L_v}{3 \cdot EI} \quad \text{Eq. B.10}$$

Dove il modulo di elasticità E è calcolato come visto in precedenza nel § 5.2.1 e abbattuto del 50% per le travi e del 70% per i pilastri come consentito dalle NTC al § 7.2.6.

La valutazione della rotazione di snervamento può effettuarsi in funzione della corrispondente curvatura, e dei due contributi deformativi dovuti al taglio e allo scorrimento delle armature (§ C8.7.2.5. [02]):

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{L_v}{h} \right) + 0.13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \text{Eq. B.11}$$

Dove:

ϕ_y è la curvatura a snervamento della sezione terminale;

h è l'altezza della sezione;

d_b è il diametro (medio) delle barre longitudinali (in mm);

f_c e f_y sono rispettivamente la resistenza a compressione del calcestruzzo e la resistenza a snervamento dell'acciaio longitudinale in (MPa), ottenute come media delle prove eseguite in sito e da fonti aggiuntive di informazione, diviso per il fattore di confidenza appropriato in relazione al Livello di Conoscenza raggiunto.

Per quanto riguarda la rotazione ultima è stata utilizzata la formula semplificata presente nella circolare n.617 (C8A.6.1) [02]:

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0.5 L_{pl}}{L_v} \right) \right) \quad \text{Eq. B.12}$$

dove:

γ_{el} vale 1.5 per elementi primari è 1.0 per i secondari;

θ_y è la rotazione rispetto alla corda allo snervamento definita prima;

ϕ_y è la curvatura allo snervamento valutata considerando l'acciaio alla deformazione di snervamento ε_{sy} ;

ϕ_u è la curvatura ultima valutata considerando le deformazioni ultime del conglomerato e dell'acciaio;

L_v è la luce di taglio;

L_{pl} è la lunghezza della cerniera plastica valutata come (§C8A.6.1 [02]);

$$L_{pl} = 0.1L_v + 0.17h + 0.24 \frac{d_b L f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \text{Eq. B.13}$$

La valutazione di una prestabilita luce di taglio L_v , ossia del punto di nullo del diagramma dei momenti rispetto all'estremità dell'elemento, non è di facile risoluzione. Una semplice analisi lineare consente di valutare in maniera esatta la posizione del punto di flesso durante la fase a comportamento lineare della struttura. D'altra parte, la formazione delle prime cerniere plastiche conduce ad una redistribuzione delle sollecitazioni flettenti con conseguente traslazione del punto di flesso. Il comportamento post-elastico dell'elemento è influenzato dal punto di flesso, infatti, la variazione della sua posizione conduce ad una diversa caratterizzazione meccanica della cerniera plastica (problemi di convergenza del calcolo non lineare). Tuttavia l'assunzione di una luce di taglio prefissata consente di poter definire a priori la cura caratteristica della cerniera plastica e di ridurre l'onere computazionale durante il processo di analisi [52]. In generale la luce di taglio L_v può determinarsi:

1. Come metà della luce dell'elemento ($L_v=0.5L$);
2. Dal diagramma dei momenti flettenti presenti lungo l'elemento valutata mediante un'analisi elastica lineare (statica o modale);
3. Dal diagramma dei momenti flettenti presenti lungo l'elemento, valutato mediante un'analisi non lineare (es. analisi limite), corrispondente ad una configurazione deformata caratterizzata da uno spostamento del punto di controllo pari allo spostamento sismico richiesto.

Nel caso in esame la luce di taglio è stata assunta pari al $0.5L$.

La figura mostra un tipico esempio di legame momento rotazione utilizzato nelle analisi della struttura del presente caso di studio; si fa notare il valore della rotazione pari a $\frac{3}{4} \theta_u$, secondo quanto previsto dalla Circolare 617/2009, risulta il limite convenzionale della rotazione ammessa per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). Ovviamente, nell'individuazione della massima capacità di spostamento della struttura, bisogna non soltanto considerare l'attingimento della rotazione pari a $\frac{3}{4} \theta_u$, ma verificare l'eventuale presenza di meccanismi di piano verificatisi prima del raggiungimento di tale stato limite convenzionale.

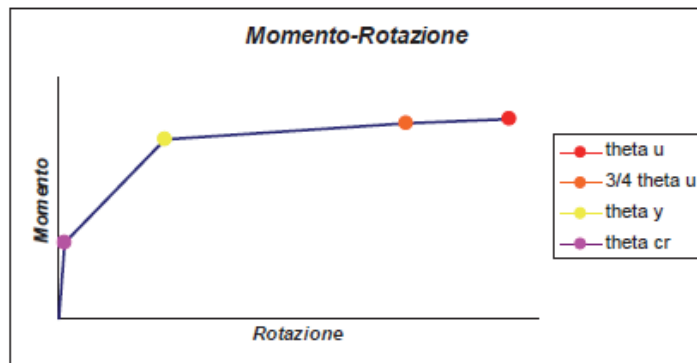


Figura B.3 Modello cerniera plastica trilineare incrudente

Calcolato il diagramma momento-rotazione per tutti gli elementi, ad essi bisogna apportare una modifica prima di inserirli nel programma di calcolo SAP 2000. Tale modifica consiste nella traslazione di una quantità pari alla rotazione di cracking, in quanto le rotazioni elastiche sono calcolate in automatico dal programma di calcolo. Il diagramma assume, quindi, la forma bilineare riportata in Figura B.4.

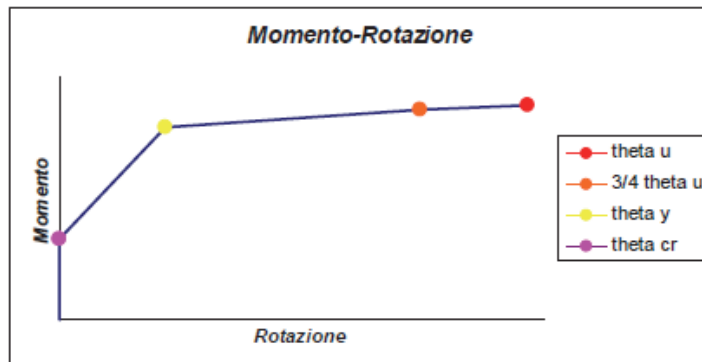


Figura B.4 Modello cerniera plastica bilineare incrudente

In alcuni casi la convergenza del calcolo risultava impossibile, è stata quindi apportata una modifica al legame momento-rotazione imponendo il momento ultimo pari al momento di snervamento, rendendo così orizzontale il tratto di curva dopo il momento di snervamento come riportato nella Figura B.5, in modo tale da rendere più agevole l'onere computazionale nella fase di analisi.

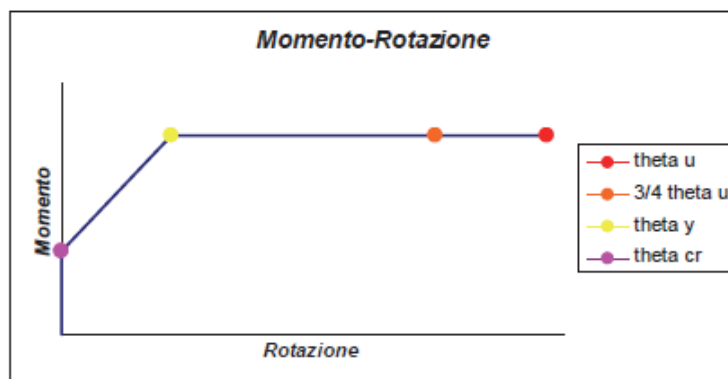


Figura B.5 Modello cerniera plastica bilineare plastico

Calcolo dei pesi sismici

Il calcolo dei pesi sismici, così come esplicitato in normativa, si esegue facendo riferimento ai carichi gravitazionali secondo la seguente combinazione (Combinazione Verticale per Sisma):

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \tag{Eq. B.14}$$

Il coefficiente ψ è pari a 0.3 dato che l'edificio in esame, essendo classificato per ambienti ad uso residenziale, ricade nella categoria A (Tabella 2.5.I, NTC2008), Il peso dei singoli elementi viene calcolato in automatico dal software SAP2000, inserito in un apposito caso di carico denominato dead load ed infine sommato secondo la formula precedente agli altri carichi G_1 , G_2 e Q_k ricavati precedentemente nel § A.1 del progetto simulato. Per l'effettiva assegnazione delle masse al modello SAP2000, si è provveduto a definire le fondi di massa, mediante il comando mass source, nel rispetto della combinazione sopra citata. Sempre mediante il software SAP2000 si ottengono le masse di piano M ricavate dal peso W dei singoli impalcati soggetti alla stessa combinazione di carico.

Impalcato	W	M	ΔM
	[kN]	[t]	%
I	8875,686	904,759	-
II	8810,204	898,084	-0,74%
III	7733,213	788,299	-12,22%

Tabella B.3 Masse e pesi sismici

Si valuta inoltre la rigidezza laterale dei singoli piani andando ad applicare in corrispondenza dei baricentri di piano una distribuzione di forze statiche proporzionali alla massa di piano secondo l'espressione 7.3.6 NTC 2008:

$$F_i = \frac{F_h \cdot z_i \cdot W_i}{\sum_i W_i \cdot z_i} \quad \text{Eq. B.15}$$

W_i sono i pesi delle masse ai piani i ;

z_i sono le altezze dei piani i rispetto alla fondazione.

La rigidezza laterale è così ottenuta dal rapporto del taglio di piano e dello spostamento relativo registrato al piano separatamente nelle due direzioni X e Y.

Direzione Y				
T	δy	δr	K lat	ΔK lat
kN	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]
1000	0,001947	0,001947	513610,7	-
808	0,003778	0,001831	441288,9	-16,4%
454	0,004919	0,001141	397896,6	-10,9%

Tabella B.4 Variazione rigidezza laterale direzione Y

Direzione X				
T	δx	δr	K lat	ΔK lat
kN	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]
1000	0,007384	0,007384	135428	-
808	0,016174	0,00879	91922,64	-47,3%
454	0,022679	0,006505	69792,47	-31,7%

Tabella B.5 Variazione rigidezza laterale direzione X

Nella Tabella B.5 si nota come vi sia una variazione di massa nel passare da un impalcato all'altro per cui è possibile evidenziare un'irregolarità di rigidezza dell'edificio. Dalle valutazioni fatte è possibile desumere che l'edificio risulta irregolare in altezza in quanto, pur non superando la variazione di massa del 25%, viene superato il limite di riduzione di rigidezza del 30% fissato dalla norma (7.2.2 NTC2008). Sono rispettati, invece, i criteri di regolarità in piano, pertanto l'edificio di può ritenere irregolare in altezza e regolare in pianta.

Distribuzione di forze lungo la direzione X

Per la struttura in esame, la massa partecipante del modo di vibrare fondamentale lungo x è pari all'83%, per cui, è stato possibile utilizzare una distribuzione proporzionale alle forze statiche del Gruppo 1, ed una distribuzione derivata da una distribuzione uniforme di accelerazioni lungo l'altezza della costruzione, per il Gruppo 2.

Per la distribuzione di forze, note le masse M di ogni singolo impalcato sono state successivamente moltiplicate per lo spostamento relativo al modo di vibrazione lungo la direzione x, ϕ_i , infine quest'ultima distribuzione è stata normalizzata rispetto al valore massimo, come riportato in Tabella B.6.

Gruppo 1 (direzione X)				
Impalcato	Masse [kNs ² /m]	Modo1 X ϕ_i	Massa*displ M* ϕ_i	F _y (Dist. 1)
1	904,75	0,32	285,2	0,49
2	898,08	0,70	629,0	0,92
3	788,30	1,00	788,3	1

Tabella B.6 Distribuzione di forze proporzionali al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrazione

Per la distribuzione di forze del gruppo 2, le masse dei singoli impalcati sono state normalizzate rispetto al valore massimo ottenendo così la distribuzione di forze proporzionale alle masse, come riportato in

Gruppo 2 (direzione X)		
Impalcato	Masse	F_y
	[kNs ² /m]	(Dist. 1)
1	904,75	1
2	898,08	0,99
3	788,30	0,87

Tabella B.7 Distribuzione di forze proporzionali alle masse

Distribuzione di forze lungo la direzione Y

La massa partecipante del modo di vibrare fondamentale lungo y è pari al 69% per cui si è considerate per il Gruppo 1 una distribuzione di forze corrispondente ai tagli di piano calcolati da un'analisi dinamica lineare verificando preventivamente che $T > T_c$, e per il Gruppo 2 una distribuzione di forze derivata da una distribuzione uniforme di accelerazioni lungo l'altezza della costruzione.

Per la distribuzione del Gruppo 1 è stata condotta un'analisi dinamica lineare al fine di poter risalire alla distribuzione dei tagli di piano, la quale è stata normalizzata rispetto al valore massimo, valutando, quindi che $T = 0,61$ risulta maggiore di $T_c = 0,47$.

Gruppo 1 (direzione Y)		
Impalcato	Taglio	F_y
	[kNs ² /m]	(Dist. 1)
1	2037	0,475
2	3605	0,841
3	4289	1,000

Tabella B.8 Distribuzione di forze proporzionale ai tagli di piano

Analogamente a come è stato fatto lungo la direzione x, la distribuzione per il Gruppo 2, è stata valutata normalizzando rispetto al valore massimo la distribuzione delle masse dei singoli impalcati:

Gruppo 2 (direzione X)		
Impalcato	Masse	F_y
	[kNs ² /m]	(Dist. 1)
1	904,75	1
2	898,08	0,99
3	788,30	0,87

Tabella B.9 Distribuzione di forze proporzionali alle masse

Confronti con analisi dinamiche non lineari hanno evidenziato che distribuzioni di forze proporzionali al primo modo colgono meglio la risposta dinamica fino a che la struttura rimane in campo elastico, mentre quando si raggiungono grandi deformazioni la risposta dinamica può risultare meglio rappresentata da distribuzioni di forze proporzionali alle masse. Quindi sono state applicate alla struttura quattro distribuzioni per ogni direzione principale dell'edificio, due nella direzione positiva e due nella direzione negativa, per un totale di otto distribuzioni, quattro per la direzione y e quattro per la direzione x. Considerando anche gli effetti dell'eccentricità accidentale da otto combinazioni si passa a sedici combinazioni. Si tiene conto dell'eccentricità accidentale applicando le forze delle varie combinazioni ad una distanza dal baricentro G pari al 5% della lunghezza della struttura per le due direzione x e y. Al fine di poter semplificare l'individuazione delle sedici combinazioni utilizzare viene riportato nella Figura B.6 di seguito uno schema esemplificativo dell'applicazione delle forze per le varie combinazioni. Una volta applicate le distribuzioni sono state condotte le singoli analisi non lineari in maniera separata per ogni singola distribuzione.

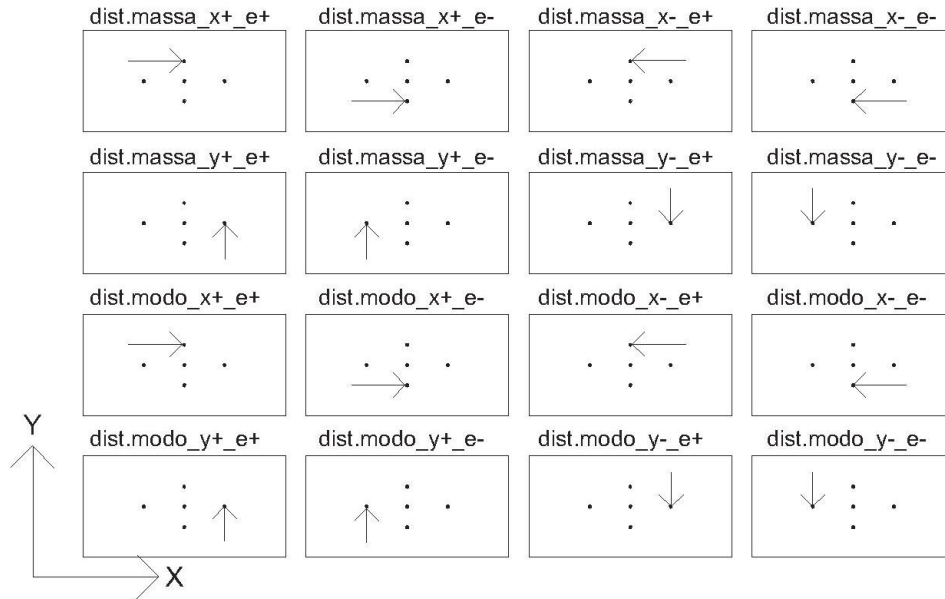


Figura B.6 Sedici combinazioni applicate alla struttura

B.1.4 Valutazione della sicurezza

La valutazione della sicurezza si articola sostanzialmente in tre fasi: dapprima si definiscono le curve di capacità della struttura in base a delle date distribuzioni di forze, successivamente le curve di capacità vengono dapprima trasformate in curve relative allo SDOF e successivamente bilinearizzate con criteri di uguaglianza delle aree; infine si valuta la richiesta in termini di spostamento dello SDOF equivalente

Curve di capacità

In seguito alla caratterizzazione, per ciascun elemento trave e pilastro, delle cerniere plastiche ed alla definizione delle diverse distribuzioni di forze da applicare alla struttura, è stata condotta l'analisi statica non lineare del modello.

Tale analisi è stata condotta in controllo di spostamento ed il punto scelto deve essere tale che il suo spostamento sia rappresentativo del comportamento globale della struttura e per tale motivo è stato scelto un punto dell'ultimo impalcato. Dall'analisi si ottiene una curva di capacità che rappresenta il valore dello spostamento d_c della struttura al crescere del taglio alla base F_b . Una volta condotte le analisi si ottengono sedici curve di capacità, una per ogni distribuzione.

Distribuzione di forze proporzionali alle masse: Curve di capacità in direzione longitudinale X

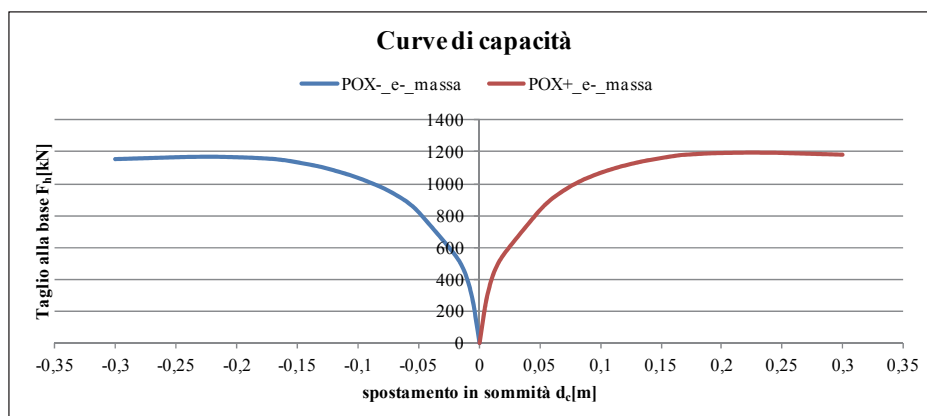


Figura B.7 Distribuzione di forze nell'eccentricità negativa (-5%yg), positiva e negativa

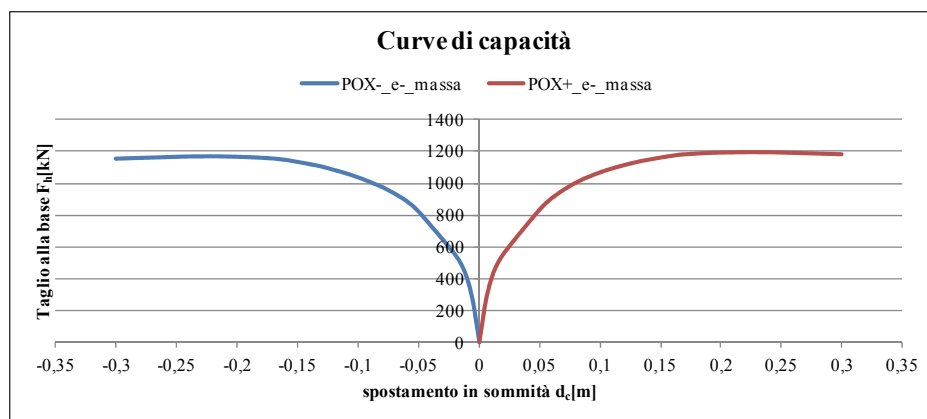


Figura B.8 Distribuzione di forze nell'eccentricità positiva (+5%yg), positiva e negativa

Distribuzione di forze proporzionali alle masse: Curve di capacità in direzione trasversale Y

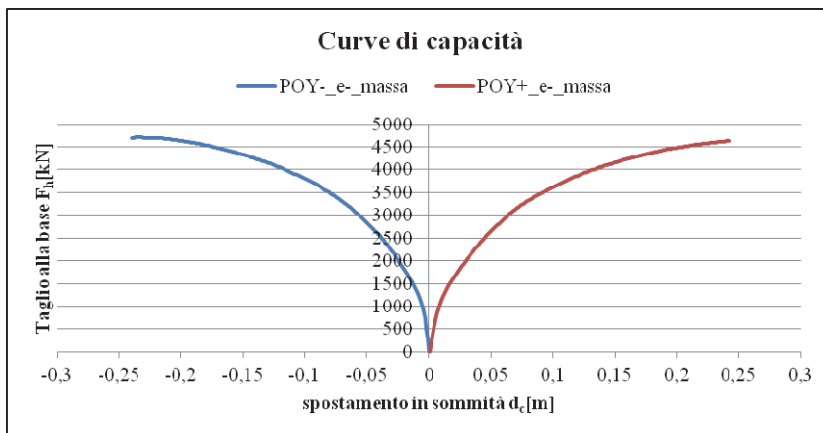


Figura B.9 Distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%x_g$), positiva e negativa

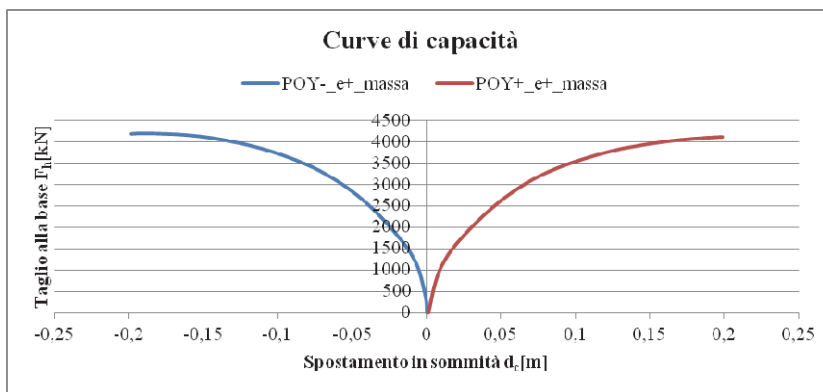


Figura B.10 Distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%x_g$), positiva e negativa

Distribuzione di forze proporzionale al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrazione: curve di capacità in direzione longitudinale X

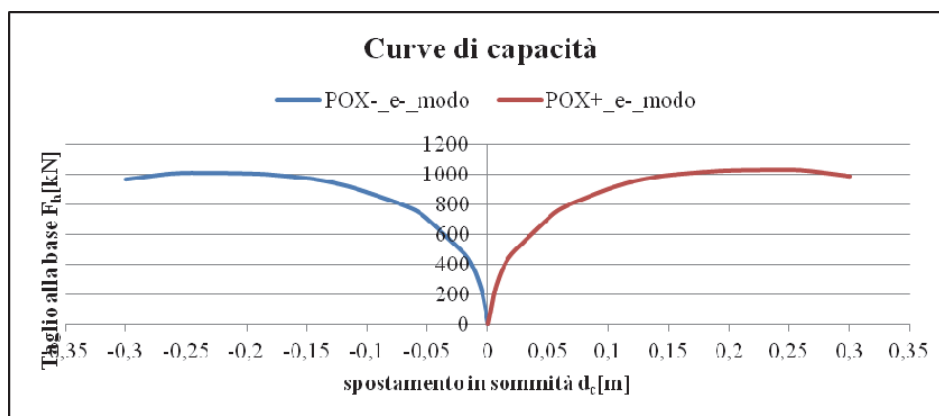


Figura B.11 Distribuzione di forze nell'eccentricità negativa ($-5\%y_g$), positiva e negativa

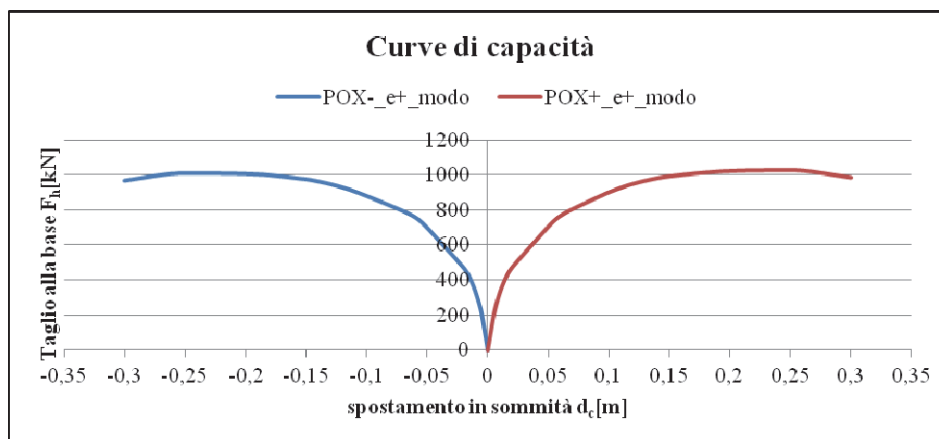


Figura B.12 Distribuzione di forze nell'eccentricità positiva ($+5\%y_g$), positiva e negativa

Distribuzione di forze proporzionali ai tagli di piano: curve di capacità in direzione trasversale Y

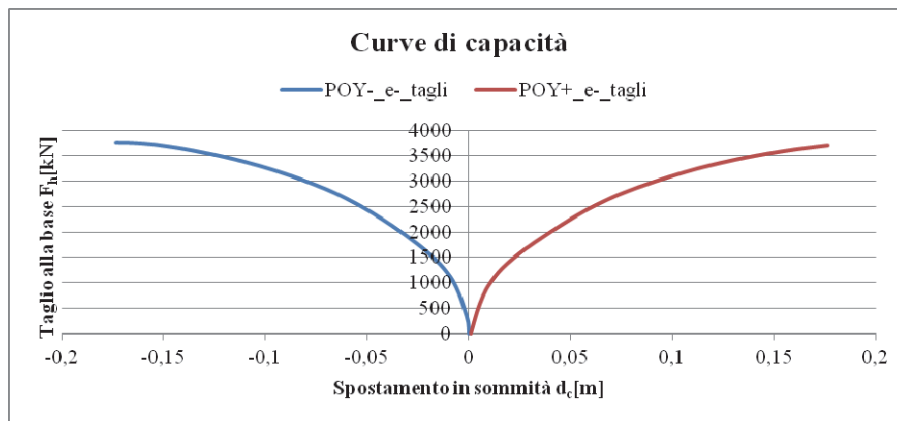


Figura B.13 Distribuzione di forze nell'eccentricità negativa (-5% x_g), positiva e negativa

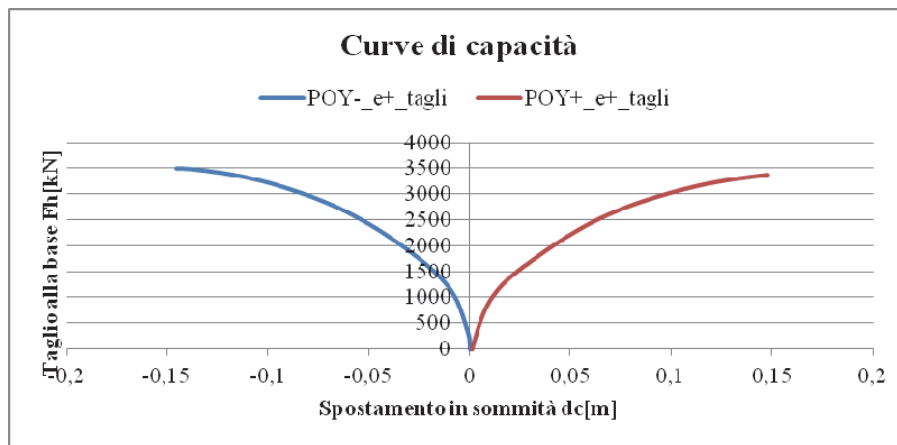


Figura B.14 Distribuzione di forze nell'eccentricità positiva (+5% x_g), positiva e negativa

Determinazione della domanda

La domanda, in termini di sollecitazioni e deformazioni, si ottiene in corrispondenza dei valori di spostamento individuati sulla curva di capacità della struttura relativi alla massima risposta attesa per le azioni corrispondenti ai diversi stati limite. Per calcolare questi punti, si deve ridurre la struttura ad un modello equivalente ad un grado di libertà. Infatti, il passaggio dal modello iniziale a più gradi di libertà (M-gdl) ad un modello equivalente ad un grado di libertà (1-gdl) permette di utilizzare le informazioni derivanti dagli spettri elastici di risposta, e quindi di calcolare

le sollecitazioni a cui la struttura deve essere in grado di resistere per i diversi stati limite.

Sistema bilineare equivalente

Il sistema bilineare equivalente è valutato al fine di determinare la richiesta di spostamento per lo stato limite preso in esame. A tale scopo è necessario trasformare il sistema ad n gradi di libertà (MDOF) in un sistema ad un solo grado di libertà equivalente (SDOF), secondo la procedura descritta dalla circolare n.617. Indicando con ϕ il vettore normalizzato della struttura nella direzione in esame, si valuta il coefficiente di partecipazione, Γ :

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} \qquad \text{Eq. B.16}$$

Dove m_i rappresenta la massa dell'i-esimo impalcato e la sommatoria al numeratore rappresenta la massa generalizzata ovvero la massa equivalente del sistema SDOF. Nel caso in esame il coefficiente di partecipazione Γ nelle due direzioni longitudinale X e trasversale Y è pari a:

$$\Gamma = 1,29$$

$$\Gamma = 1,26$$

La curva di capacità relativa al sistema ad n gradi di libertà viene scalata mediante il coefficiente di partecipazione Γ in modo tale da determinare la curva forza-spostamento del sistema ad un grado di libertà tramite le seguenti relazioni:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma}$$

$$d^* = \frac{d_c}{\Gamma}$$

Alla curva di capacità del sistema equivalente occorre ora sostituire una curva bilineare avente un primo tratto elastico ed un secondo tratto perfettamente plastico. Detta F_{bu} la resistenza massima del sistema strutturale ed $F^*_{bu}=F_{bu}/\Gamma$ la resistenza massima del sistema equivalente, il tratto elastico si individua imponendone il passaggio per il punto $0.6F^*_{bu}$ della curva di capacità del sistema equivalente, la forza di plasticizzazione F^*_y si individua imponendo l'uguaglianza delle aree sottese dalla curva

bilineare e dalla curva di capacità per lo spostamento massimo d^*u corrispondente ad una riduzione di resistenza $0.15F_{bu}^*$.

Ciò consente di ricavare la rigidezza k^* e conseguentemente il periodo elastico T^* del sistema bilineare equivalente ad un grado di libertà mediante la seguente espressione:

$$T^* = 2\pi\sqrt{\frac{m^*}{k^*}} \qquad \text{Eq. B.17}$$

In cui m^* , massa generalizzata, è pari alla $\Sigma m^* \cdot \phi^*$.

Nelle figure seguenti sono riportate le curve forza-spostamento del sistema ad un grado di libertà con riferimento alle direzioni analizzate e alle distribuzioni di forze orizzontali adottate, proporzionali alle masse, proporzionali al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrazione e proporzionali ai tagli di piano (Dist. 3) nel caso della direzione y (massa partecipante minore del 75%).

Distribuzione di forze proporzionali alle masse: sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale X

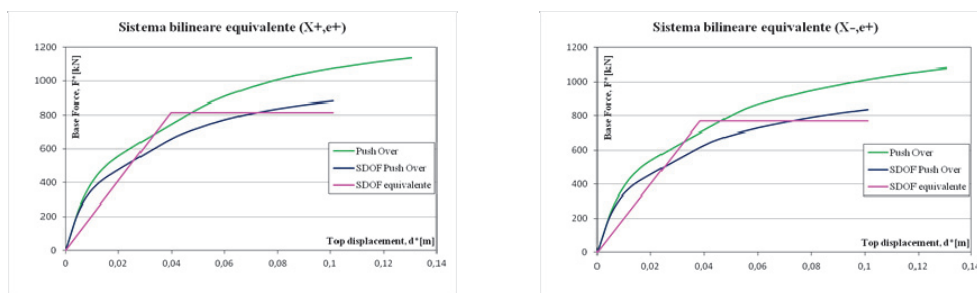


Figura B.15 Sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità positiva (+5%yg)

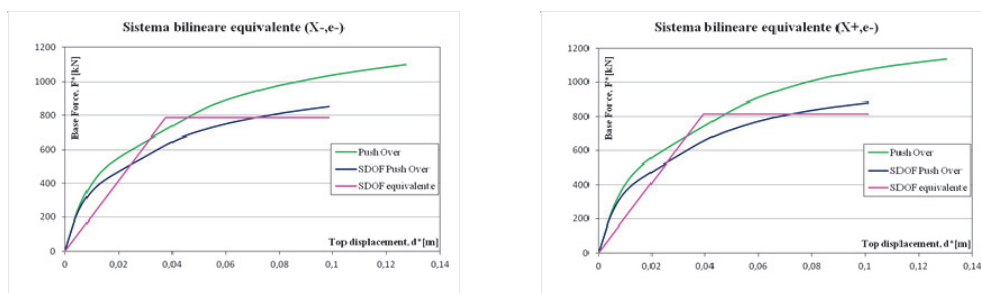


Figura B.16 Sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità negativa (-5%yg)

	Direzione X+,e+		Direzione X+,e-	
	Massa	Modo	Massa	Modo
Γ	1,29		1,29	
F*y [kN]	815,6	709,1	815,5	709,0
d*y [m]	0,040	0,043	0,040	0,043
k*[kN/m]	20600,2	16661,7	20615,5	16673,0
m*[kNs ² /m]	1702,5	1702,5	1702,5	1702,5
T*[sec]	1,8	2,0	1,8	2,0

Tabella B.10 Definizione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà

Distribuzione di forze proporzionali alle masse: sistema bilineare equivalente in direzione trasversale Y

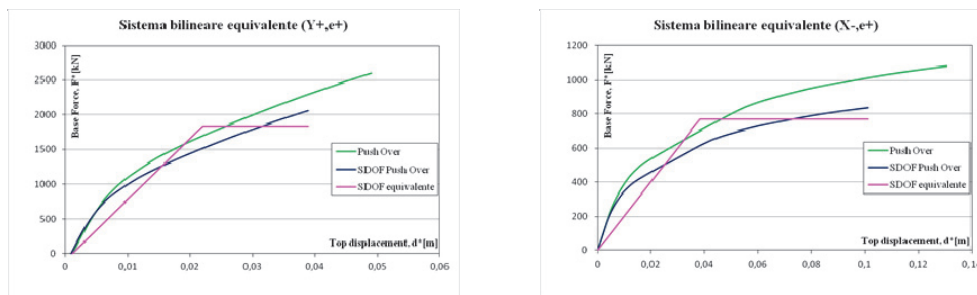


Figura B.17 Sistema bilineare equivalente in direzione trasversale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità positiva (+5% x_g)

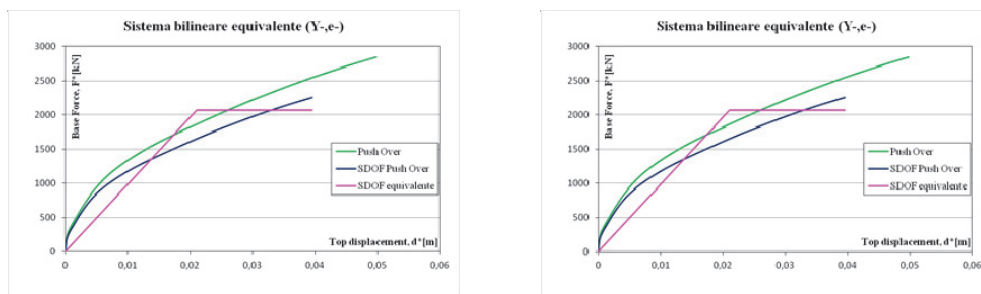


Figura B.18 Sistema bilineare equivalente in direzione trasversale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità negativa (-5% x_g)

	Direzione X-, e-		Direzione X-, e+	
	Massa	Modo	Massa	Modo
Γ		1,29		1702,52
F^*y [kN]	786,9	688,1	769,5	688,1
d^*y [m]	0,038	0,041	0,038	0,041
k^* [kN/m]	20914,3	16850,8	20067,7	16802,3
m^* [kNs ² /m]	1702,5	1702,5	1702,5	1702,5
T^* [sec]	1,8	2,0	1,8	2,0

Tabella B.11 Definizione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà

Distribuzione di forze proporzionali al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrazione: sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale X

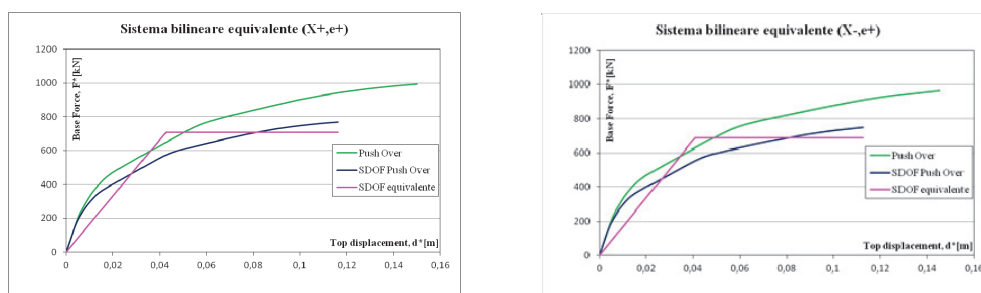


Figura B.19 Sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità positiva (+5%yg)

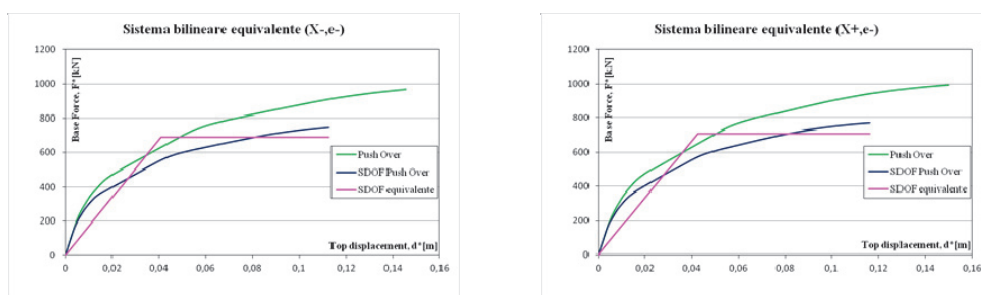


Figura B.20 Sistema bilineare equivalente in direzione longitudinale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità negativa (-5%yg)

	Direzione Y+,e+		Direzione Y+,e-	
	Massa	Taglio	Massa	Taglio
Γ		1,26		1,26
F*y [kN]	1836,3	1754,5	1991,4	1891,6
d*y [m]	0,022	0,027	0,025	0,030
k*[kN/m]	83339,8	65074,5	79868,6	62733,3
m*[kNs ² /m]	1830,7	1830,7	1830,7	1830,7
T* [sec]	0,9	1,1	1,0	1,1

Tabella B.12 Definizione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà

Distribuzione di forze proporzionale ai tagli di piano: sistema bilineare equivalente in direzione trasversale Y

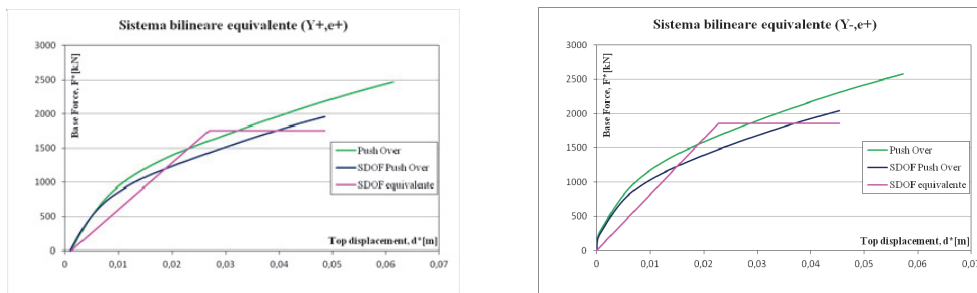


Figura B.21 Sistema bilineare equivalente in direzione trasversale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità positiva (+5%yg)

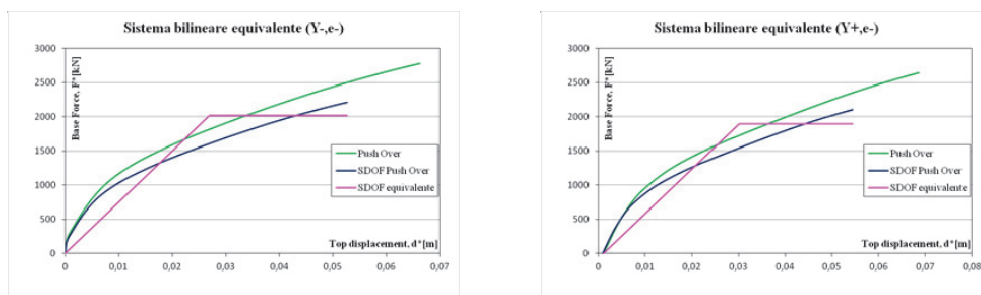


Figura B.22 Sistema bilineare equivalente in direzione trasversale, positiva e negativa, con distribuzione di forze nell'eccentricità negativa (-5%yg)

	Direzione Y-, e-		Direzione Y-, e+	
	Massa	Taglio	Massa	Taglio
Γ	1,26		1830,74	
F*y [kN]	2067,6	2014,4	1910,8	1855,3
d*y [m]	0,021	0,027	0,018	0,023
k*[kN/m]	98227,5	74772,1	107080,5	81577,6
m*[kNs ² /m]	1830,7	1830,7	1830,7	1830,7
T* [sec]	0,9	1,0	0,8	0,9

Tabella B.13 Definizione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà

Valutazione della richiesta di spostamento

Dallo spettro di spostamento relativo allo Stato Limite in esame, in funzione del periodo T^* si ricava la richiesta di spostamento elastico $d_{e,max}^*$ del sistema ad un grado di libertà.

Se $T \geq T_c$ (come accade nel nostro caso in esame in cui $T_c=0,472$ sec) la richiesta di spostamento del sistema anelastico è assunta uguale a quella di un sistema elastico di pari periodo, ossia:

$$d_{max}^* = d_{e,max}^* = S_{De}(T^*) \quad \text{Eq. B.18}$$

Se $T^* < T_c$ la risposta in spostamento del sistema anelastico è maggiore di quella di un sistema elastico di pari periodo e si ottiene da quest'ultima mediante l'espressione:

$$d_{max}^* = \frac{d_{e,max}^*}{q^*} \left[1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{q^*} \right] \geq d_{e,max}^* \quad \text{Eq. B.19}$$

Dove:

$$q^* = \frac{S_e(T^*) m^*}{F_y^*} \quad \text{Eq. B.20}$$

Rappresenta il rapporto tra la forza di risposta elastica e la forza di snervamento del sistema equivalente. Se risulta $q^* \leq 1$ allora si ha $d_{max}^* = d_{e,max}^*$.

Lo spostamento effettivo di risposta d_{max} del punto di controllo dell'edificio (sistema ad n gradi di libertà MDOF) risulta pari a:

$$d_{max} = \Gamma \cdot d_{max}^* \quad \text{Eq. B.21}$$

Ripercorrendo i passi appena descritti, è riportata, nelle seguenti tabelle, la richiesta di spostamento dell'edificio in esame, valutata per lo Stato Limite di Salvaguardia della vita per ambedue le direzioni X e Y e per le relative distribuzioni di forze utilizzate.

	Direzione X+,e+		Direzione X+,e-	
	Massa	Modo	Massa	Modo
T* [sec]	1,805	2,007	1,805	2,007
S _{de} (T*) [m]	0,010	0,012	0,010	0,012
d* _{max} [m]	0,103	0,114	0,103	0,114
d _{max} [m]	0,133	0,147	0,133	0,147

Tabella B.14 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione X-,e-		Direzione X-,e+	
	Massa	Modo	Massa	Modo
T* [sec]	1,792	1,996	1,829	1,999
S _{de} (T*) [m]	0,010	0,012	0,011	0,012
d* _{max} [m]	0,102	0,114	0,104	0,114
d _{max} [m]	0,132	0,147	0,134	0,147

Tabella B.15 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione Y+,e+		Direzione Y+,e-	
	Massa	Taglio	Massa	Taglio
T* [sec]	0,931	1,053	0,951	1,073
S _{de} (T*) [m]	0,005	0,006	0,006	0,006
d* _{max} [m]	0,051	0,060	0,054	0,061
d _{max} [m]	0,065	0,076	0,068	0,077

Tabella B.16 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

	Direzione Y-,e-		Direzione Y-,e+	
	Massa	Taglio	Massa	Taglio
T* [sec]	0,857	0,983	0,821	0,941
S _{de} (T*) [m]	0,005	0,006	0,005	0,005
d* _{max} [m]	0,053	0,056	0,047	0,054
d _{max} [m]	0,067	0,070	0,059	0,067

Tabella B.17 Richiesta di spostamento Stato Limite Salvaguardia della Vita

Ottenuta la richiesta di spostamento d_{max} si valuta quella deformativa per gli elementi/meccanismi duttili e quella statica per gli elementi/meccanismi fragili in corrispondenza della configurazione deformata dell'edificio definita da un valore dello spostamento del punto di controllo pari a d_{max} . La verifica di sicurezza consiste pertanto nel confrontare le suddette richieste con le corrispondenti capacità da

intendersi deformative per gli elementi/meccanismi duttili e resistenti per gli elementi/meccanismi fragili.

B.1.5 Verifiche di sicurezza

Ai fini della verifica degli elementi strutturali si esegue una distinzione fra elementi/meccanismi “duttili” e “fragili”. In generale, i primi si verificano controllando che la domanda non superi la corrispondente capacità in termini di deformazione; i secondi controllando che la domanda non superi la corrispondente capacità in termini di resistenza.

La valutazione della domanda è subordinata al metodo di analisi impiegato e allo stato limite (SL) richiesto. In particolare, l'esecuzione dell'analisi (lineare e/o non lineare) è effettuata utilizzando i valori medi delle proprietà dei materiali direttamente ottenute da prove in situ e da eventuali informazioni aggiuntive.

La valutazione della capacità a sua volta è direttamente influenzata dalla tipologia di elemento (duatile o fragile), dalle proprietà dei materiali, dal livello di conoscenza raggiunto in relazione alla quantità/qualità dei dati necessari e dallo stato limite richiesto.

La classificazione degli elementi nelle due precedenti tipologie è dettata anche dal diverso impiego delle caratteristiche meccaniche dei materiali, per la valutazione delle relative capacità sismiche. Per il calcolo della capacità degli elementi/meccanismi duttili, si impiegano le proprietà dei materiali esistenti direttamente ottenute da prove in situ e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza, in relazione al livello di conoscenza raggiunto.

Sono di seguito discussi, per la metodologia di analisi adottata (ossia l'analisi statica non lineare), i due termini di verifica, domanda e capacità, in relazione ai diversi aspetti che ne influenzano la valutazione.

B.1.6 Verifica della capacità deformativa

Per gli elementi/meccanismi duttili, la capacità è da intendersi in termini di deformazione ed è definita con riferimento alla rotazione θ (rotazione rispetto alla corda) della sezione di estremità dell'elemento valutata rispetto alla congiungente di tale sezione con l'ascissa di momento nullo posta a distanza pari alla luce di taglio $L_V=M/V$. Di seguito sono presentati il modello adottato per la verifica di sicurezza degli

elementi/meccanismi duttili dell'edificio in esame. In fase di verifica in termini di deformazioni degli elementi strutturali, i valori e le caratteristiche dei materiali vengono valutati come rapporto tra i valori medi ottenuti in situ divisi per il fattore di confidenza adeguato al livello di conoscenza raggiunto (LC=2).

Stato limite di Salvaguardia della vita

La capacità di rotazione rispetto alla corda in condizioni di stato limite per la salvaguardia della vita θ_{SLV} è valutata come aliquota della rotazione ultima definita nel Capitolo precedente:

$$\theta_{SLV} = 0.75\theta_u \quad \text{Eq. B.22}$$

B.1.7 Verifiche di resistenza a taglio degli elementi

Tutti gli elementi strutturali devono soddisfare la condizione per cui la sollecitazione a taglio indotta dall'azione sismica sia inferiore o uguale alla corrispondente resistenza tagliante.

Ai fini delle verifiche a taglio, la valutazione delle capacità resistenti è effettuata con riferimento alle resistenze specifiche dei materiali ricavate dai valori medi divisi per il fattore di confidenza FC che, nel caso in esame, è uguale a 1.2, e per il coefficiente di sicurezza parziale del materiale. Si hanno quindi le seguenti resistenze di calcolo:

Resistenza a compressione cilindrica del calcestruzzo:

$$f_{cd} = \frac{f_{cm}}{FC \cdot \gamma_c} = \frac{20,27}{1,2 \cdot 1,5} = 11,53 MPa \quad \text{Eq. B.23}$$

Resistenza a snervamento dell'acciaio:

$$f_{yd} = \frac{f_{ym}}{FC \cdot \gamma_s} = \frac{330}{1,2 \cdot 1,15} = 239,1 MPa \quad \text{Eq. B.24}$$

Dove:

f_{cm} è la resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo;

f_{ym} è la tensione di snervamento media dell'acciaio;

γ_c e γ_s sono i coefficienti di sicurezza parziale dei materiali (1,5 per il calcestruzzo e 1,15 per l'acciaio).

Nel caso in esame i valori di resistenza medi, non avendo a disposizione prove sui materiali, sono stati scelti sulla base di valori presenti in letteratura che possono essere considerati accettabili per l'edificio oggetto di studio. Le travi e pilastri sono armati con staffe a taglio $\phi 8$ sono inoltre presenti anche ferri sagomati all'interno degli elementi trave. Il passo delle staffe adottato per le verifiche è pari a quello calcolato nel progetto simulato.

B.1.8 Verifiche a taglio secondo le NTC 2008

Secondo le NTC 2008 (par. 4.1.2.1.3.2), la resistenza a taglio V_{Rd} di elementi strutturali dotati di specifica armatura a taglio deve essere valutata sulla base di una adeguata schematizzazione a traliccio. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono: le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso di calcestruzzo e i puntoni d'anima inclinati. L'inclinazione θ dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad \text{Eq. B.25}$$

La verifica di resistenza allo stato limite ultimo si pone con:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \quad \text{Eq. B.26}$$

Dove V_{Ed} è il valore di calcolo dello sforzo di taglio agente.

Con riferimento al contributo dato dalle staffe, la resistenza di calcolo a "taglio trazione" si calcola con:

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta \quad \text{Eq. B.27}$$

Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di calcolo a "taglio compressione" si calcola con:

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \frac{\cot \theta}{(1 + \cot^2 \theta)} \quad \text{Eq. B.28}$$

Dove si è posto:

A_{sw} area dell'armatura trasversale;

s interasse tra due armature trasversali consecutive;

f'_{cd} resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima ($f'_{cd} = 0,5 \cdot f_{cd}$);

α_c coefficiente maggiorativo che tiene conto della presenza di sforzo assiale agente nella sezione.

La resistenza a taglio dell'elemento è la minore delle due sopra definite:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}; V_{Rcd}) \quad \text{Eq. B.29}$$

Dividendo per $(b \cdot d \cdot f_{cd})$ il taglio compressione e il taglio trazione, si ottengono t_{Rcd} e t_{Rsd} . Andando a rappresentare questi due valori in funzione di $\cot \theta$ si ricava il diagramma riportato in seguito.

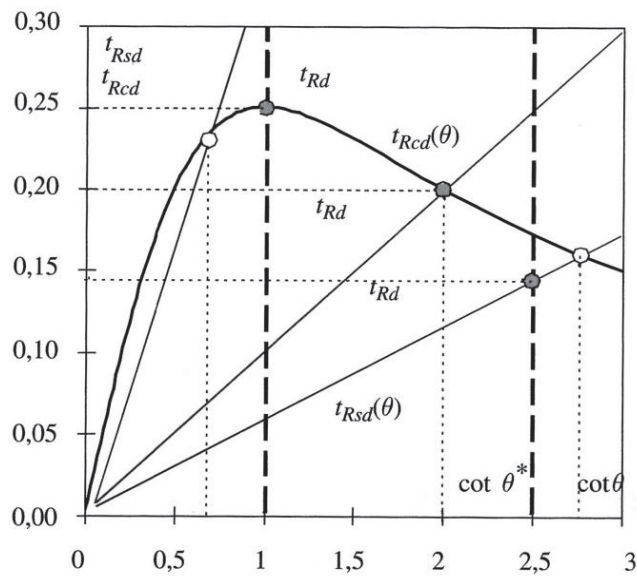


Figura B.23 Valutazione del taglio resistente t_{rd} per diversi valori della $\cot \theta$

In seguito all'azione sismica che comporta fenomeni di degrado ciclico nel calcestruzzo, il taglio resistente viene valutato per $\theta = 45^\circ$ ($\cot \theta = 1$). Inoltre negli edifici esistenti, essendo alquanto bassa la percentuale meccanica di armatura trasversale presente negli elementi strutturali, in

corrispondenza di $\theta = 45^\circ$ il taglio resistente è governato dalla rottura per taglio trazione dell'armatura trasversale.

B.1.9 Verifiche a taglio secondo l'Eurocodice 8

La valutazione della resistenza a taglio in base alle prescrizioni degli Eurocodici presenta una sostanziale analogia rispetto alla normativa italiana per quanto riguarda gli elementi di nuova progettazione in situazioni sismiche e non sismiche, assumendo appunto lo stesso modello di traliccio ad inclinazione variabile per le situazioni non sismiche e richiamando tali formulazioni di capacità per il progetto di elementi di nuova progettazione in zona sismica.

Il modello proposto dall'Eurocodice per elementi esistenti tiene conto del degrado della resistenza a taglio in funzione dell'impegno plastico dell'elemento e assume due formulazioni di regressione sperimentale differenti, rispettivamente, per elementi il cui rapporto tra luce di taglio (L_v) e altezza della sezione (H) è minore o uguale a 2 (elementi tozzi) o maggiore di 2 (elementi snelli).

Nel caso degli elementi tozzi la formulazione è la seguente:

$$V_{EC8} = \frac{1}{\gamma_{el}} \frac{4}{7} \left(1 - 0,02 \min(5; \mu_{dpl})\right) \left(1 + 1,35 \frac{N}{A_c f_c}\right) (1 + 0,45 \cdot 100 \rho_{tot}) \sqrt{\min(f_c; 40)} b_w \cdot z \cdot \sin 2\delta \quad \text{Eq. B.30}$$

Per il caso di elementi snelli invece:

$$V_{EC8} = \frac{1}{\gamma_{el}} [V_N + V_C + V_W] \quad \text{Eq. B.31}$$

In cui:

$$V_N = \frac{H - x}{2L_v} \cdot \min(N; 0,55 A_c f_c) \quad \text{Eq. B.32}$$

$$V_C = \left(1 - 0,05 \min(5; \mu_{dpl})\right) \cdot \left[0,16 \max(0,5; 100 \rho_{tot}) \cdot \left(1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_v}{H}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c\right] \quad \text{Eq. B.33}$$

$$V_w = (1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta pl})) \cdot (\rho_w b_w z \cdot f_{yw}) \quad \text{Eq. B.34}$$

Dove:

γ_{el} è maggiore di 1 ($\gamma_{el} = 1,15$) per elementi sismici primari e uguale a 1 per elementi sismici secondari;

x è l'altezza della zona compressa calcolata a partire dalla curvatura di snervamento;

L_v è la luce di taglio;

ρ_{tot} è la percentuale geometrica totale di armatura longitudinale;

$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s}$ è la percentuale di armatura trasversale;

f_{yw} tensione di snervamento dell'armatura trasversale;

z è il braccio della coppia interna assunto pari a 0,9 volte l'altezza utile della sezione

Il termine V_w nell'equazione rappresenta il contributo dell'armatura trasversale nell'ipotesi di modello alla Ritter-Mörsch

Il fattore μ_{pl} rappresenta la parte plastica della domanda di duttilità e governa il degrado della resistenza che nel nostro caso è stato posto uguale a zero.

B.1.10 Verifiche di resistenza nei nodi

Tali verifiche si eseguono andando a confrontare le tensioni principali di trazione e compressione agenti nel nodo con le rispettive tensioni limite.

In generale si distinguono due tipologie di nodi (par. 7.4.4.3, NTC 2008):

- nodi interamente confinati, così definiti quando ognuna delle quattro facce verticali si innesta una trave. Il confinamento si considera realizzato quando, su ogni faccia del nodo, la sezione della trave copre per almeno i $\frac{3}{4}$ la larghezza del pilastro e, su entrambe le coppie di facce opposte al nodo, le sezioni delle travi si ricoprono per almeno i $\frac{3}{4}$ dell'altezza;
- nodi non interamente confinati, tutti i nodi non appartenenti alla categoria precedente.

La verifica di resistenza deve essere eseguita solo per i nodi non interamente confinati.

Come detto deve essere verificata sia la resistenza a trazione diagonale che quella a compressione diagonale. Per la verifica si possono adottare le seguenti espressioni:

- per la resistenza a trazione:

$$\sigma_{nt} = \left| \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \right| \leq 0,3\sqrt{f_c} \quad \text{Eq. B.35}$$

- per la resistenza a compressione:

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0,5f_c \quad \text{Eq. B.36}$$

N indica l'azione assiale presente nel pilastro superiore, V_n indica il taglio totale agente sul nodo, considerando sia il taglio derivante dall'azione presente nel pilastro superiore, sia quello dovuto alla sollecitazione di trazione presente nell'armatura longitudinale superiore della trave, A_g indica la sezione orizzontale del nodo. Le resistenze dei materiali sono ottenute come media delle prove eseguite in sito e da fonti aggiuntive di informazione, divise per il fattore di confidenza appropriato in relazione al Livello di Conoscenza raggiunto e per il coefficiente parziale del materiale. I valori delle resistenze nel caso specifico sono le stesse di quelle calcolate al paragrafo precedente nei riguardi delle verifiche a taglio degli elementi. Nel paragrafo successivo sono riportate le schede che riassumono le verifiche in esame.

B.1.11 Calcolo Indice di rischio

L'indice di rischio è dato dal rapporto tra la PGAc (peak ground acceleration) di capacità e la PGAD di domanda.

La PGAD è correlata allo stato limite di riferimento, che nel caso in esame è lo Stato limite di Salvaguardia della Vita; essa dipende dal sito,

dalla classe d'uso della struttura dalla tipologia di terreno e dalle condizioni topografiche.

$$I_r = \frac{PGA_c}{PGA_D} \quad \text{Eq. B.37}$$

La norma fornisce, per nove periodi di ritorno dell'azione sismica, i valori di a_g che moltiplicata per il coefficiente S, che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche, otteniamo il valore di PGA_D .

Nel caso in esame il periodo di ritorno dell'azione allo SLV è di 475 anni e rientra tra quelli previsti dalla norma, è dunque semplice ricavare i valori di a_g , F_0 e T^*_c .

Nel caso in cui si volessero calcolare i parametri di pericolosità sismica a_g , F_0 e T^*_c per un periodo di ritorno che rientri tra quelli proposti dalla normativa si utilizza la seguente formula di interpolazione:

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \times \log\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right) \times \left[\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)\right]^{-1} \quad \text{Eq. B.38}$$

Nella quale:

p è il valore di interesse corrispondente al periodo T_R desiderato;

T_{R1} , T_{R2} sono i periodi di ritorno più prossimi a T_R per i quali si dispone dei valori p_1 e p_2 del generico parametro p .

La PGAC è la peak ground acceleration massima che può sopportare la struttura, prima che un elemento vada in crisi. Quindi la capacità della struttura è dettata dal primo meccanismo di rottura duttile/fragile. Di consueto, negli edifici esistenti, il primo meccanismo è di tipo fragile per cui la capacità è strettamente legata a meccanismi di rottura a taglio dei pilastri e travi e rottura dei nodi.

Per il calcolo della PGAC si fa riferimento alla curva di capacità relativa al primo meccanismo di rottura della struttura tra tutte le combinazioni applicate. Nota la curva di capacità si procede alla bilinearizzazione della medesima come visto nei paragrafi precedenti.

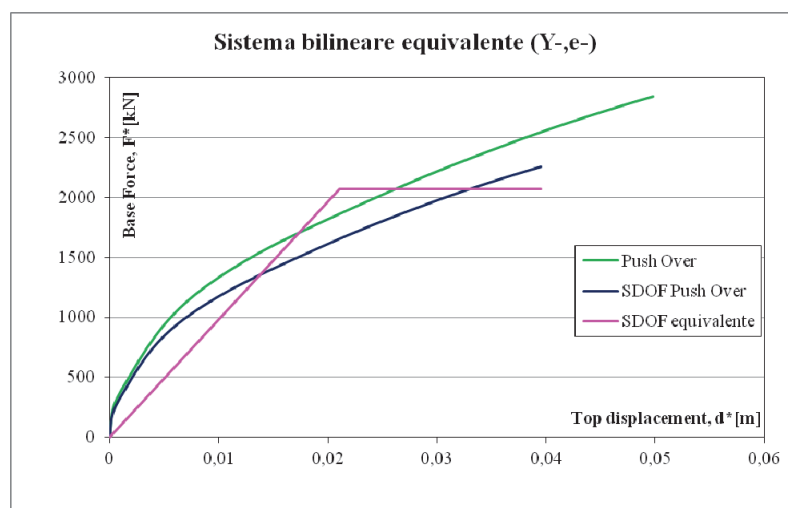


Figura B.24 Bilinearizzazione relativa alla curva di capacità della prima rottura della struttura

Ottenuta la curva bilineare equivalente è possibile riportarla nel piano ADRS (acceleration displacement response spectrum) dividendo F^* per m^* , sullo stesso piano si riportano i valori spettrali di accelerazione e di spostamento al variare del periodo di ritorno dell'azione sismica. A questo punto si possono verificare due casi:

- $T^* > T_C$;
- $T^* < T_C$;

Dove T^* , periodo elastico del sistema SDOF equivalente, è rappresentato dal prolungamento del tratto elastico lineare della bilineare equivalente, e T_C è il punto finale del tratto costante del diagramma determinato dai valori spettrali di accelerazione e spostamento.

Quindi si suppone di essere nel caso di $T^* > T_C$ in cui lo spostamento del sistema anelastico è uguale a quello elastico:

$$d_{\max}^* = d_{e,\max}^* = S_{De}(T^*) \tag{Eq. B.39}$$

In modo tale da poter trovare il punto di intersezione tra la retta passante per lo spostamento massimo (relativo al primo meccanismo) d_{\max}^* , e la retta che rappresenta T^* come riportato in nella figura successiva

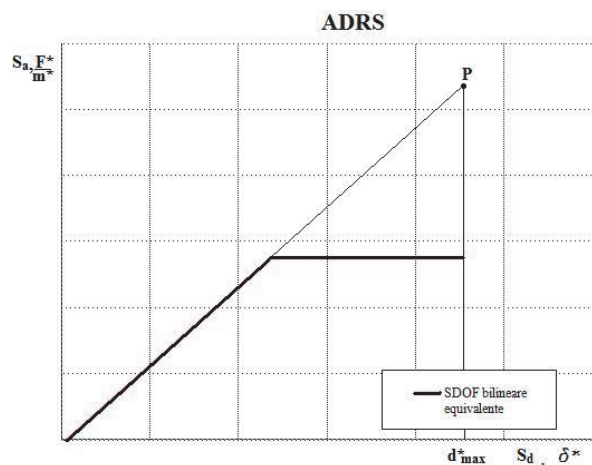


Figura B.25 Rappresentazione nel piano ADRS

Noto il punto P si ricerca la curva dei valori spettrali (S_a, S_d), che passa per il medesimo punto, mediante interpolazione lineare tra le curve con periodo immediatamente superiore e immediatamente inferiore, avendo preliminarmente rinfittito gli spettri che la norma ci fornisce. Nota la curva passante per P possiamo ricavare la PGA_C come il valore di S_a per S_d nullo.

Nella figura di seguito sono rappresentate in nero le curve dei valori spettrali di accelerazione e di spostamento note dalle norma, e in verde la curva ricavata per interpolazione la quale intercetta l'asse delle ordinate nel punto che rappresenta la PGA_C .

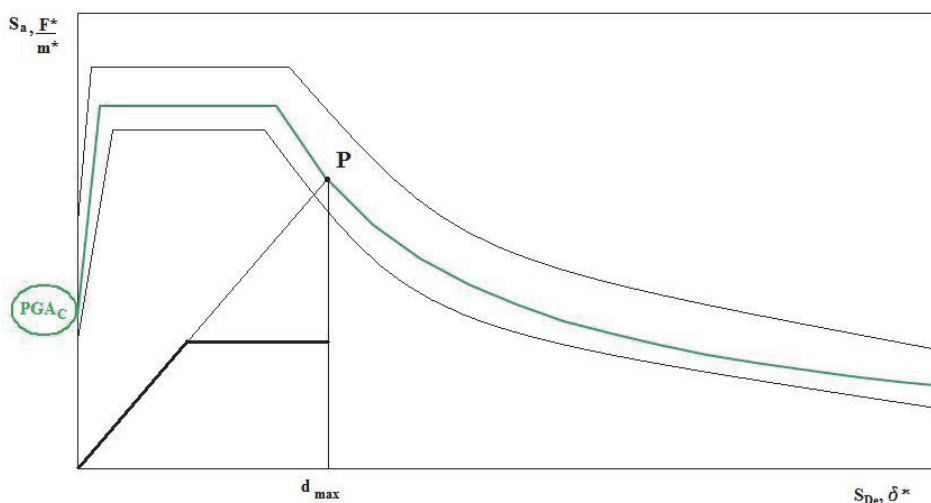


Figura B.26 Individuazione della PGA_C nel piano ADRS

Nota la curva passante per il punto P si controlla che effettivamente il periodo T^* sia maggiore del periodo T_c , in caso affermativo la PGA_c ricavata è l'accelerazione di capacità, in caso negativo, si passa all'analisi della PGA_c nel caso in cui $T^* < T_c$.

Nel caso in cui $T^* < T_c$ la curva dei valori spettrali può essere ricercata mediante il confronto tra lo spostamento massimo relativo alla bilineare equivalente e quello relativo alle varie curve spettrali note. Trovate le due curve a cui corrisponde lo spostamento immediatamente minore e immediatamente superiore si procede per interpolazione lineare tra queste due curve in modo tale da poter trovare quella relativa alla PGA_c .

L'indice di rischio può essere ricavato per qualsiasi tipologia di rottura, come riportato nella tabella seguente, ma la capacità della struttura è determinata dalla prima rottura che si verifica.

	Meccanismi fragili					Meccanismo
	Rottura taglio	Rottura taglio	Rottura taglio	Rottura nodi	Rottura nodi	duttile
	pil EC8	pil NTC08	travi EC8	compr.	traz.	Deformazione
Poy-_e-_massa	31%	<28%	<28%	>100%	<28%	83%
Poy+_e+_massa	35%	<28%	30%	>100%	<28%	77%
Poy+_e-_massa	42%	<28%	<28%	>100%	<28%	83%
Poy+_e+_massa	42%	<28%	33%	>100%	<28%	76%
Poy-_e-_tagli	33%	<28%	<28%	>100%	<28%	95%
Poy+_e+_tagli	40%	<28%	<28%	>100%	<28%	86%
Poy+_e-_tagli	36%	<28%	<28%	>100%	<28%	90%
Poy+_e+_tagli	36%	<28%	31%	>100%	<28%	83%
Pox-_e-_massa	>100%	59%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+_e+_massa	>100%	60%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+_e-_massa	>100%	60%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+_e+_massa	>100%	60%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox-_e-_modo	>100%	76%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+_e+_modo	>100%	76%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+_e-_modo	>100%	68%	>100%	>100%	<28%	100%
Pox+_e+_modo	>100%	68%	>100%	>100%	<28%	100%
Minimo I_R	31%	<28%	<28%	<28%	<28%	76%

Tabella B.18 Valutazione dell'indice di rischio per i vari meccanismi di crisi