

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

In Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

*“La progettazione strutturale ed energetica di un edificio
pluripiano”*



Relatori

Prof. Alessandro Fantilli

Prof. Bernardino Chiaia

Prof. Stefano Fantucci

Candidato

Luca Memmola

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

1. Premessa	1
2. L'edificio di riferimento.....	3
2.1. Criteri generali di progettazione	4
3. L'edificio in X-lam.....	5
3.1. Disarticolazione tecnologia e analisi dei carichi.....	5
4. L'edificio a telaio	17
4.1. Disarticolazione tecnologia e analisi dei carichi.....	17
4.2. La modellazione FEM.....	27
4.3. Modellazione delle azioni.....	28
4.3.1. Azioni permanenti.....	28
4.3.2. Azioni variabili.....	29
4.3.3. Azioni sismiche.....	32
4.4. Calcolo delle sollecitazioni	33
4.5. Progettazione degli elementi strutturali.....	35
4.5.1. Solai	35
4.5.2. Fondazioni.....	37
4.5.3. Travi	38
4.5.4. Pilastrini.....	39
4.5.5. Setti	41
5. L'edificio a pannelli prefabbricati	43
5.1. Disarticolazione tecnologica e analisi dei carichi.....	43
5.2. La modellazione FEM.....	54
5.3. Modellazione delle azioni.....	56
5.4. Calcolo delle sollecitazioni	56
5.5. Progettazione elementi strutturali.....	58
5.5.1. Solai	58
5.5.2. Fondazioni.....	59

5.5.3.	Travi	59
5.5.4.	Pilastrini.....	60
5.6.	Verifica di elementi strutturali	61
6.	Life Cycle Assessment (LCA)	63
6.1.	Introduzione	63
6.2.	Il ciclo di vita dell'edificio	64
6.3.	Assunzioni	67
6.4.	Procedimento di calcolo.....	67
6.5.	Computo dei materiali.....	69
6.6.	Risultati	72
6.7.	Considerazioni.....	82
7.	Carbonatazione.....	83
7.1.	Fase di utilizzo, assorbimento di CO ₂	85
7.2.	Risultati	87
7.3.	Considerazioni.....	91
8.	Analisi energetica	93
8.1.	Assunzioni	94
8.1.1.	Zone Termiche	94
8.1.2.	Trasmittanze.....	95
8.1.3.	Schermature solari.....	96
8.1.4.	Temperature di Set-Point.....	96
8.1.5.	Ventilazione.....	97
8.1.6.	Simulazione energetica	100
8.2.	Risultati	101
8.3.	Emissioni CO ₂	104
8.4.	Considerazioni.....	105
9.	Risultati e considerazioni	107
9.1.	CO ₂ emessa-LCA.....	107
9.2.	CO ₂ Assorbita	109

9.3.	CO ₂ globale-LCA.....	110
9.4.	Prestazioni Energetiche	111
9.5.	CO ₂ Globale-Uso	113
9.6.	Analisi globale	114
10.	Confronto con l'edificio unifamiliare	117
10.1.	L'edificio unifamiliare	117
10.2.	CO ₂ Emessa.....	118
10.3.	CO ₂ Assorbita	119
10.4.	CO ₂ globale-LCA.....	120
10.5.	Prestazioni Energetiche	121
10.6.	CO ₂ Globale-Uso	123
10.7.	Analisi globale	124
11.	Conclusioni e sviluppi futuri	127
12.	Riferimenti	129
	Indice delle figure	131
	Indice delle tabelle	135
	Indice dei grafici	139

1. Premessa

L'uso del cemento nelle costruzioni genera preoccupazione a causa della notevole quantità di anidride carbonica prodotta nel processo di fabbricazione. In risposta al problema, è in aumento l'uso di alternative sostenibili come il legno, tuttavia i fattori determinanti e l'efficacia di tali materiali sull'impatto ambientale sono ancora un dibattito aperto.

A questo proposito, gli obiettivi di questa tesi sono di rispondere alle seguenti domande:

- In che misura la sostenibilità di una costruzione è influenzata dalle tecniche costruttive e dalla sua ubicazione?
- Quali sono i risultati ottenuti dalla valutazione del ciclo di vita (LCA) quando vengono presi in considerazione solo i materiali?
- Come sono influenzati i risultati dall'uso dell'edificio?

Al fine di rispondere a queste domande, si è deciso di effettuare uno studio su due diversi tipi di edificio: una casa unifamiliare e un condominio. Il primo caso si concentra su un piccolo edificio di 3 piani fuori terra con una superficie totale di 120 m²; il secondo su un edificio di 5 piani fuori terra con una superficie complessiva di 1200 m². Lo studio del primo edificio è già stato completato.

Sarà quindi discussa, nei successivi capitoli, l'analisi svolta sul secondo edificio e, infine, si confronteranno i risultati ottenuti con quelli del primo edificio.

Per valutare le differenti emissioni a seconda della tecnologia costruttiva utilizzata, si è progettato l'edificio in tre modi differenti:

- struttura a pareti portanti e solai in legno lamellare;
- struttura a telaio in cemento armato con solai monodirezionali gettati in opera;
- struttura a pareti portanti e solai in calcestruzzo prefabbricato.

Per valutare contemporaneamente l'influenza climatica sui risultati lo stesso edificio è stato progettato in tre differenti località:

- Catania;
- Torino;
- Oslo.

2. L'edificio di riferimento

L'edificio oggetto del caso studio è parte di un complesso residenziale realmente esistente sito in Torino noto come “Borgo dei lavandai [1]” costruito tra il 2011 e il 2013.



Figura 2.1-Borgo dei lavandai, vista [2]

Il complesso è costituito da cinque piani fuori terra che terminano con un tetto a due falde. Al piano terreno è presente un'autorimessa, ai piani superiori sono collocati appartamenti bi e trilocali, serviti da due vani scala differenti.

L'altezza d'interpiano è pari a 4 m per il piano terreno e di 3,15 m per i restanti piani.

In Figura 2.2 è riportata la pianta del piano tipo per poter meglio comprendere l'edificio.

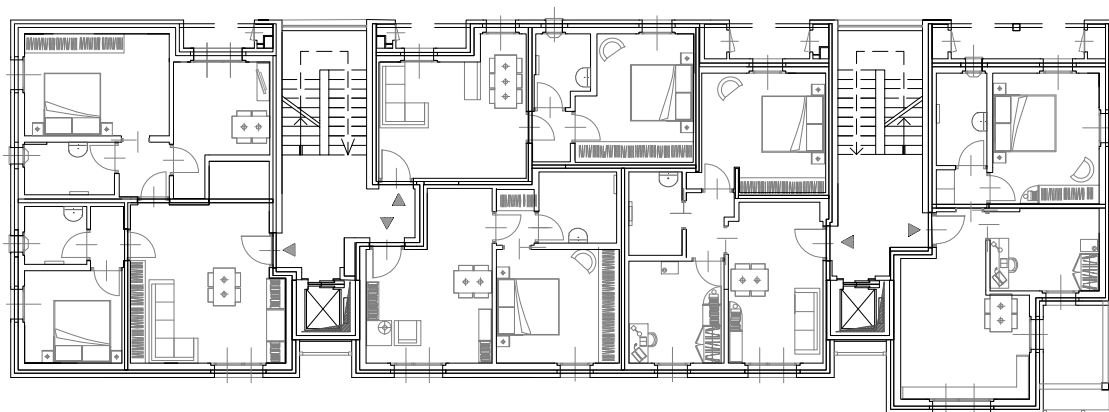


Figura 2.2-Pianta piano tipo

2.1. Criteri generali di progettazione

Nel progettare gli edifici secondo le diverse tecnologie precedentemente descritte rimarranno comuni a tutte le strutture le seguenti componenti:

- Strutture di fondazione in calcestruzzo armato gettato in opera;
- Solaio controterra;
- Primo piano fuori terra adibito ad autorimessa: pilastri e travi in calcestruzzo armato gettato in opera, solaio di copertura dell'autorimessa in latero-cemento, chiusura verticale della stessa realizzata in blocchi Poroton;
- Vani ascensore in calcestruzzo armato gettato in opera per il primo piano fuori terra.

L'ubicazione nelle differenti località ha influenzato la scelta degli spessori degli isolanti per rispondere alle diverse esigenze normative, infatti, le tre città di riferimento sono collocate in diverse zone climatiche come definito nell'Allegato A del D.P.R. 412/93.

Per conformità, la città di Oslo è stata collocata nella zona climatica F, la più fredda del territorio italiano.

Riassumendo, si riporta in Tabella 2.1 la classificazione delle città di nostro interesse:

Tabella 2.1-Classificazione zone climatiche

Allegato A del D.P.R. 412/93	
Città	Zona climatica
Torino	E
Catania	B
Oslo	F

Le stratigrafie dell'involucro saranno scelte in accordo con i valori dell'edificio di riferimento riportati nelle tabelle 1, 2, 3, 4 e 5 presenti nell'Appendice A del decreto del 26 giugno 2015 [3]:

Tabella 2.2-Trasmittanze minime edificio di riferimento

Trasmittanze edificio di riferimento				
Componente	Zona	U [W/m²K]		
		E	B	F
Chiusure opache verticali		0,43	0,26	0,24
Chiusure opache orizzontali di copertura		0,35	0,22	0,2
Chiusure opache orizzontali di pavimento		0,44	0,26	0,24
Strutture opache verticali e orizzontali di separazione tra unità immobiliari confinanti		0,8	0,8	0,8

3. L'edificio in X-lam

L'edificio in X-lam rispecchia l'edificio realmente esistente. Per questo motivo non è stata progettata la struttura, ma si sono comunque analizzati e differenziati, a seconda della città di ubicazione, i componenti dell'involucro edilizio secondo quanto riportato al Paragrafo 2.1:

- Le chiusure verticali opache sono in legno lamellare con un doppio strato di isolante,
- le partizioni interne portanti sono in legno lamellare rivestite da pannelli in cartongesso,
- le partizioni interne non portanti sono in cartongesso,
- le chiusure orizzontali sono in legno lamellare con doppio strato di isolante,
- le partizioni orizzontali sono in legno lamellare.

3.1. Disarticolazione tecnologia e analisi dei carichi

Per agevolare la lettura dell'edificio e dei suoi componenti è stata realizzata la disarticolazione tecnologica, si riportano nelle successive pagine le caratteristiche di ciascun componente dell'edificio.

Me1 MURI ESTERNI VERSO AUTORIMESSA

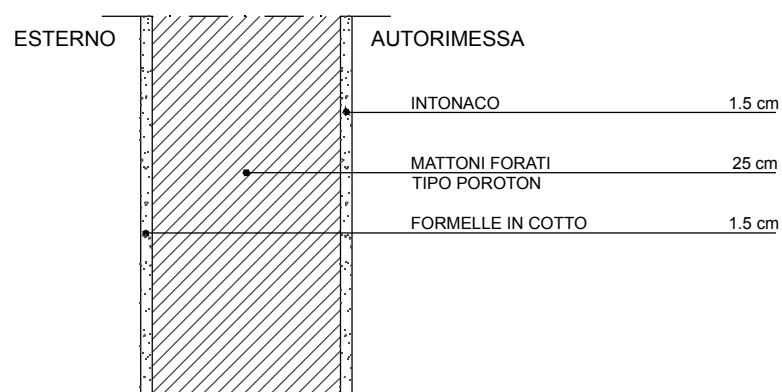


Figura 3.1--Edificio in x-lam

Tabella 3.1-Muri esterni Me1-Edificio in x-lam

Muri esterni verso autorimessa - Me1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
2	Poroton	0,250			7,45	1,863		
3	Formelle	0,015			21,10	0,317		
Spessore Totale		0,280			Peso Totale	2,405		

Me2 MURI ESTERNI STRUTTURALI

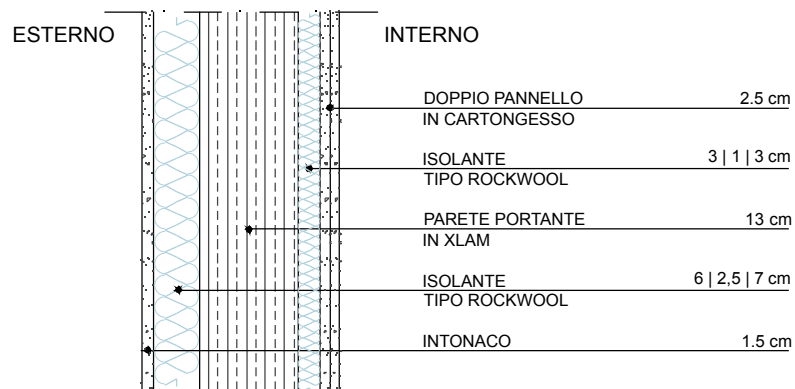


Figura 3.2-Muri esterni Me2-Edificio in x-lam

Tabella 3.2-Muri esterni Me2-Edificio in x-lam

Muri esterni strutturali - Me2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
2	Isolante - Rockwool	0,06	0,025	0,070	0,59	0,035	0,015	0,041
3	Xlam	0,130			4,12	0,535		
4	Isolante - Rockwool	0,03	0,01	0,030	0,59	0,018	0,006	0,018
5	Cartongesso	0,013			4,17	0,052		
6	Cartongesso	0,013			4,17	0,052		
Spessore Totale		0,260	0,205	0,270	Peso Totale	0,918	0,885	0,924

Mi1 MURI INTERNI STRUTTURALI

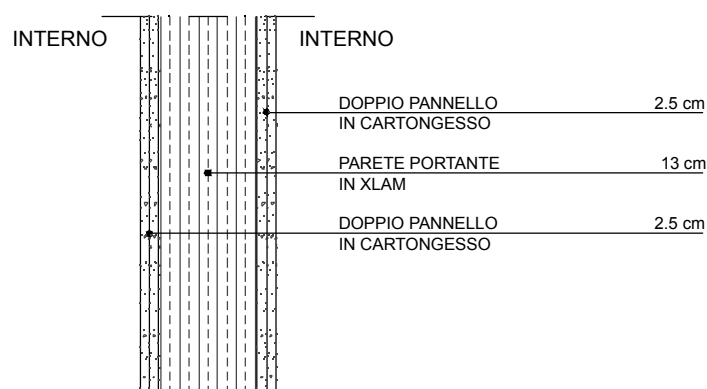


Figura 3.3-Muri interni Mi1-Edificio in x-lam

Tabella 3.3-Muri interni Mi1-Edificio in x-lam

Muri Interni strutturali - Mi1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Cartongesso	0,0125			4,17	0,052		
2	Cartongesso	0,0125			4,17	0,052		
3	Xlam	0,130			4,12	0,535		
4	Cartongesso	0,0125			4,17	0,052		
5	Cartongesso	0,0125			4,17	0,052		
Spessore Totale		0,180			Peso Totale	0,744		

Mi2 MURI INTERNI

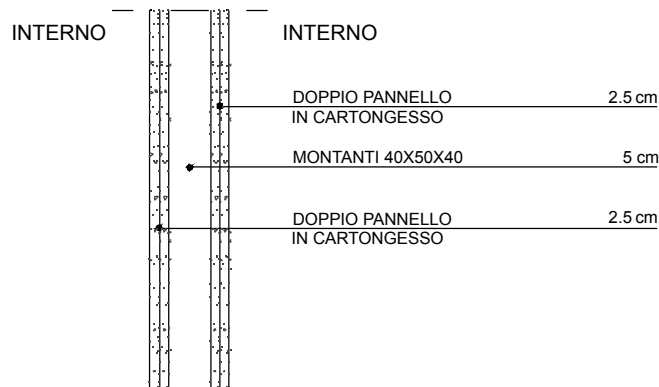


Figura 3.4-Muri interni Mi2-Edificio in x-lam

Tabella 3.4-Muri interni Mi2-Edificio in x-lam

Muri Interni - Mi2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Cartongesso	0,0125			21,10	0,264		
2	Cartongesso	0,0125			21,10	0,264		
3	Intercapedine	0,0500			-	-		
4	Cartongesso	0,0125			21,10	0,264		
5	Cartongesso	0,0125			21,10	0,264		
Spessore Totale		0,100			Peso Totale	1,055		

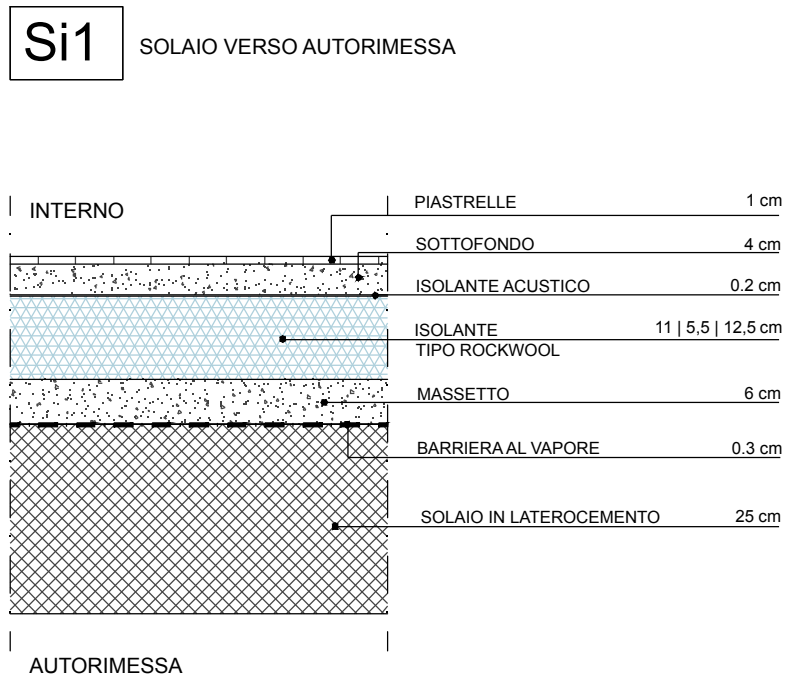


Figura 3.5-Solaio interno Si1-Edificio in x-lam

Tabella 3.5-Solaio interno Si1-Edificio in x-lam

Solaio verso autorimessa - Si1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Sottotondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante acustico	0,003			0,29	0,001		
5	Isolante - Rockwool	0,11	0,055	0,125	0,59	0,065	0,032	0,074
6	Massetto	0,060			4,00	0,240		
7	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
8	Solaio in c.a.	0,250			25,00	6,250		
Spessore Totale		0,476	0,421	0,491	Peso Totale	7,474	7,442	7,483

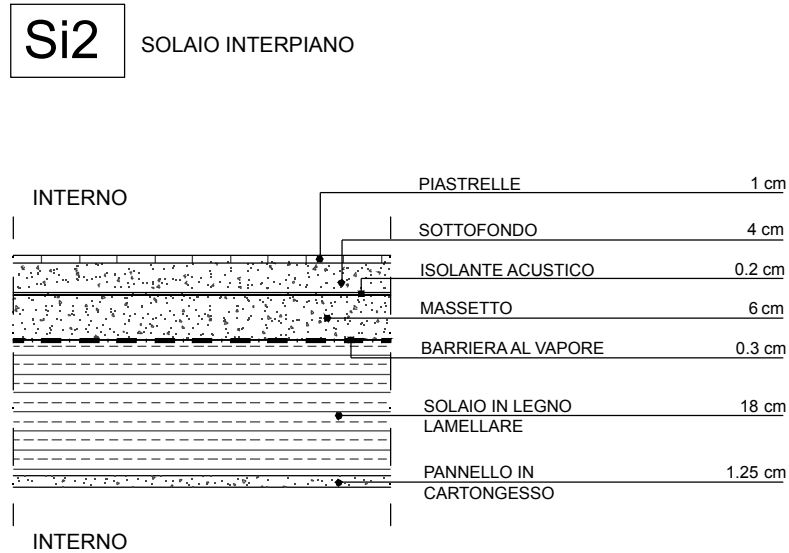


Figura 3.6-Solaio interno Si2-Edificio in x-lam

Tabella 3.6-Solaio interno Si2-Edificio in x-lam

Solaio interpiano - Si2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Sottofondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante acustico	0,003			0,29	0,001		
5	Massetto	0,060			4,00	0,240		
6	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
7	X-lam	0,180			4,12	0,741		
8	Cartongesso	0,013			21,10	0,264		
Spessore Totale		0,309			Peso Totale	2,165		

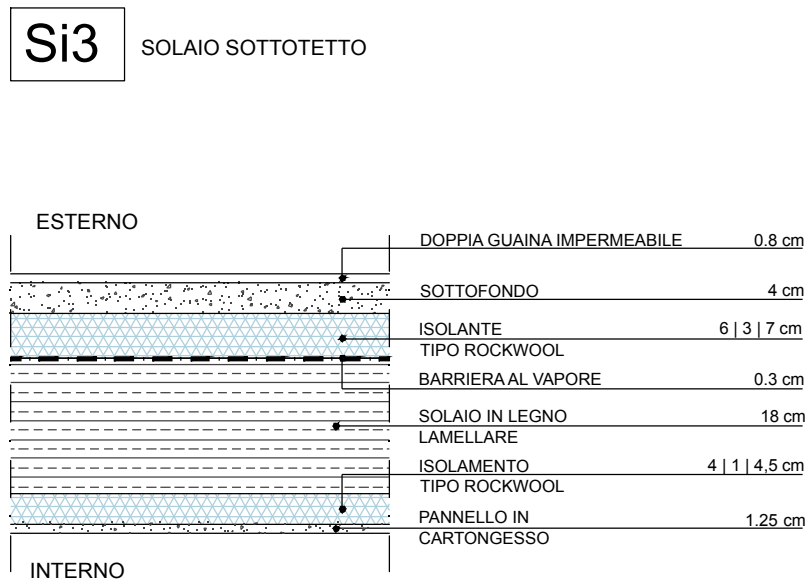


Figura 3.7-Solaio interno Si3-Edificio in X-lam

Tabella 3.7-Solaio interno Si3-Edificio in X-lam

Solaio sottotetto - Si3								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Sottofondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante - Rockwool	0,060	0,030	0,070	0,59	0,035	0,018	0,041
4	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
5	X-lam	0,180			4,12	0,741		
6	Isolante - Rockwool	0,040	0,010	0,045	0,59	0,024	0,006	0,027
7	Cartongesso	0,013			21,10	0,264		
Spessore Totale		0,346	0,286	0,361	Peso Totale	1,983	1,947	1,992

Se1 SOLAIO CONTROTERRA

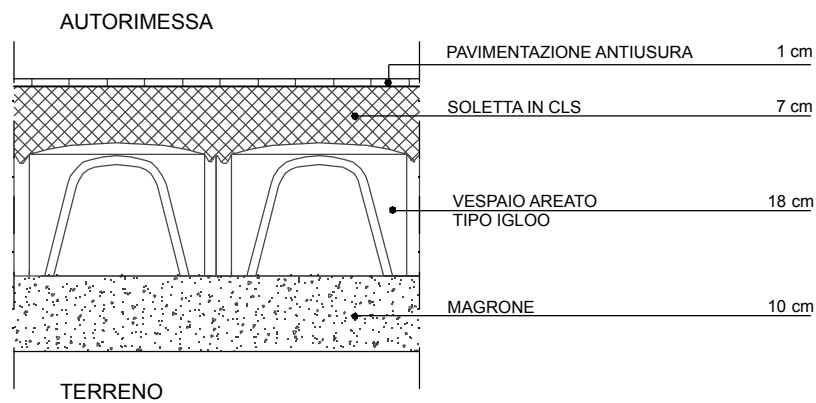


Figura 3.8-Solaio esterno Se1-Edificio in ∞ -lam

Tabella 3.8-Solaio esterno Se1-Edificio in ∞ -lam

Solaio controterra – Se1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m ³]	Peso [kN/m ²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Soletta in c.a.	0,070			25,00	1,750		
3	Vespaio areato	0,200			-	1,75		
4	Magrone	0,003			18,00	0,054		
Spessore Totale		0,512			Peso Totale	5,024		

Se2 COPERTURA SCALE

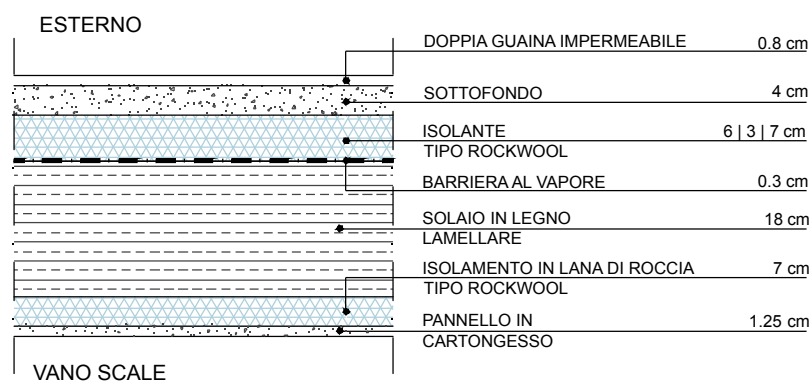


Figura 3.9-Solaio esterno Se2-Edificio in X-lam

Tabella 3.9-Solaio esterno Se2-Edificio in X-lam

Copertura scale - Se2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Guaina impermeabile	0,004			9,75	0,039		
2	Sottofondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante - Rockwool	0,06	0,03	0,070	0,59	0,035	0,018	0,041
4	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
5	Xlam	0,180			4,12	0,741		
6	Isolante - Rockwool	0,04	0,01	0,045	0,59	0,024	0,006	0,027
7	Cartongesso	0,013			4,17	0,052		
Spessore Totale		0,340	0,280	0,355	Peso Totale	1,598	1,563	1,607

Se3 COPERTURA INCLINATA

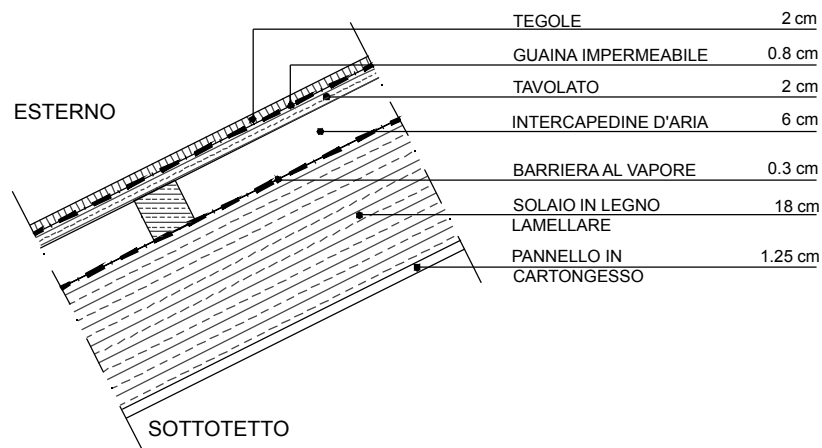


Figura 3.10-Solaio esterno Se3-Edificio in x-lam

Tabella 3.10-Solaio esterno Se3-Edificio in x-lam

Copertura inclinata - Se3								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Tegole	0,020			21,10	0,422		
2	Guaina impermeabile	0,004			9,75	0,039		
3	Tavolato	0,020			4,12	0,082		
4	Intercapedine	0,060			-	-		
5	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
6	Xlam	0,180			4,12	0,741		
7	Cartongesso	0,013			4,17	0,052		
Spessore Totale		0,280			Peso Totale	1,255		

4. L'edificio a telaio

L'edificio con struttura a telaio in cemento armato è stato progettato interamente mediante l'utilizzo di un software di calcolo agli elementi finiti.

Partendo dalle dimensioni delle strutture in cemento armate del piano terra dell'edificio di riferimento, si è proceduto con la progettazione dei restanti piani fuori terra. Per far ciò è stata eseguita l'analisi dei carichi per poter modellare le varie azioni portate dalla struttura.

Si sono inoltre definiti i componenti dell'involucro edilizio secondo quanto riportato al *Paragrafo 2.1*:

- Le chiusure verticali opache sono in blocchi Poroton con uno strato di isolante esterno,
- le partizioni interne sono in blocchi Poroton tradizionali,
- le chiusure e partizioni orizzontali sono costituite da solai di latero-cemento.

4.1. Disarticolazione tecnologia e analisi dei carichi

Per agevolare la lettura dell'edificio e dei suoi componenti è stata realizzata la disarticolazione tecnologica. Si riportano nelle successive pagine le caratteristiche di ciascun componente dell'edificio.

Me1 MURI ESTERNI VERSO AUTORIMESSA

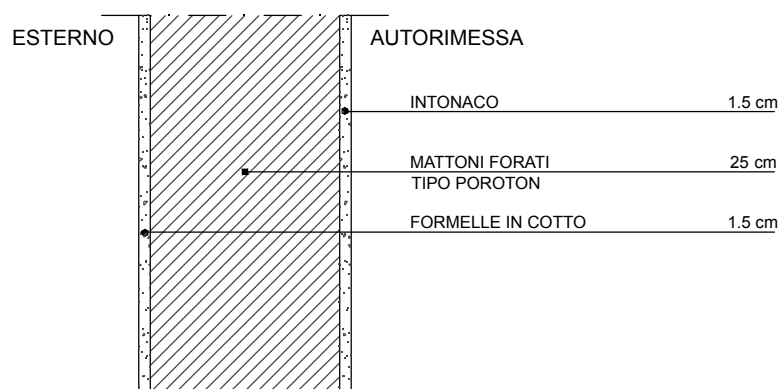


Figura 4.1-Muri esterni Me1-Edificio a telaio

Tabella 4.1-Muri esterni Me1-Edificio a telaio

Muri esterni verso autorimessa - Me1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
2	Poroton	0,250			7,45	1,863		
3	Formelle	0,015			21,10	0,317		
Spessore Totale		0,280			Peso Totale	2,405		

Me2 MURI ESTERNI

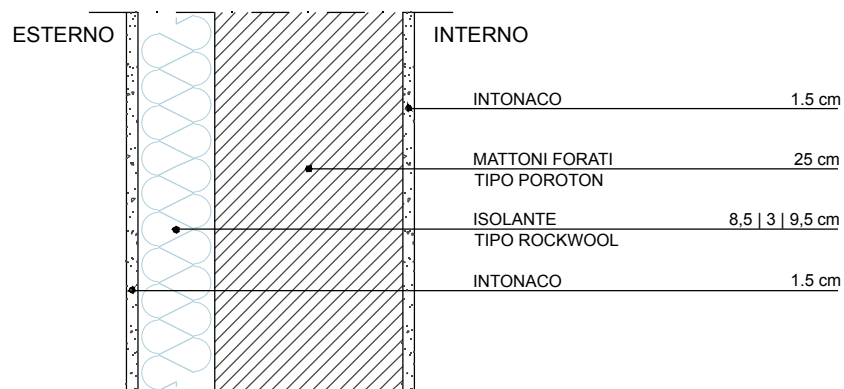


Figura 4.2-Muri esterni Me2-Edificio a telaio

Tabella 4.2 Muri esterni Me2-Edificio a telaio

Muri esterni - Me2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
2	Poroton	0,250			7,45	1,863		
3	Isolante - Rockwool	0,085	0,030	0,095	0,59	0,05	0,02	0,056
4	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,365	0,310	0,375	Peso Totale	2,363	2,331	2,369

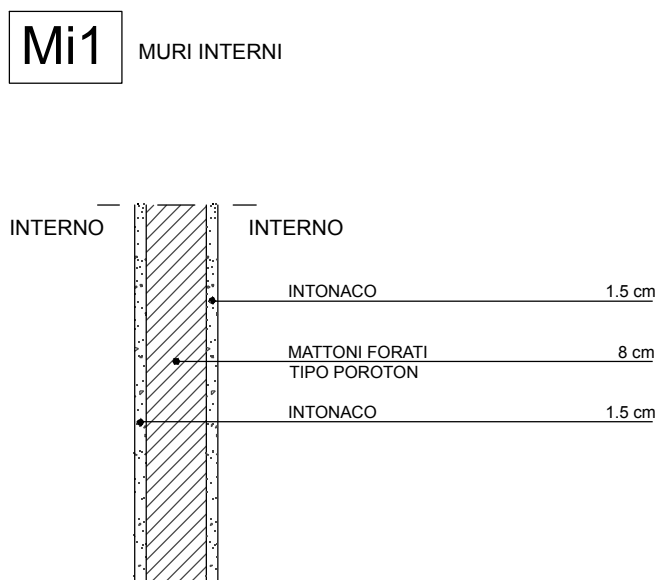


Figura 4.3-Muri interni Mi1-Edificio a telaio

Tabella 4.3-Muri interni Mi1-Edificio a telaio

Muri interni - Mi1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
2	Poroton	0,080			7,45	0,596		
3	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,110			Peso Totale	1,046		

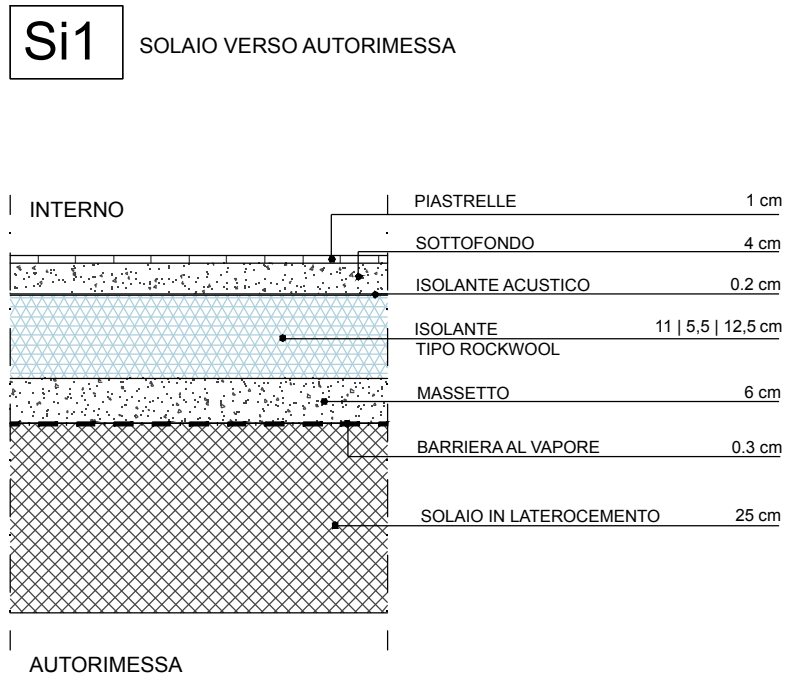


Figura 4.4-Solaio interno Si1-Edificio a telaio

Tabella 4.4-Solaio interno Si1-Edificio a telaio

Solaio verso autorimessa - Si1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Sottofondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante acustico	0,003			0,29	0,001		
4	Isolante - Rockwool	0,11	0,055	0,125	0,59	0,065	0,032	0,074
5	Massetto	0,060			4,00	0,240		
6	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
7	Solaio in c.a.	0,250			16,00	4,000		
Spessore Totale		0,476	0,421	0,491	Peso Totale	5,224	5,192	5,233

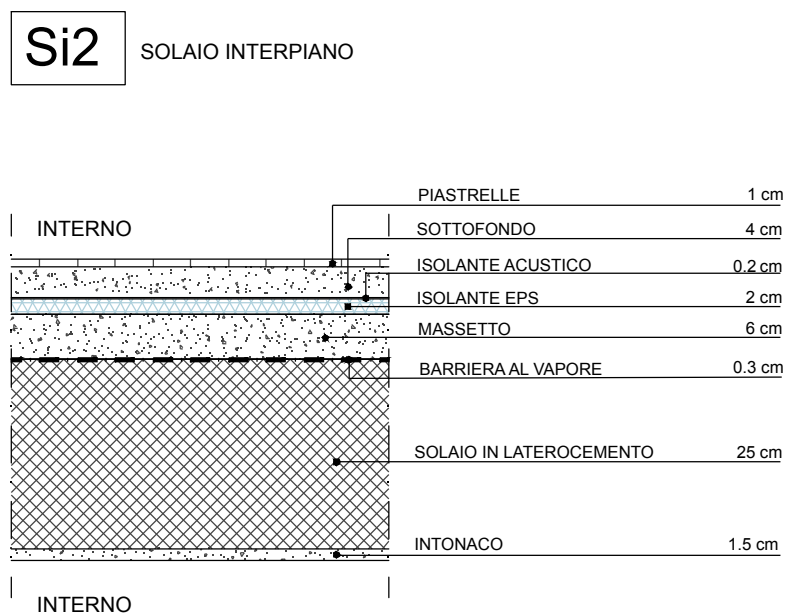


Figura 4.5-Solaio interno Si2-Edificio a telaio

Tabella 4.5-Solaio interno Si2-Edificio a telaio

Solaio interpiano - Si2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Getto di livellazione	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante acustico	0,003			0,29	0,001		
4	Isolante EPS	0,020			0,35	0,007		
5	Massetto	0,060			4,00	0,240		
6	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
7	Solaio in c.a.	0,250			16,00	4,000		
8	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,401			Peso Totale	5,391		

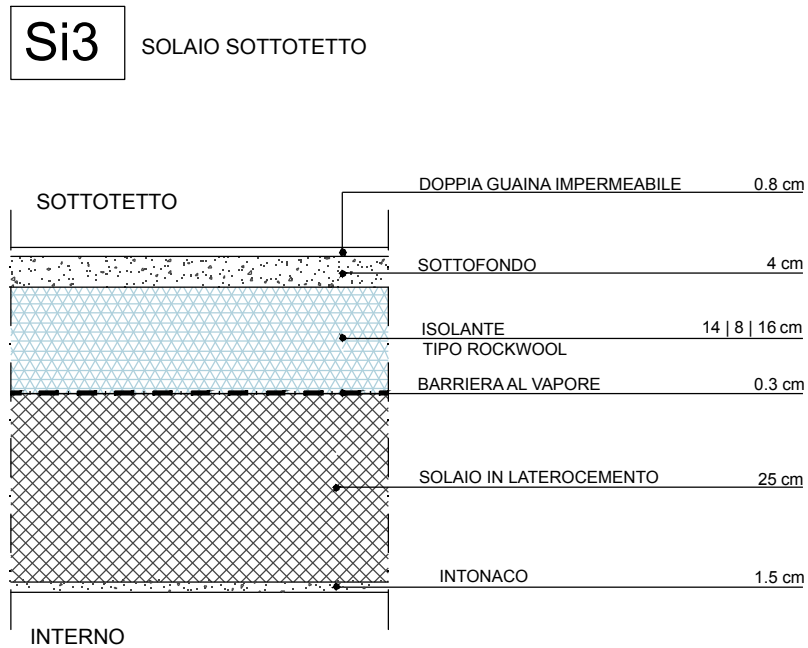


Figura 4.6-Solaio interno Si3-Edificio a telaio

Tabella 4.6-Solaio interno Si3-Edificio a telaio

Solaio sottotetto - Si3								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m ³]	Peso [kN/m ²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Sottofondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante - Rockwool	0,140	0,080	0,160	0,59	0,082	0,047	0,094
4	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
5	Solaio in c.a.	0,250			16,00	4,000		
6	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,458	0,398	0,478	Peso Totale	5,226	5,191	5,238

Se1 SOLAIO CONTROTERRA

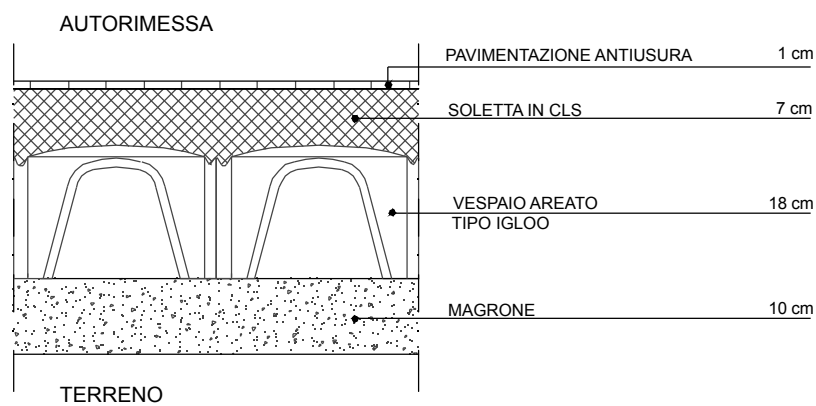


Figura 4.7-Solaio esterno Se1-Edificio a telaio

Tabella 4.7-Solaio esterno Se1-Edificio a telaio

Solaio controterra – Se1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Soletta in c.a.	0,070			25,00	1,750		
3	Vespaio areato	0,200			-	1,75		
4	Magrone	0,003			18,00	0,054		
Spessore Totale		0,512			Peso Totale	5,024		

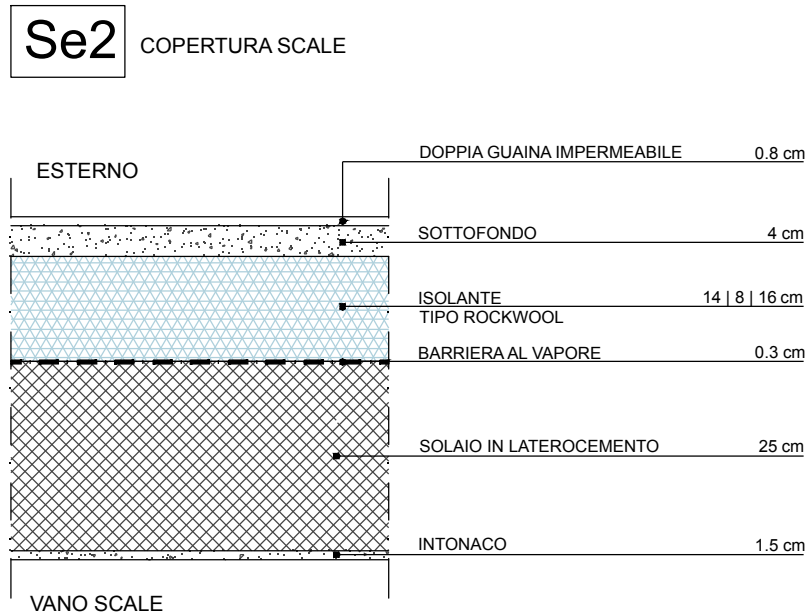


Figura 4.8-Solaio esterno Se2-Edificio a telaio

Tabella 4.8-Solaio esterno Se2-Edificio a telaio

Copertura scale - Se2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Guaina impermeabile	0,004			9,75	0,039		
2	Sottotondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante - Rockwool	0,140	0,080	0,160	0,59	0,082	0,047	0,094
4	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
5	Solaio in c.a.	0,25			16	4		
6	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,452	0,392	0,472	Peso Totale	5,054	5,019	5,066

Se3 COPERTURA INCLINATA

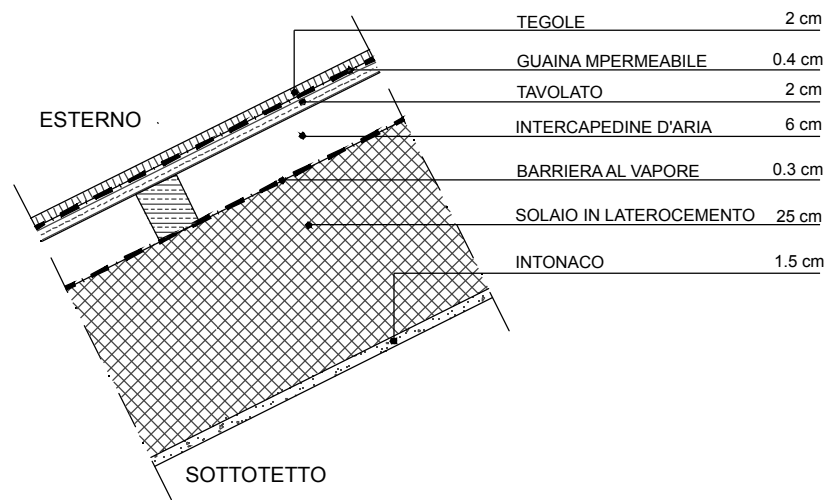


Figura 4.9-Solaio esterno Se3-Edificio a telaio

Tabella 4.9-Solaio esterno Se3-Edificio a telaio

Copertura inclinata - Se3								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Tegole	0,020			25,00	0,500		
2	Intercapedine	0,060			-	-		
3	Guaina impermeabile	0,004			9,75	0,039		
4	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
5	Solaio in c.a.	0,25			25	6,25		
6	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,352			Peso Totale	7,016		

4.2. La modellazione FEM

Si è scelto di mantenere inalterato il primo piano fuori terra, pertanto non è stato effettuato un pre-dimensionamento degli elementi trave e pilastri ma si è mantenuta la dimensione esistente. Partendo da tali dati, si è deciso di realizzare una doppia rastremazione dei pilastri ogni due piani e di realizzare le travi interne in spessore con il solaio.

Per quanto riguarda la modellazione, essa è stata svolta all'interno dell'ambiente *CAD 3D-STRUTTURA* presente all'interno del software *CDM DOLMEN*.

Brevemente, si riportano gli elementi strutturali modellati:

- Fondazioni: le strutture di fondazione sono state modellate come elemento “asta”, con sezione a T nota e coefficiente di Winkler definito;
- Pilastri: sono stati modellati come elemento *asta* a sezione quadrata variabile;
- Travi: anch'esse sono state modellate come elemento *asta* a sezione rettangolare;
- Solai: i solai sono stati modellati come elemento *solaio*, esso ha solo funzione di ripartizione del carico ma non influisce nel calcolo della struttura;
- Setti: i vani ascensore sono stati modellati come elemento *guscio*.

In *Figura 4.10* è riportato il modello agli elementi finiti appena descritto:

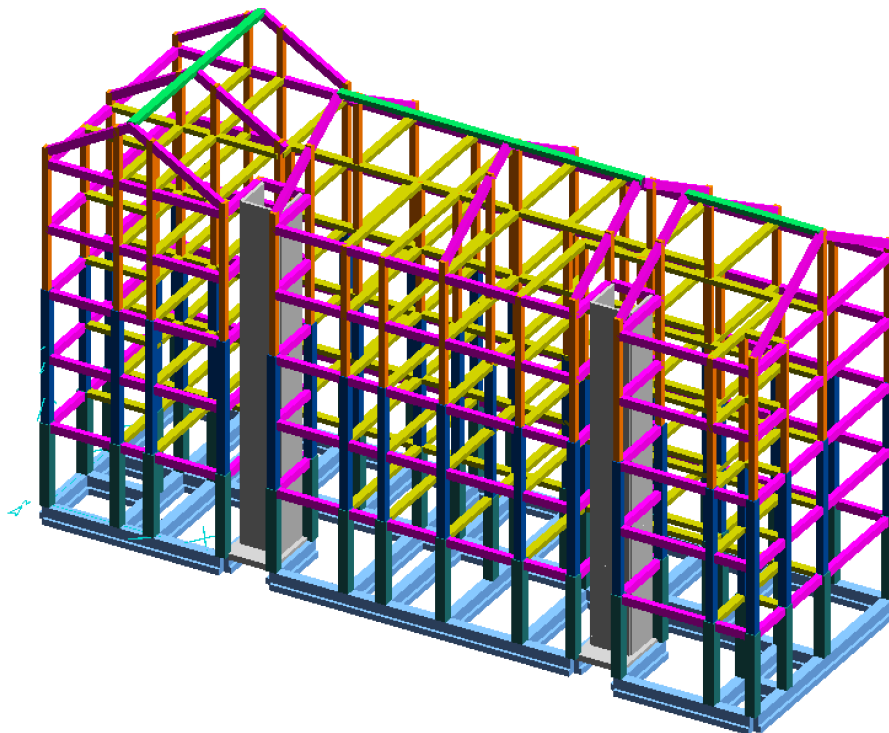


Figura 4.10-Modello FEM, vista assonometrica-Edificio a telaio

4.3. Modellazione delle azioni

Le azioni agenti sulle costruzioni sono state modellate secondo quanto riportato al paragrafo 2.5.1.3, seguendo il criterio di “Classificazione delle azioni secondo la variazione della loro intensità nel tempo” [4].

4.3.1. Azioni permanenti

I carichi permanenti (G) sono definiti come “azioni che agiscono durante tutta la vita nominale di progetto della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è molto lenta e di modesta entità” [4]. Si dividono in:

- Carichi permanenti strutturali (G_1)

Sono considerati carichi permanenti strutturali i carichi gravitazionali associati ai pesi propri degli elementi strutturali. Vengono assegnati dal software di calcolo in base alle caratteristiche geometriche e al materiale.

- Carichi permanenti non strutturali (G_2)

Sono considerati tali i carichi presenti sulla costruzione durante il normale esercizio ma che non hanno funzione strutturale, quali quelli dovuti a tamponature esterne, tramezzi, sottofondi, massetti, impianti e altri; corrispondenti al loro peso proprio.

I carichi permanenti non strutturali lineari (G_2) che gravano sugli orizzontamenti potranno assumersi come carichi uniformemente distribuiti (g_2) secondo quanto prescritto al paragrafo 3.1.3 delle NTC 2018.

È il caso dei tramezzi, la cui entità di carico è valutata come segue:

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

4.3.2. Azioni variabili

I carichi variabili (Q) sono definiti come “azioni che agiscono con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel corso della vita nominale della struttura” [4]. Si dividono in:

- Sovraccarichi (q_k)

I valori dei sovraccarichi dipendono dalla destinazione d'uso della costruzione e sono riportati in Tabella 3.1.II delle NTC. Si riporta in Figura 4.11 l'estratto della tabella con i valori d'interesse per il caso in esame:

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale			
	Aree per attività domestiche e residenziali; sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi (ad esclusione delle aree soggette ad affollamento), camere di degenza di ospedali	2,00	2,00	1,00
	Scale comuni, balconi, ballatoi	4,00	4,00	2,00
[...]				
H-I-K	Coperture			
	Cat. H Coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione	0,50	1,20	1,00
	Cat. I Coperture praticabili di ambienti di categoria d'uso compresa fra A e D	secondo categorie di appartenenza		
	Cat. K Coperture per usi speciali, quali impianti, eliporti.	da valutarsi caso per caso		

Figura 4.11-Estratto Tabella 3.1.II NTC 2018- Sovraccarichi per le diverse categorie d'uso

- Azioni del vento

Il vento generalmente esercita azioni che variano nel tempo e nello spazio generando sulle costruzioni effetti dinamici. Tuttavia, per gli edifici più diffusi, tali azioni possono essere ricondotte ad azioni statiche equivalenti in termini di pressioni che agiscono sui singoli elementi.

La pressione del vento è calcolata come:

$$p = q_f \cdot C_e \cdot C_p \cdot C_d$$

Dove:

q_f è la pressione di riferimento,

C_e è il coefficiente di esposizione

C_p è il coefficiente di pressione

C_d è il coefficiente dinamico.

Tali parametri sono calcolati secondo quanto prescritto ai § 3.3.6, 3.3.7, 3.3.8 delle NTC 2018.

La pressione del vento è stata quindi calcolata mediante il modulo VENTO presente in CDM DOLMEN.

Si riportano in Figura 4.12 le finestre di input e output presenti nel software:

The screenshot displays two windows from the 'Vento - CDM DOLMEN e omnia IS 18' software. The left window, titled 'Vento - CDM DOLMEN e omnia IS 18 - c:\dolmen18\lavori\CA_TO4', contains input parameters for wind pressure calculations. The right window, titled 'Edifici a pianta rettangolare', shows a schematic of a rectangular building with wind pressure distribution and calculated values.

Input Parameters (Left Window):

- Formulas:**
 - $p = q_{ref} \cdot C_e(ct) \cdot C_p \cdot C_d$ (pressione del vento)
 - $p_f = q_{ref} \cdot C_e \cdot C_f$ (azione tangente del vento)
- Legend:**
 - q_{ref} = pressione cinetica di riferimento
 - C_e = coefficiente di esposizione
 - ct = coefficiente di topografia
 - C_p = coefficiente di forma
 - C_d = coefficiente dinamico
 - C_f = coefficiente di attrito
- Data Section:**
 - General:** Regione (Piemonte), Provincia (Torino), Comune (Torino), Zona 1.
 - Altitudine:** 239 m s.l.m.
 - Periodo di ritorno T_r :** 50 anni.
 - Velocità di Riferimento:** 25 m/sec.
 - Numero di quote di calcolo:** 10.

Output Data (Right Window):

The right window shows a schematic of a rectangular building with wind pressure distribution. The calculated values are as follows:

Elemento	Esterno p [N/m ²]	Interno p [N/m ²]
Parete 1 (A-B)	462.3	0
Parete 2 (D-E)	231.2	0
Falda 1 (B-C)	-67.2	0
Falda 2 (C-D)	268.7	0

Azione tangente [N/m²]:

Elemento	Azione tangente [N/m ²]
p(A-E)	5.8
p(B-D)	6.7
p(C)	7.3

Figura 4.12-Dati di input e Output Modulo VENTO-CDM DOLMEN

- Azioni della neve

Il carico della neve sulle coperture è calcolato come:

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_e \cdot C_t$$

Dove:

q_{sk} è il valore di riferimento del carico della neve al suolo;

μ_i è il coefficiente di forma della copertura;

C_e è il coefficiente di esposizione;

C_t è il coefficiente termico.

Tali parametri sono calcolati secondo quanto prescritto ai § 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5 delle NTC 2018.

Il carico della neve è stato quindi calcolato mediante il modulo NEVE presente in CDM DOLMEN.

Si riportano in Figura 4.13 la finestra di input e output presente nel software:

The screenshot shows the 'Neve - CDM DOLMEN e omnia IS 18' software window. The interface is divided into input fields on the left and output results on the right.

Input Fields (Left):

- Carico neve al suolo:**
 - Regione: Piemonte
 - Provincia: Torino
 - Comune: Torino
 - Altitudine di riferimento [m]: 239
 - Periodo di ritorno: 50 anni
 - Carico neve al suolo q_{sk} [kN/m²]: 1.5398
- Coeff. di esposizione:** 1.0
- Coeff. termico:** 1.0
- Casi particolari:** (empty)
- Creazione relazione:** ☒ Crea relazione
- Unità:** kN, m

Output Results (Right):

Tabella dei coefficienti di forma (μ) e dei coefficienti di esposizione (C_e) per diverse configurazioni di copertura:

	μ	μ_1	$0.5\mu_1$
$q_e(A)$ [kN/m]	.623	.078	
$q_e(B)$ [kN/m]	.623	.078	

Diagramma della copertura a due falde con inclinazione di 30° per lato. Le azioni di neve sono indicate come $q_e(A)$ e $q_e(B)$ sulle falde.

Figura 4.13-Finestra di input e output NEVE-CDM DOLMEN

4.3.3. Azioni sismiche

Le azioni sismiche (E) sono definite come “azioni derivanti dai terremoti” [4].

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 e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale. [5]

I parametri sismici necessari per le successive analisi sismiche sono inputati nel software CDM DOLMEN. Si riporta in Figura 4.14 la finestra di input dei parametri sismici e degli spettri di risposta come risultato di output.

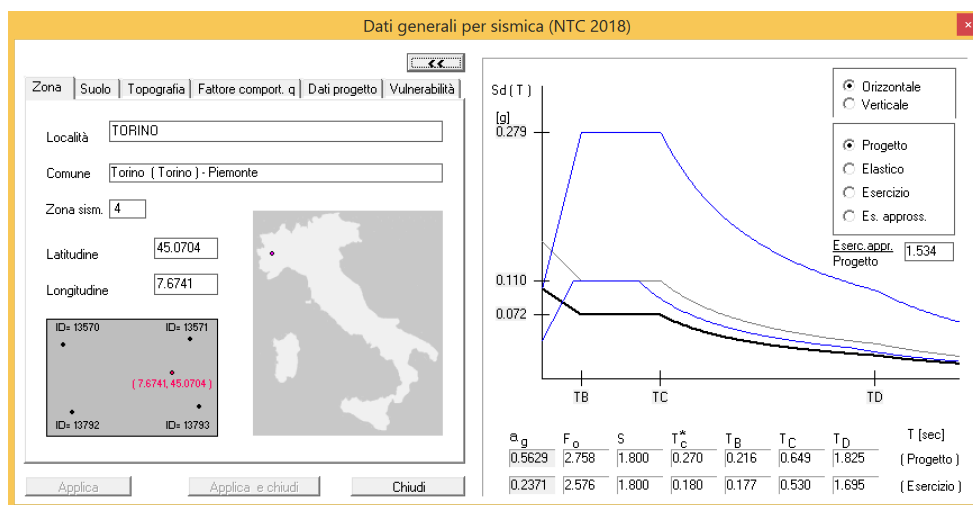


Figura 4.14-Dati di input e output Analisi sismica-CDM DOLMEN

4.4. Calcolo delle sollecitazioni

Come specificato nelle NTC 2018 la valutazione della sicurezza sulle costruzioni viene condotta con il metodo semiprobabilistico agli stati limite, basato sull'impiego dei coefficienti parziali di sicurezza. Con tale metodo la sicurezza strutturale deve essere verificata con il confronto tra la resistenza e l'effetto delle azioni.

La progettazione dell'edificio avverrà quindi secondo la combinazione fondamentale definita nell'equazione 2.5.1 delle NTC:

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

Per valutare le azioni sismiche sulla struttura, si adotterà la combinazione sismica definita nell'equazione 2.5.5 delle NTC:

$$E + G_1 + G_2 + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

L'azione sismica è stata presa in conto mediante l'applicazione dell'analisi lineare statica e dinamica secondo quanto riportato nel paragrafo 7.3.3 delle NTC 2018.

L'involuppo delle differenti combinazioni di carico rappresenta il punto di partenza per la progettazione strutturale.

Il primo risultato da analizzare è quanto scarica l'edificio sul terreno. I risultati sono riportati in Figura 4.15. Le pressioni sul terreno da parte della struttura sono abbastanza contenute. In ragione di ciò, non son state effettuate verifiche geotecniche delle fondazioni.

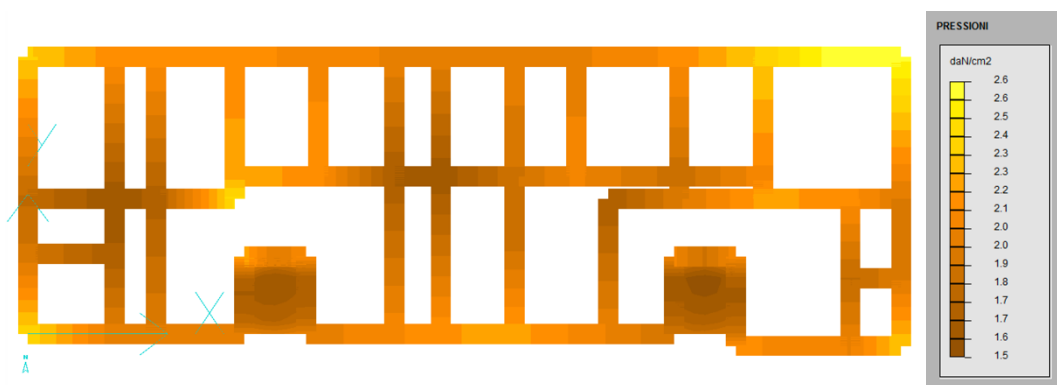


Figura 4.15-Pressioni sul terreno-Edificio a telaio

Successivamente si son ottenuti i diagrammi di sollecitazione sulle strutture in elevazione gettate in opera.

Si riportano in Figura 4.16 i diagrammi di momento flettente:

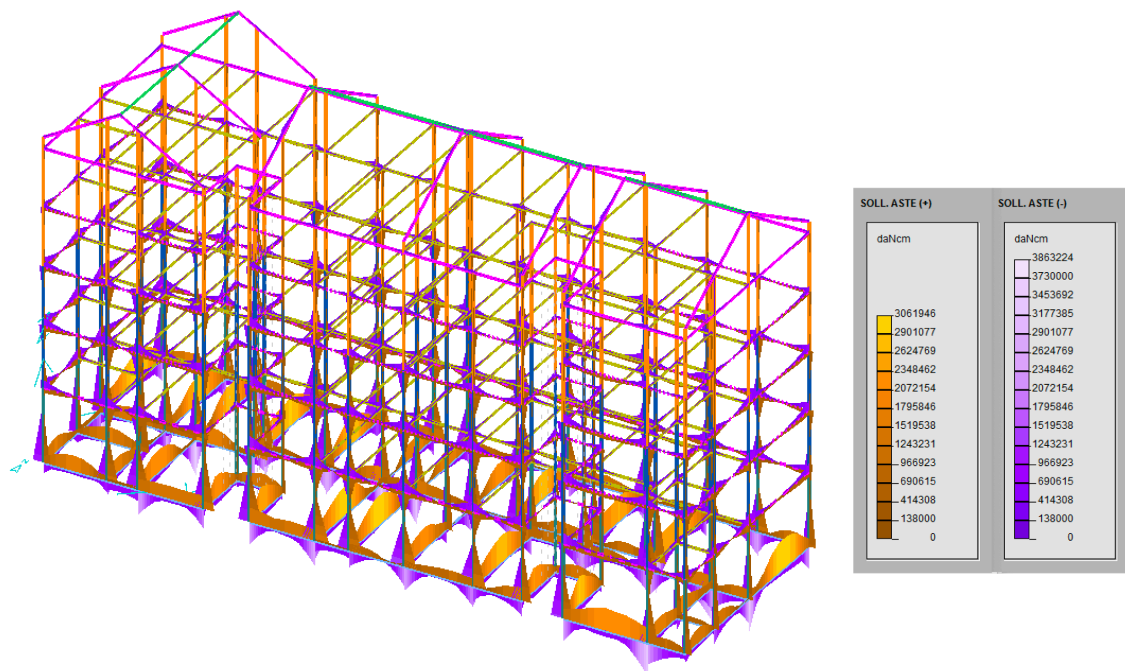


Figura 4.16-Sollecitazioni M_z agenti sulle aste-Edificio a telaio

Si riportano in Figura 4.17 i diagrammi di sforzo normale:

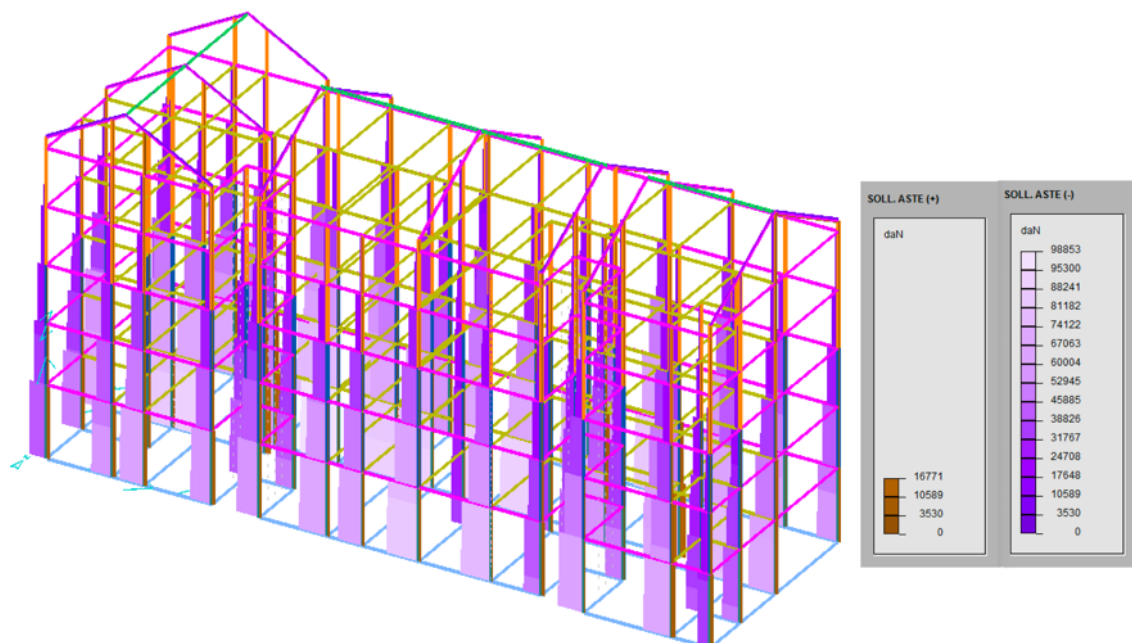


Figura 4.17-Sforzo Normale N agente sulle aste-Edificio a telaio

4.5. Progettazione degli elementi strutturali

Ottenute le sollecitazioni agenti sulla struttura, si è potuto procedere alla progettazione dei singoli elementi strutturali. Per far ciò, si è fatto uso di moduli aggiuntivi presenti all'interno del software. Tali moduli verranno citati volta per volta ove utilizzati.

4.5.1. Solai

In prima analisi, sono stati progettati i solai in quanto non fisicamente modellati nella struttura. Qualora la sezione ipotizzata per i solai non fosse sufficiente a resistere alle sollecitazioni agenti, occorrerebbe riassegnare manualmente i carichi dovuti al peso proprio dei solai.

Per la progettazione dei solai, si è fatto ricorso al modulo “TRAVE CONTINUA”. In questo caso, è stato necessario calcolare all'interno dello stesso modulo anche le sollecitazioni agenti su tali elementi. Per semplicità si è progettato il travetto di solaio con luce maggiore all'interno dell'edificio.

Si riporta in Figura 4.18 l'output delle sollecitazioni agenti calcolato dal software:

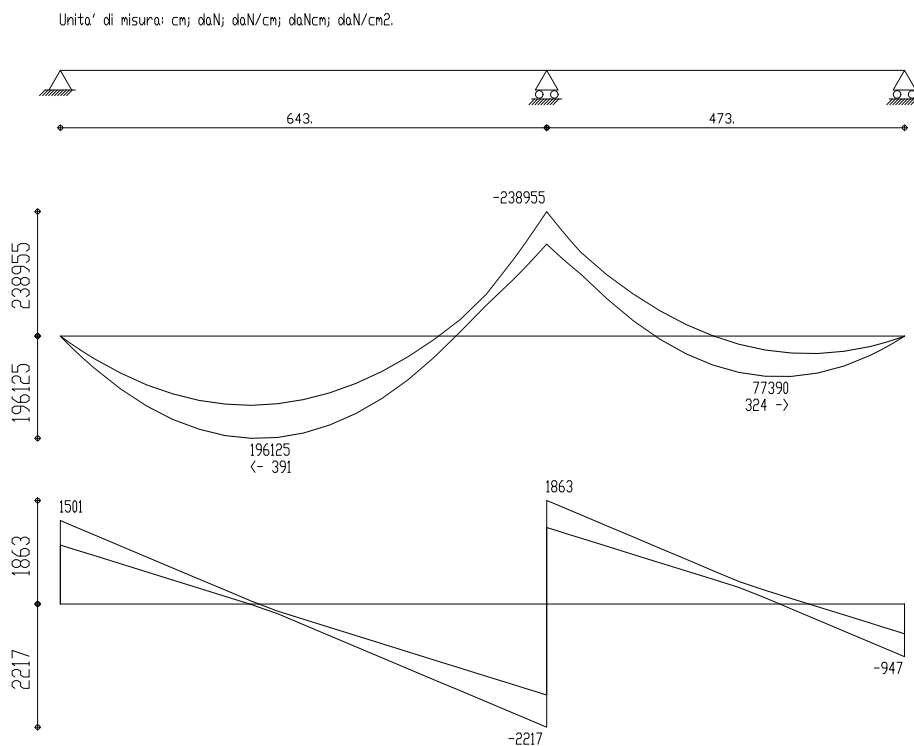


Figura 4.18-Sollecitazioni agenti su solaio-Edificio a telaio

Calcolate le sollecitazioni si passa alla progettazione vera e propria. Il modulo utilizzato progetta le armature partendo da uno schema tipo selezionato dall'utente, rispettando i limiti imposti dalle NTC 2018.

In questo caso, lo schema scelto è quello definito per i solai.

Si riporta in Figura 4.19 la finestra di output con la disposizione dei ferri d'armatura calcolata dal software:

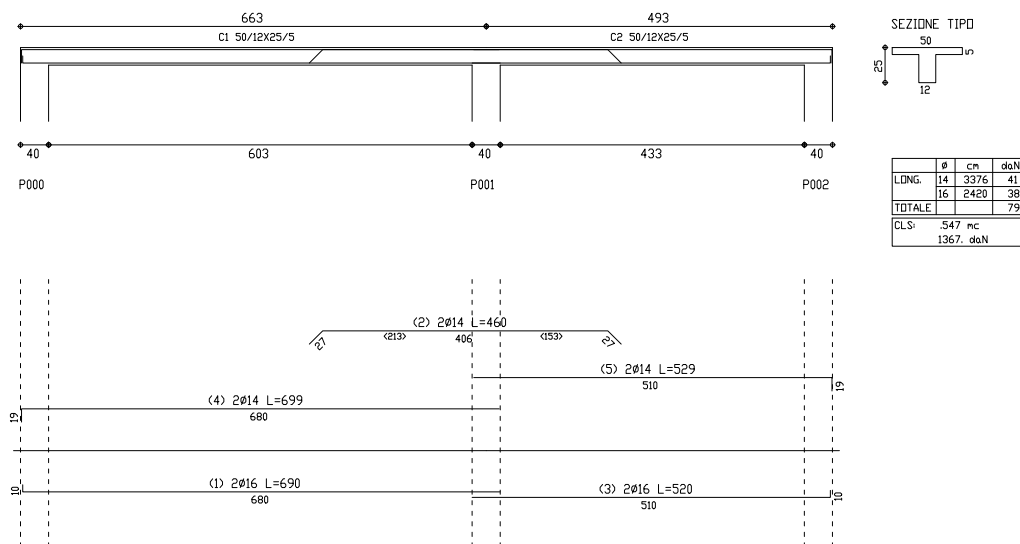


Figura 4.19-Carpenteria solaio-Edificio a telaio

4.5.2. Fondazioni

Si è proceduto alla progettazione delle armature delle travi di fondazione. Il modulo di calcolo utilizzato è il medesimo dei solai. Lo schema tipo scelto è quello per travi di fondazione.

Il software esegue in automatico la progettazione di ciascuna travata di fondazione. A titolo di esempio si riporta in Figura 4.20 la finestra di output con la disposizione dei ferri d'armatura di una travata:

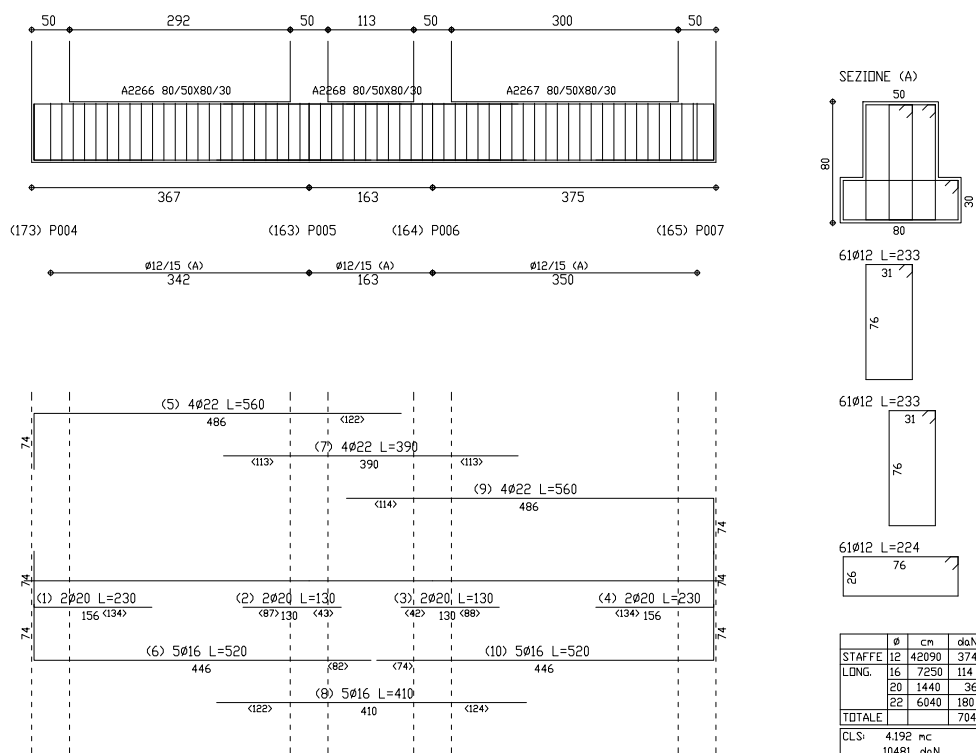


Figura 4.20-Carpenteria travi di fondazione-Edificio a telaio

4.5.3. Travi

Successivamente si sono progettate le travi di bordo e quelle interne, aventi sezioni differenti.

Il modulo utilizzato è il medesimo e lo schema tipo è quello definito per le travi.

Si riporta in Figura 4.21 e in Figura 4.22 la finestra di output con la disposizione dei ferri d'armatura rispettivamente di una travata di bordo e di una interna:

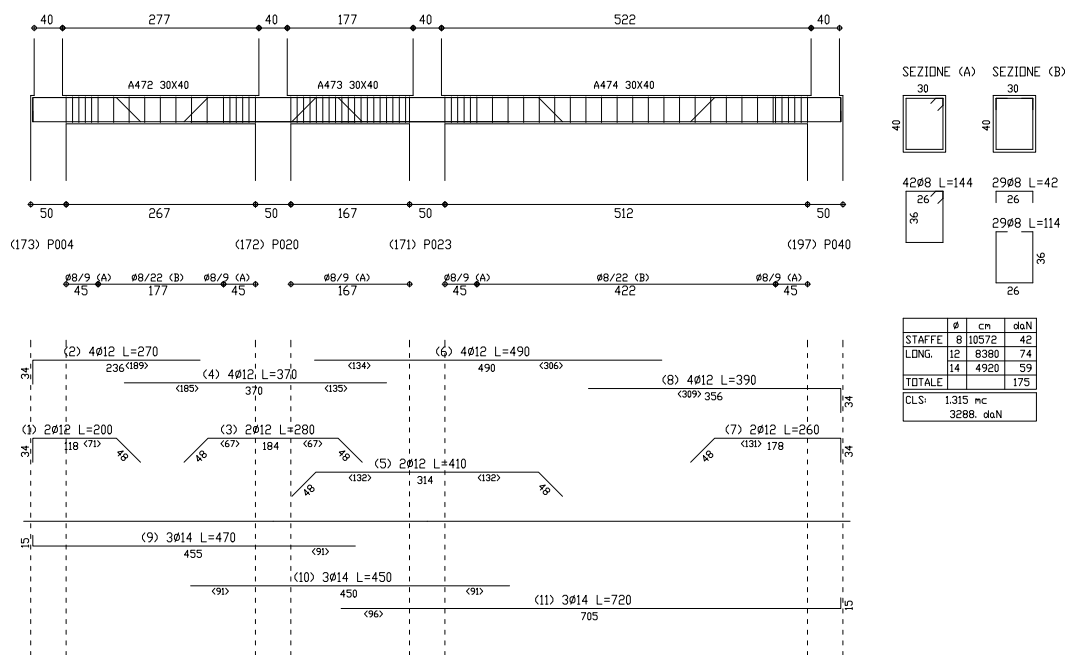


Figura 4.21-Carpenteria travi di bordo-Edificio a telaio

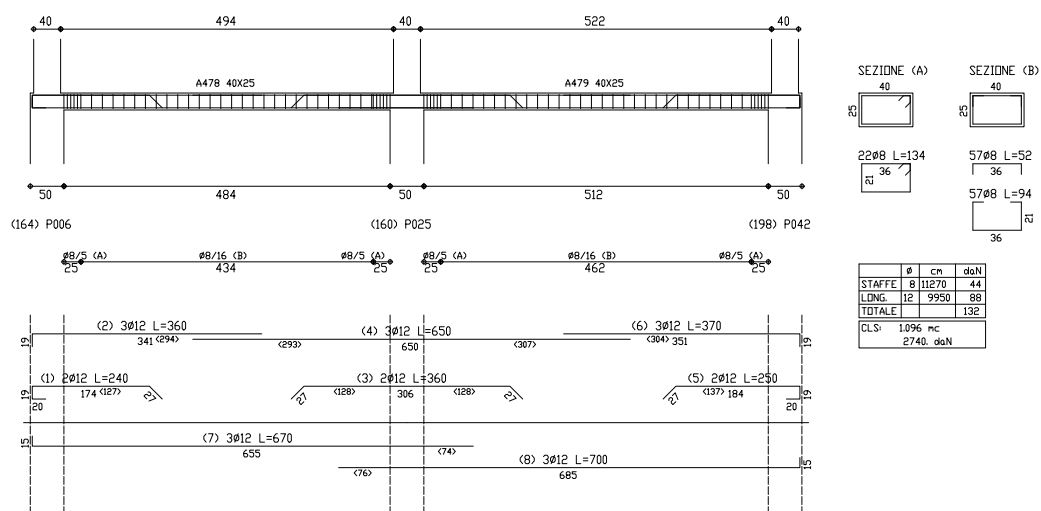


Figura 4.22-Carpenteria travi interne-Edificio a telaio

4.5.4. Pilastri

Il calcolo delle armature per i pilastri è stato eseguito mediante il modulo PILASTRI.

Il modulo “Pilastri”, dopo aver letto le informazioni sulla geometria e le caratteristiche delle sollecitazioni dal modello tridimensionale, permette di inserire uno schema di armature longitudinali e trasversali e di progettare in modo da soddisfare le verifiche di resistenza e le richieste di normativa in tema di armatura minima. Gli schemi d’armatura si differenziano leggermente dagli analoghi di “Trave continua”, in quanto lavorano sulla sezione orizzontale della singola asta. Nell’eseguire il progetto delle barre longitudinali, il programma inserisce i livelli di armatura nell’ordine e determina la configurazione minima che verifica. Le barre di armatura sono modificabili a livello di sezione orizzontale, mentre vengono elaborate in modo completamente automatico dal programma per quanto riguarda il loro sviluppo verticale in modo da ancorarle correttamente in ogni sezione dove occorrono. Il progetto delle staffe viene eseguito rispettando i minimi di norma e coprendo gli sforzi di taglio a S.L.U.; l’armatura trasversale è separata in campi dovendole disporre a passo variabile [6].

Il modulo, per ogni pilastrata calcolata, genera una tabella (Figura 4.23) con riportati gli esiti delle verifiche effettuate su ogni tratto della pilastrata. Oltre alle verifiche, il programma riporta la percentuale di armatura per ogni singola asta.

ASTA -->	1	2	3	4	5	6
SLU	SI	SI	SI	SI	SI	SI
ESERCIZIO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
TAGLIO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
N MAX	SI	SI	SI	SI	SI	SI
SNELLEZZA	SI	SI	SI	SI	SI	SI
%ARMATURE	SI 1.29	SI 1.01	SI 1.01	SI 1.79	SI 1.79	SI 1.79
GENERALE	SI					

Figura 4.23-Tabella report pilastro-Edificio a telaio

Si riporta inoltre in Figura 4.24 l'output grafico del modulo con la carpenteria della pilastrata appena calcolata:

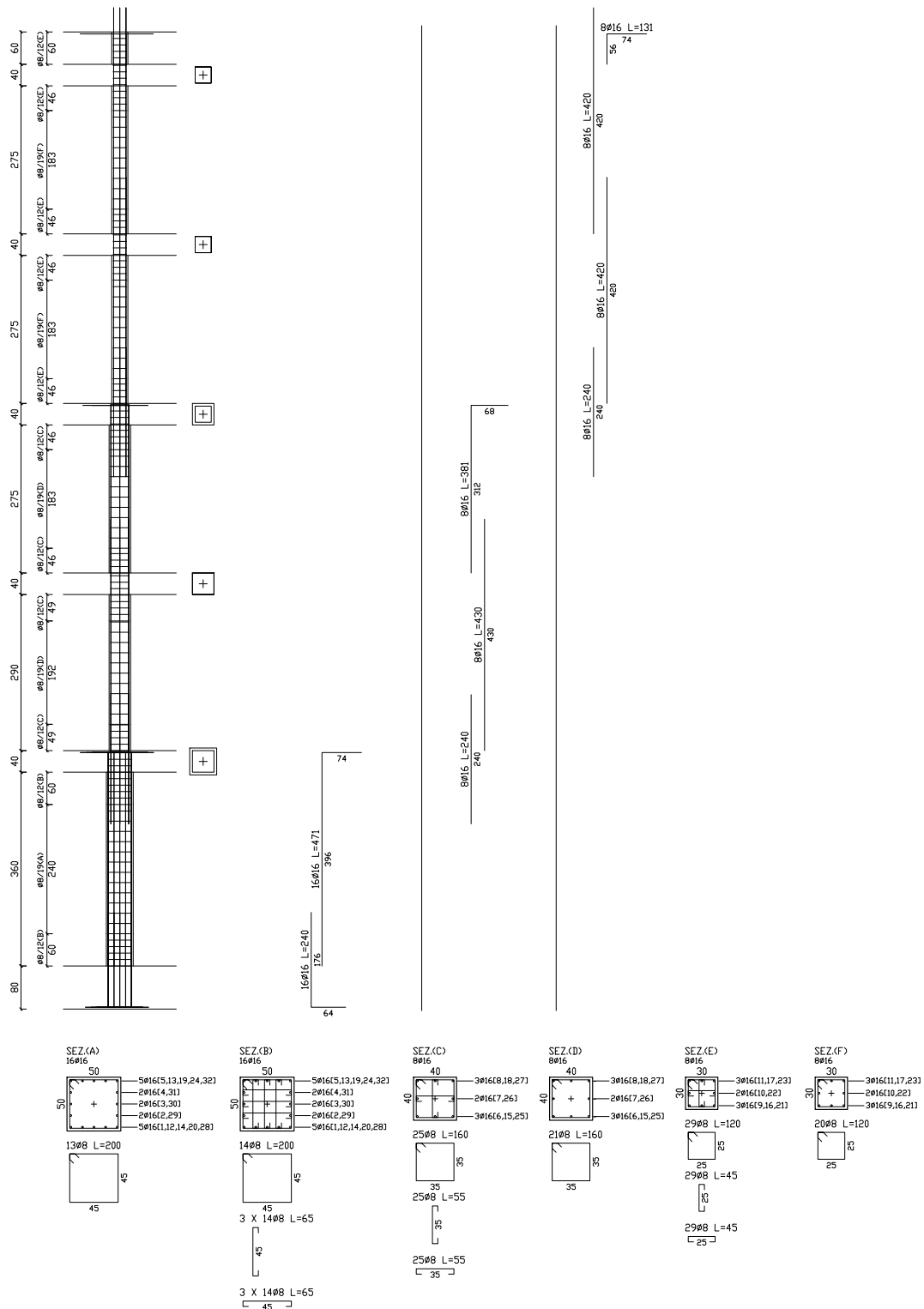


Figura 4.24-Carpenteria pilastrata-Edifício a telão

4.5.5. Setti

Il calcolo per le armature dei setti è stato eseguito mediante il modulo “PIASTRE E SETTI”. Il programma calcola in automatico le aree imposte da normativa e la lunghezza delle zone critiche. Si riporta in Figura 4.25 l’output grafico ottenuto dal software:

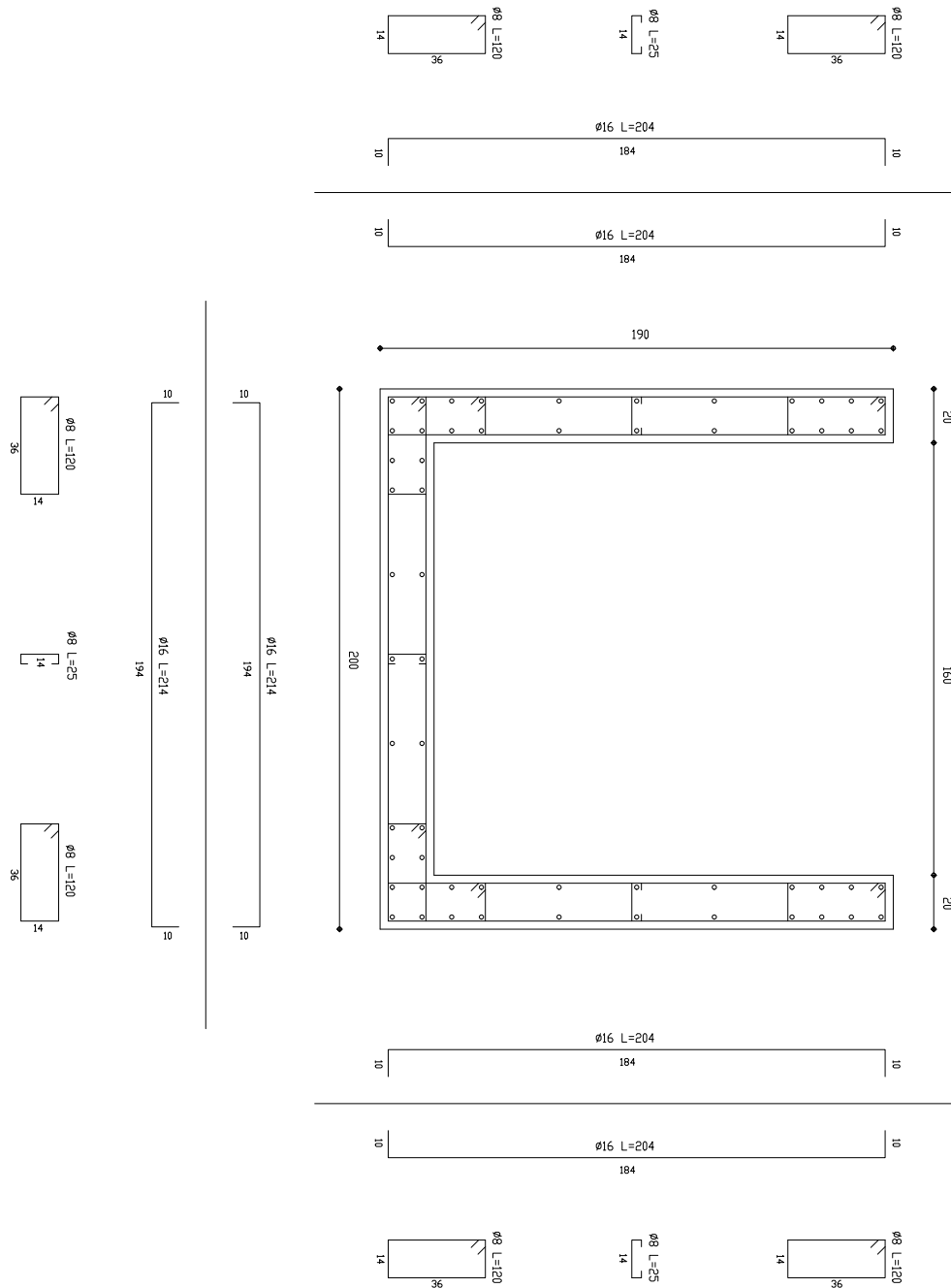


Figura 4.25-Carpenteria setti-Edificio a telaio

5. L'edificio a pannelli prefabbricati

L'edificio a pannelli prefabbricati è stato progettato secondo i criteri riportati al paragrafo 2.1. Infatti, la tecnologia costruttiva adottata per il primo piano fuori terra è rimasta la medesima per i tre edifici come riportato in Figura 5.1:

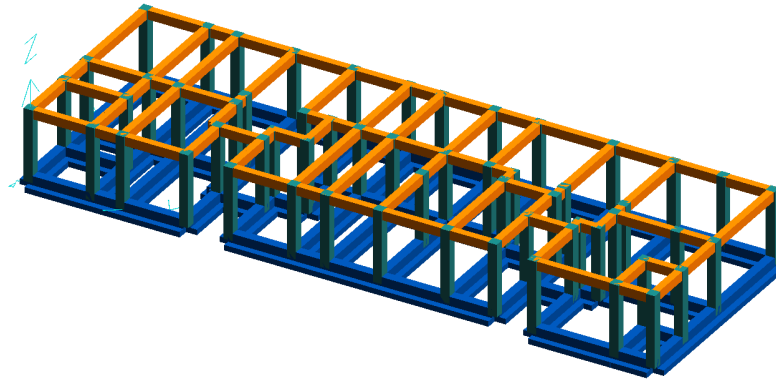


Figura 5.1-Struttura in c.a. gettato in opera-Edificio a pannelli

In corrispondenza delle travi del primo piano sono stati disposti i pannelli in calcestruzzo prefabbricati. La filosofia progettuale seguita è stata la medesima utilizzata per l'edificio in legno in quanto tale tecnologia non è ad oggi molto diffusa in Italia e non è possibile reperire esempi in letteratura da cui potersi ispirare.

La scelta della dimensione dei pannelli utilizzati è stata dettata da ciò che offre il mercato.

Si sono definiti i componenti dell'involucro edilizio:

- le strutture portanti esterne sono costituite da pannelli prefabbricati di tipo “sandwich” con interposto fra due strati di calcestruzzo armato uno strato di isolante di spessore variabile a seconda della località di costruzione,
- le strutture portanti interne sono costituite da pannelli prefabbricati in calcestruzzo armato,
- le partizioni non portanti dell'edificio sono realizzate con doppio pannello in cartongesso,
- le chiusure e le partizioni orizzontali sono costituite da solai alveolari in calcestruzzo armato precompresso.

5.1. Disarticolazione tecnologica e analisi dei carichi

Per agevolare la lettura dell'edificio è stata realizzata la disarticolazione tecnologica, si riportano nelle successive pagine le caratteristiche di ciascun componente dell'edificio.

Me1 MURI ESTERNI VERSO AUTORIMESSA

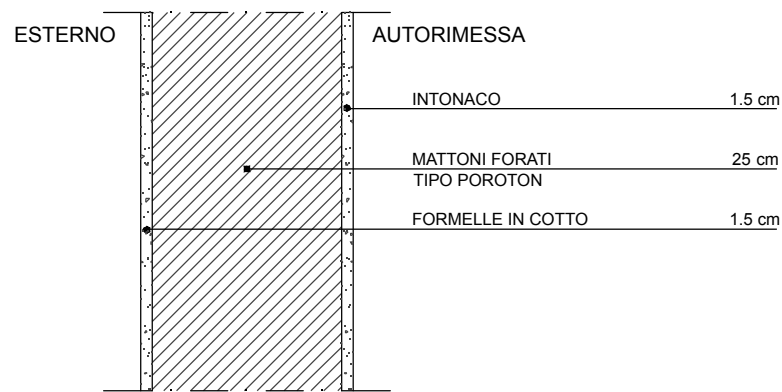


Figura 5.2-Muri esterni Me1-Edificio a pannelli

Tabella 5.1-Muri esterni Me1-Edificio a pannelli

Tabella 2.1 Muri esterni verso autorimessa a parete

Muri esterni verso autorimessa - Me1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
2	Poroton	0,250			7,45	1,863		
3	Formelle	0,015			21,10	0,317		
Spessore Totale		0,280			Peso Totale	2,405		

Me2 MURI ESTERNI STRUTTURALI

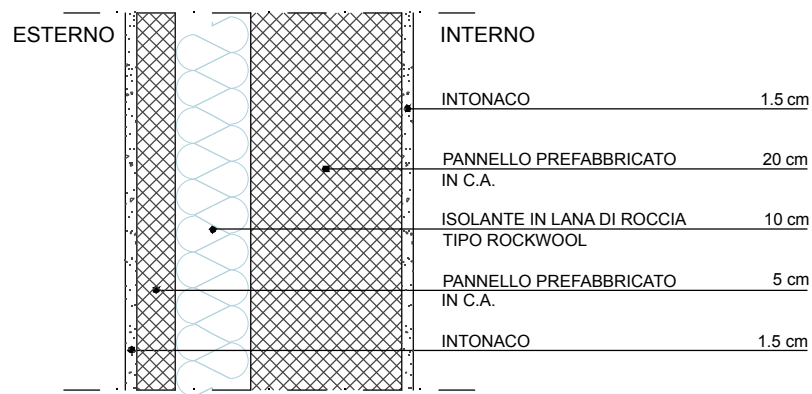


Figura 5.3-Muri esterni Me2-Edificio a pannelli

Tabella 5.2-Muri esterni Me2-Edificio a pannelli

Muri esterni strutturali - Me2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
2	Pannello c.a.	0,050			25,00	1,250		
3	Isolante - Rockwool	0,120	0,065	0,130	0,59	0,071	0,038	0,076
4	Pannello c.a.	0,200			25,00	5,000		
5	Cartongesso	0,013			4,17	0,052		
6	Cartongesso	0,013			4,17	0,052		
Spessore Totale		0,410	0,340	0,405	Peso Totale	6,650	6,425	6,425

Mi1

MURI INTERNI STRUTTURALI

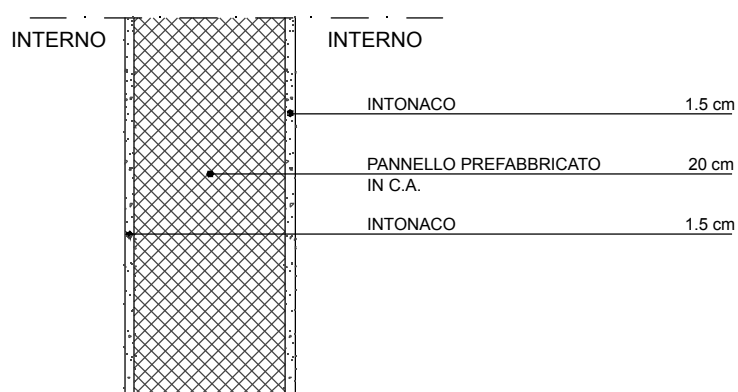


Figura 5.4-Muri interni Mi1-Edificio a pannelli

Tabella 5.3-Muri interni Mi1-Edificio a pannelli

Muri Interni strutturali - Mi1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Intonaco	0,0150			15,00	0,225		
2	Pannello c.a.	0,200			25,00	5,000		
3	Intonaco	0,0150			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,230			Peso Totale	5,450		

Mi2 MURI INTERNI

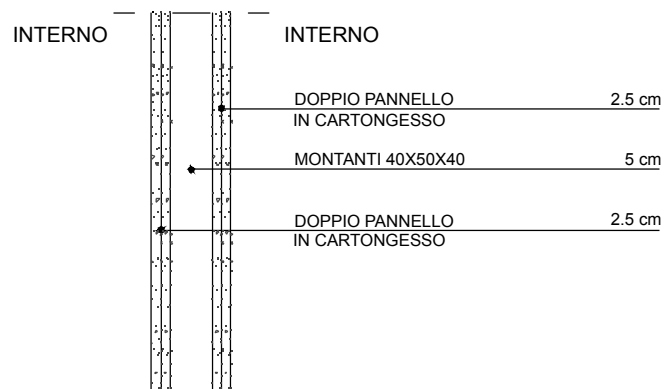


Figura 5.5-Muri interni Mi2-Edificio a pannelli

Tabella 5.4-Muri interni Mi2-Edificio a pannelli

Muri Interni - Mi2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Cartongesso	0,0125			21,10	0,264		
2	Cartongesso	0,0125			21,10	0,264		
3	Intercapedine	0,0500			-	-		
4	Cartongesso	0,0125			21,10	0,264		
5	Cartongesso	0,0125			21,10	0,264		
Spessore Totale		0,100			Peso Totale	1,055		

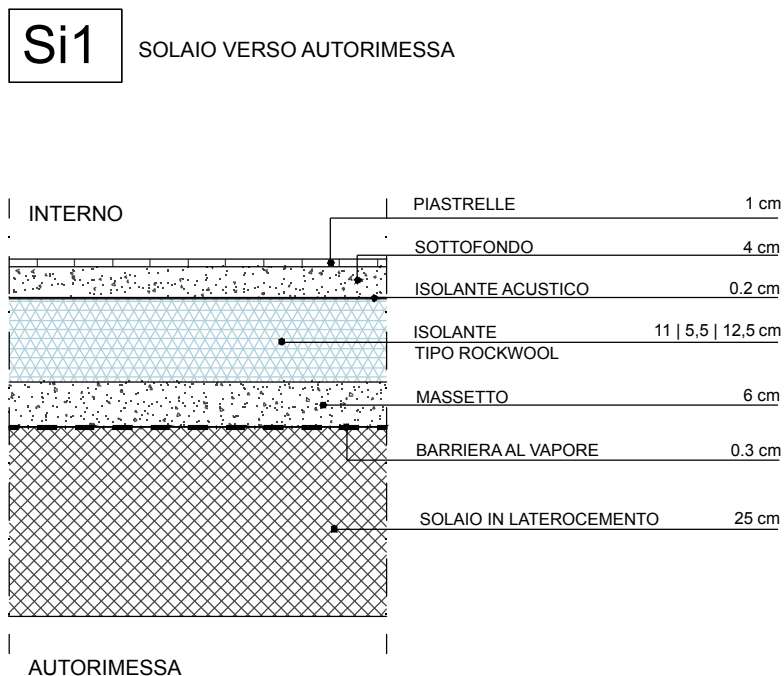


Figura 5.6-Solaio interno Si1-Edificio a pannelli

Tabella 5.5-Solaio interno Si1-Edificio a pannelli

Solaio verso autorimessa - Si1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Sottofondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante acustico	0,003			0,29	0,001		
4	Pannelli radianti	0,035			0,25	0,009		
5	Isolante - Rockwool	0,11	0,055	0,125	0,59	0,065	0,032	0,074
6	Massetto	0,060			4,00	0,240		
7	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
8	Solaio in c.a.	0,250			25,00	6,250		
Spessore Totale		0,511	0,456	0,526	Peso Totale	7,483	7,450	7,492

Si2 SOLAIO INTERPIANO

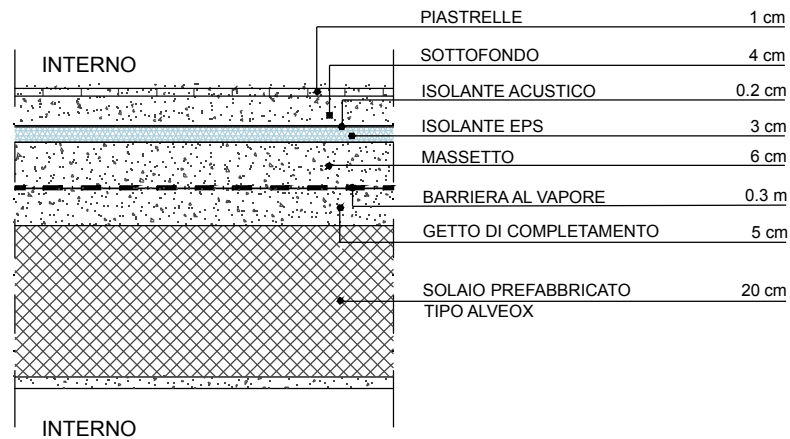


Figura 5.7-Solaio interno Si2-Edificio a pannelli

Tabella 5.6-Solaio interno Si2-Edificio a pannelli

Solaio interpianto - Si2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Sottotondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante acustico	0,003			0,29	0,001		
4	Isolante EPS	0,020			0,35	0,007		
5	Massetto	0,060			4,00	0,240		
6	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
7	Getto di completamento	0,050			25,00	1,250		
8	Solaio Alveox	0,200			13,34	2,667		
9	Cartongesso	0,013			21,10	0,264		
Spessore Totale		0,399			Peso Totale	5,348		

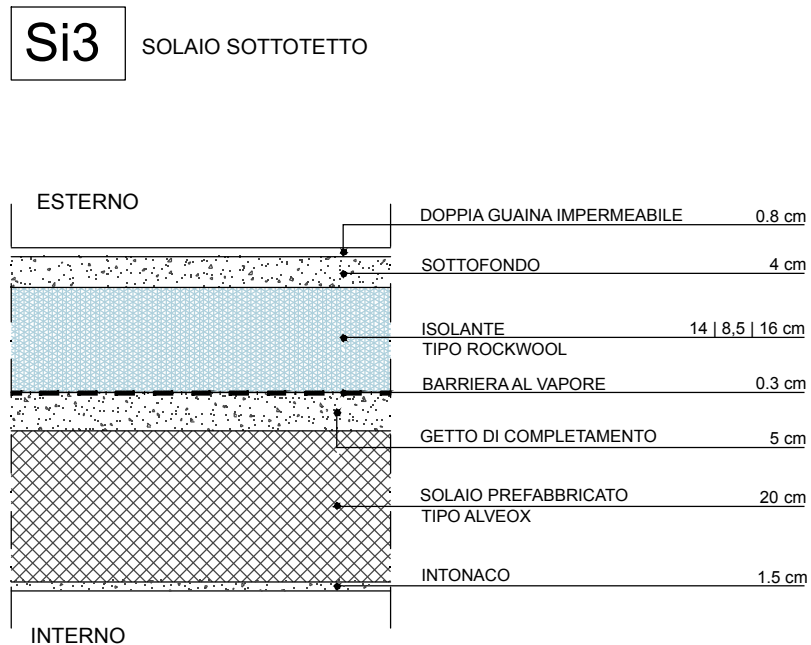


Figura 5.8-Solaio interno Si3-Edificio a pannelli

Tabella 5.7-Solaio interno Si3-Edificio a pannelli

Solaio sottotetto - Si3								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Sottofondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante - Rockwool	0,14	0,085	0,160	0,59	0,083	0,050	0,094
4	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
5	Getto di completamento	0,050			25,00	1,250		
6	Solaio Alveox	0,200			13,34	2,667		
7	Cartongesso	0,013			0,25	0,003		
Spessore Totale		0,456	0,401	0,476	Peso Totale	4,922	4,889	4,933

Se1 SOLAIO CONTROTERRA

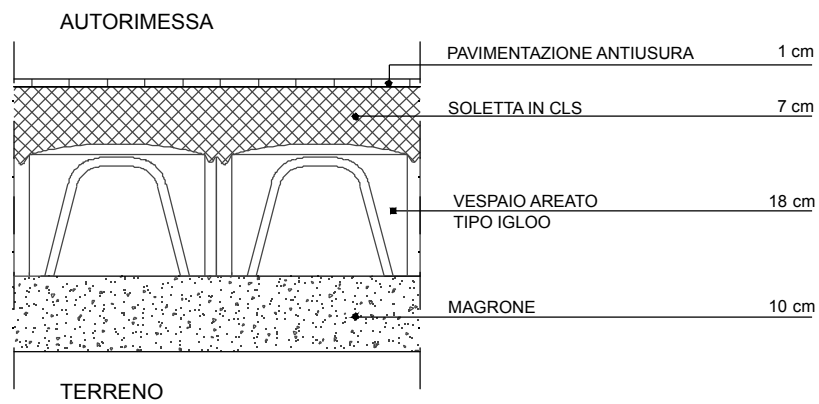


Figura 5.9-Solaio esterno Se1-Edificio a pannelli

Tabella 5.8-Solaio esterno Se1-Edificio a pannelli

Solaio controterra – Se1								
Strato	Materiale	Spessore [m]			Densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Piastrelle	0,010			21,10	0,211		
2	Soletta in c.a.	0,070			25,00	1,750		
3	Vespaio areato	0,200			-	1,75		
4	Magrone	0,003			18,00	0,054		
Spessore Totale		0,512			Peso Totale	5,024		

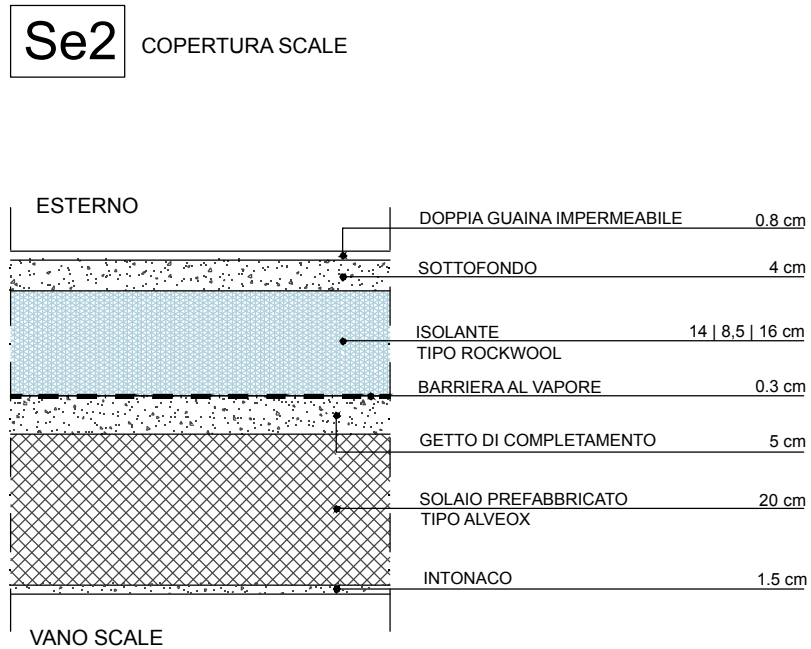


Figura 5.10-Solaio esterno Se2-Edificio a pannelli

Tabella 5.9-Solaio esterno Se2-Edificio a pannelli

Copertura scale - Se2								
Strato	Materiale	Spessore [m]			densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Guaina impermeabile	0,004			9,75	0,039		
2	Sottofondo	0,040			17,65	0,706		
3	Isolante - Rockwool	0,14	0,085	0,16	0,59	0,083	0,050	0,094
4	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
5	Getto di completamento	0,050			25,00	1,250		
6	Solaio Alveox	0,200			13,34	2,667		
7	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,452	0,397	0,472	Peso Totale	4,971	4,939	4,983

Se3 COPERTURA

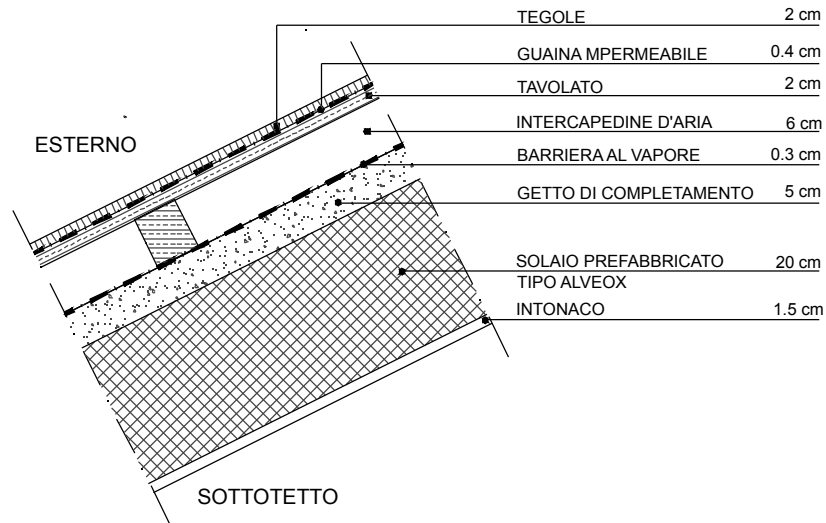


Figura 5.11-Solaio esterno Se3-Edificio a pannelli

Tabella 5.10-Solaio esterno Se3-Edificio a pannelli

Copertura inclinata - Se3								
Strato	Materiale	Spessore [m]			densità [kN/m³]	Peso [kN/m²]		
		TO	CT	OS		TO	CT	OS
1	Tegole	0,020			21,10	0,422		
2	Guaina impermeabile	0,004			9,75	0,039		
3	Tavolato	0,020			4,20	0,084		
4	Intercapedine	0,060			-	-		
5	Barriera al vapore	0,003			0,49	0,001		
6	Getto di completamento	0,050			25,00	1,250		
7	Solaio Alveox	0,200			13,34	2,667		
8	Intonaco	0,015			15,00	0,225		
Spessore Totale		0,352			Peso Totale	4,604		

5.2. La modellazione FEM

L'edificio è stato modellato prevalentemente con elementi di tipo guscio. Per problemi di memoria limitata del software non è stato possibile inserire più di 10000 nodi, pertanto si è deciso di non modellare i vani ascensore in quanto resteranno invariati rispetto al modello a telaio. In Figura 5.12 è riportato il modello realizzato:

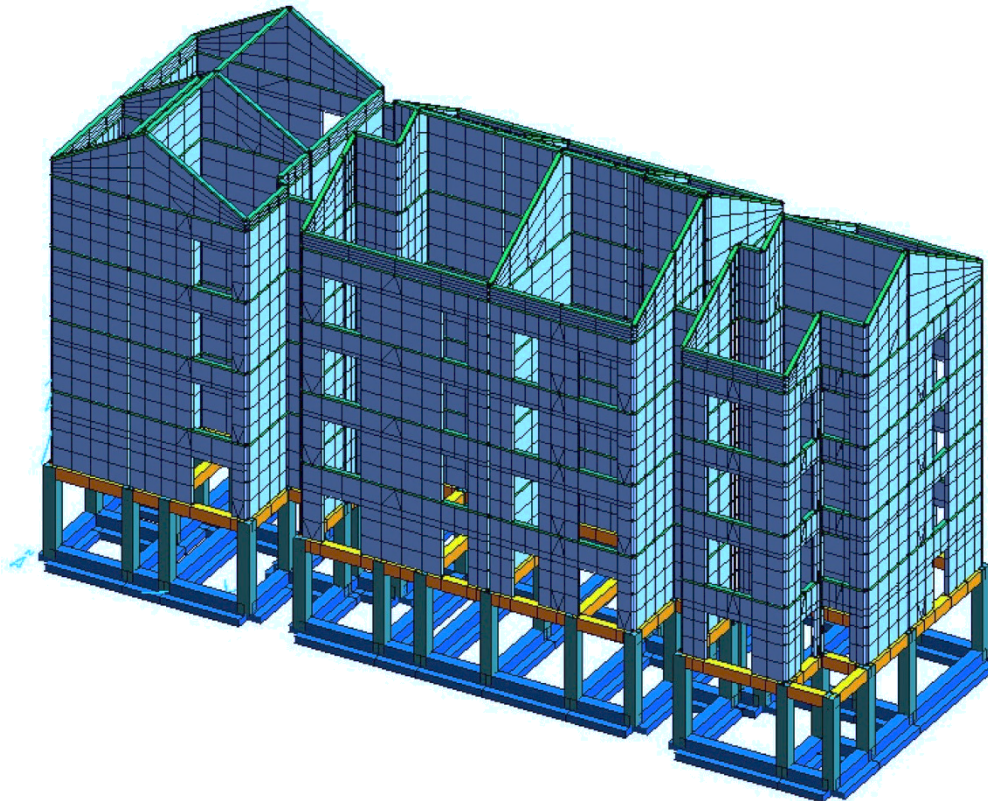


Figura 5.12-Modello 3D-Edificio a pannelli

Come si può notare, è stato necessario inserire ulteriori elementi per far sì che la struttura fosse coerente con quella reale.

I solai, come già fatto nel modello a telaio, sono stati inseriti come elemento ripartitore di carico senza alcuna funzione strutturale. Per far sì che questi trasmettessero le azioni ai pannelli, sono state inserite aste fittizie (aste verdi) in corrispondenza dei solai.

In Figura 5.13 è riportato lo schema seguito per la modellazione di un pannello.

Il singolo pannello prefabbricato viene rappresentato da una mesh di gusci, su un perimetro di 5 cm più piccolo rispetto alle dimensioni reali. In questo modo si possono collegare i lati alle travi fittizie o ad altri pannelli con hold-down (riquadri rossi) e staffe a taglio (riquadri gialli). Le staffe a taglio sono disposte anche nei lati verticali per schematizzare

l'accoppiamento di pannelli adiacenti. Gli hold-down sono svincolati a biella, così da reagire solo con sforzo normale; la staffa posta in mezzzeria invece non è svincolata, in modo da poter trasmettere il taglio.

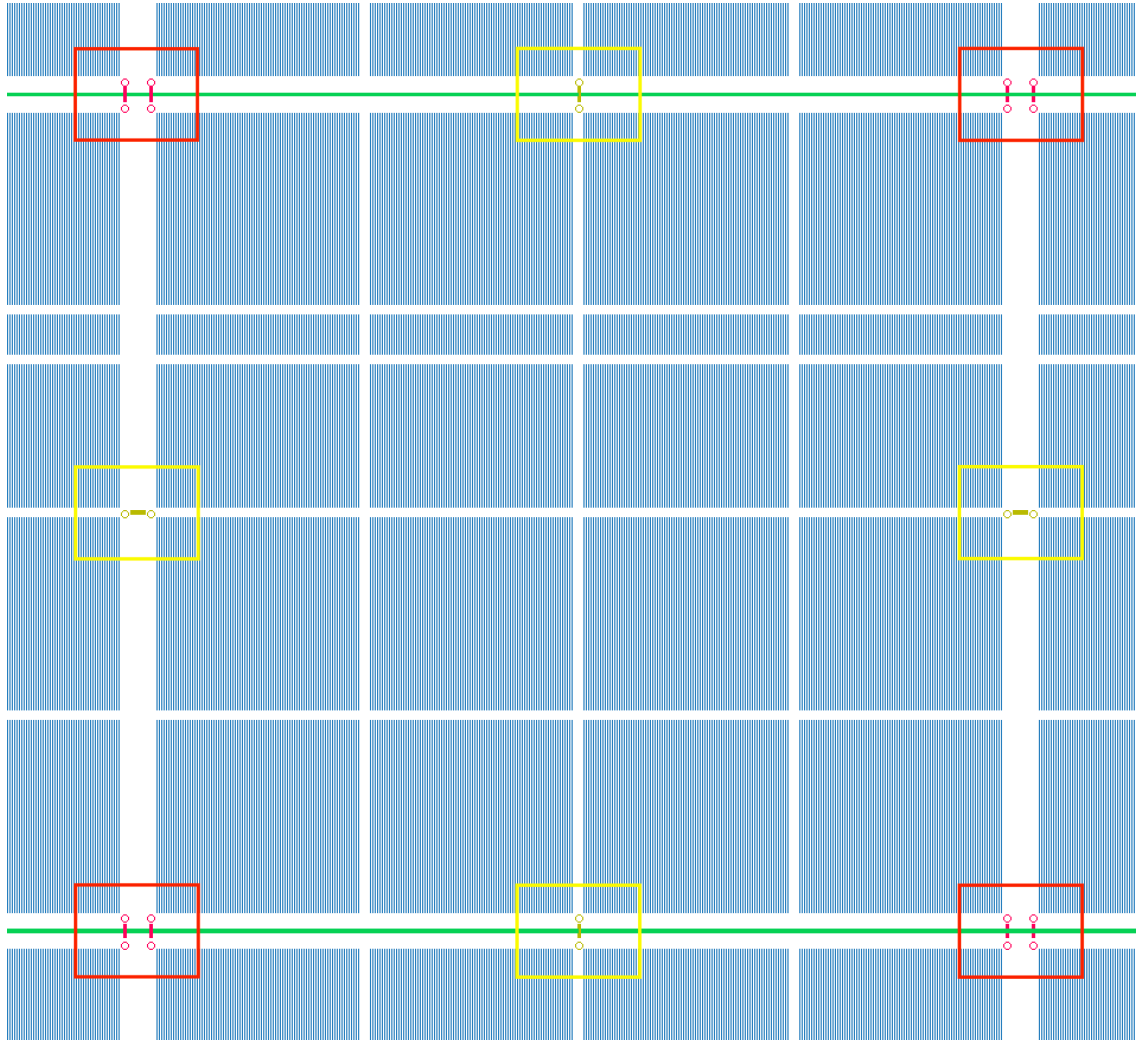


Figura 5.13-Collegamento delle pareti con staffe fittizie-Edificio a pannelli

5.3. Modellazione delle azioni

Le azioni sono state modellate secondo quanto già descritto al paragrafo 4.3.

Si riportano brevemente le azioni modellate. Per ulteriori dettagli si rimanda al paragrafo sopra citato:

- Azioni permanenti:
 - Carichi permanenti strutturali (G_1),
 - Carichi permanenti non strutturali (G_2).
- Azioni variabili:
 - Sovraccarichi (q_k)
 - Azioni del vento
 - Azioni della neve
- Azioni sismiche

5.4. Calcolo delle sollecitazioni

Come specificato nelle NTC 2018 la valutazione della sicurezza sulle costruzioni viene condotta con il metodo semiprobabilistico agli stati limite, basato sull'impiego dei coefficienti parziali di sicurezza. Con tale metodo la sicurezza strutturale deve essere verificata con il confronto tra la resistenza e l'effetto delle azioni.

La progettazione dell'edificio avverrà quindi secondo la combinazione fondamentale definita nell'equazione 2.5.1 delle NTC:

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

Per valutare le azioni sismiche sulla struttura, si adotterà la combinazione sismica definita nell'equazione 2.5.5 delle NTC:

$$E + G_1 + G_2 + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

L'azione sismica è stata presa in conto mediante l'applicazione dell'analisi lineare statica e dinamica secondo quanto riportato nel paragrafo 7.3.3 delle NTC 2018.

L'involuppo delle differenti combinazioni di carico rappresenta il punto di partenza per la progettazione strutturale.

Il primo risultato da analizzare è quanto scarica l'edificio sul terreno. In ragione di questo è stato opportuno modificare la sezione delle travi di fondazione per raggiungere i risultati riportati in Figura 5.14. Così facendo, le pressioni sul terreno da parte della struttura sono

abbastanza contenute. In ragione di ciò, non son state effettuate verifiche geotecniche delle fondazioni.



Figura 5.14-Pressioni sul terreno-Edificio a pannelli

Successivamente si son ottenuti i diagrammi di sollecitazione sulle strutture in elevazione gettate in opera.

Si riportano in Figura 5.15 i diagrammi di momento flettente:

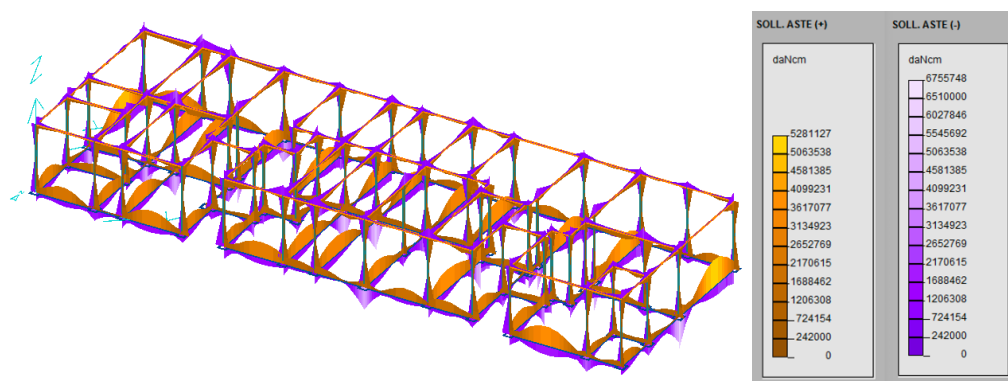


Figura 5.15-Sollecitazioni M_x agenti sulle aste-Edificio a pannelli

Si riportano in Figura 5.16 i diagrammi di sforzo normale:

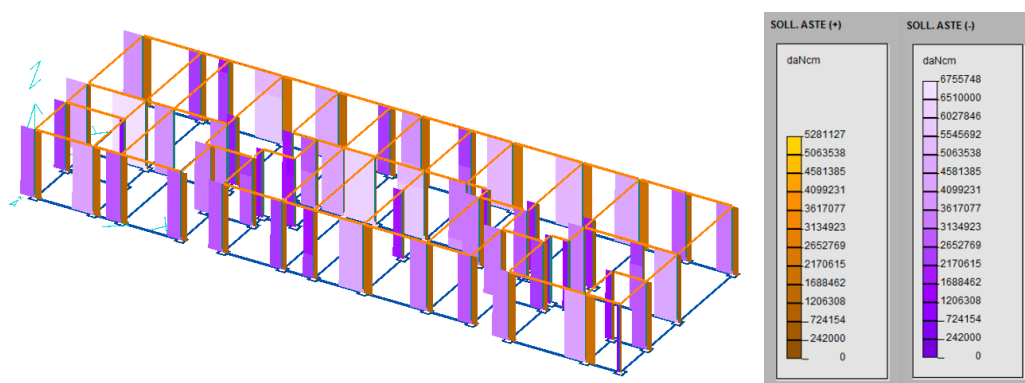


Figura 5.16-Sforzo normale N-Edificio a pannelli

5.5. Progettazione elementi strutturali

La progettazione degli elementi strutturali riguarda solamente le strutture gettate in opera.

Si sono quindi progettate fondazioni, travi e pilastri del primo piano fuori terra.

I procedimenti adottati per la progettazione di travi e pilastri sono quelli già descritti nei relativi paragrafi dell'edificio a telaio, pertanto nei prossimi paragrafi ci si limiterà a riportare gli output grafici ottenuti dal programma di calcolo.

5.5.1. Solai

L'unico solaio gettato in opera è quello del primo piano e non essendo variati i carichi e le luci rispetto all'edificio a telaio è rimasto lo stesso progettato al paragrafo 4.5.1.

Per i solai dei piani superiori è stato scelto un solaio alveolare. Per la determinazione dello spessore si è fatto ricorso alle tabelle del produttore che mettono in correlazione la luce netta e il carico applicato. È stato scelto il solaio di spessore minore disponibile sul mercato in quanto soddisfa ampiamente i requisiti di carico in funzione della luce.

Si riporta in Figura 5.17 un estratto della scheda tecnica del solaio utilizzato:

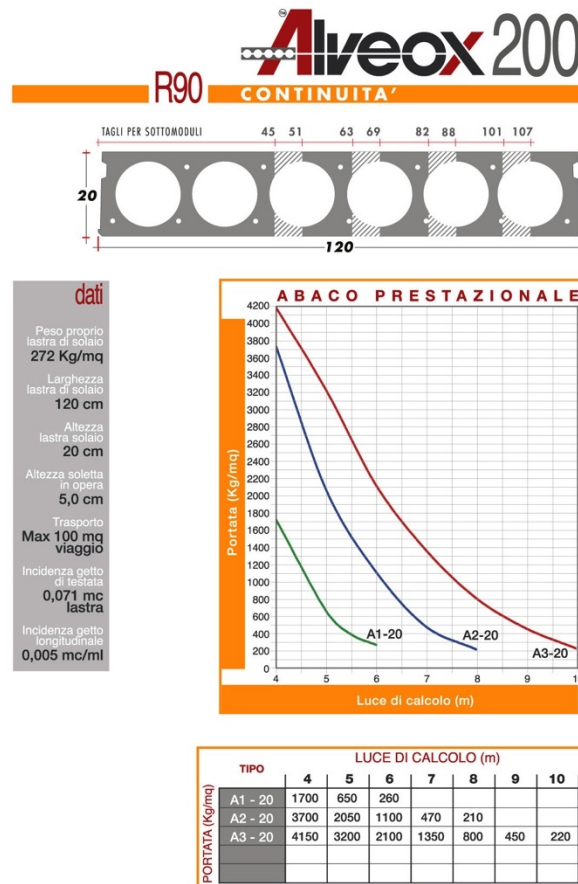


Figura 5.17-Scheda tecnica solaio Alveox [7]

5.5.2. Fondazioni

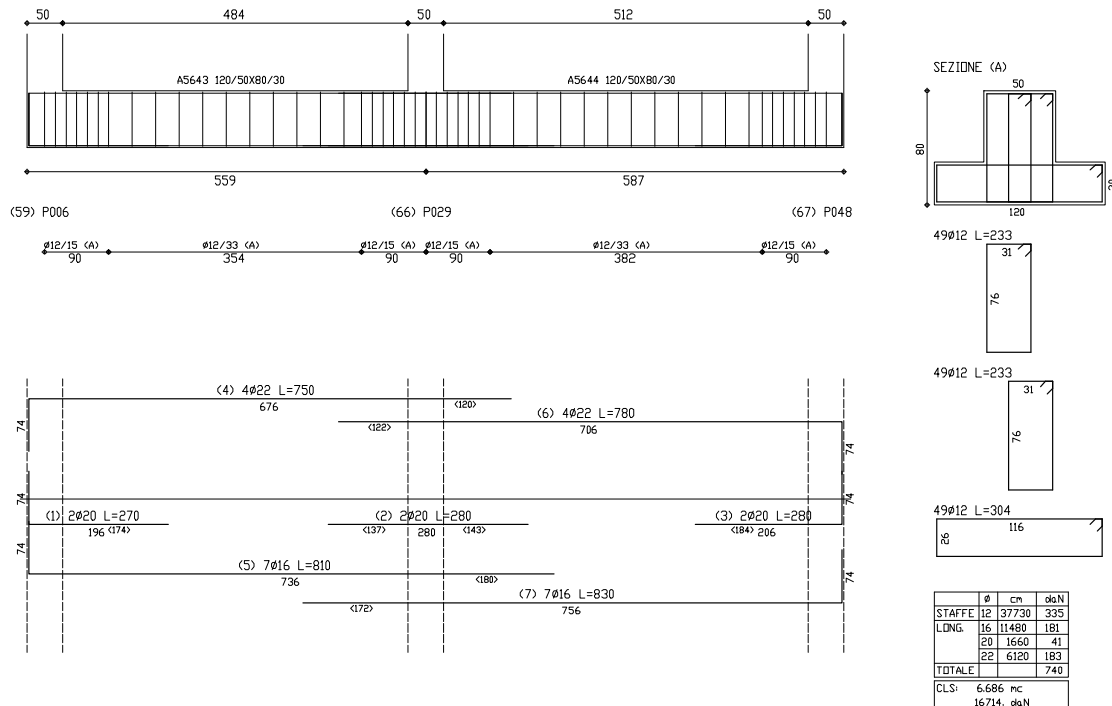


Figura 5.18-Carpenteria travi di fondazione-Edificio a pannelli

5.5.3. Travi

Le travi adottate in questo edificio non sono distinte fra interne ed esterne in quanto entrambe porteranno i carichi dei pannelli portanti sovrastanti la struttura.

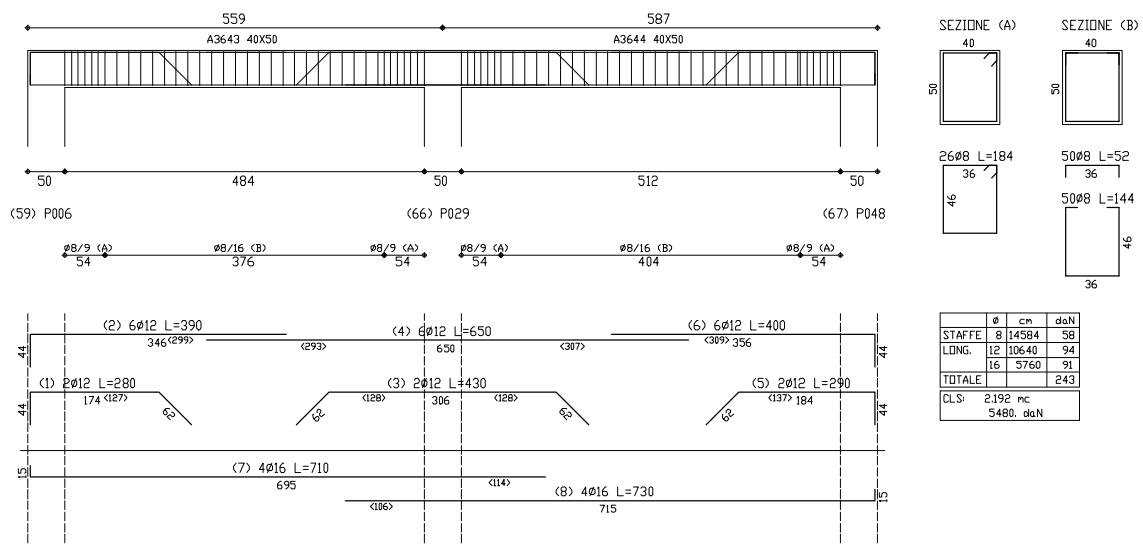


Figura 5.19-Carpenteria travi-Edificio a pannelli

5.5.4. Pilastri

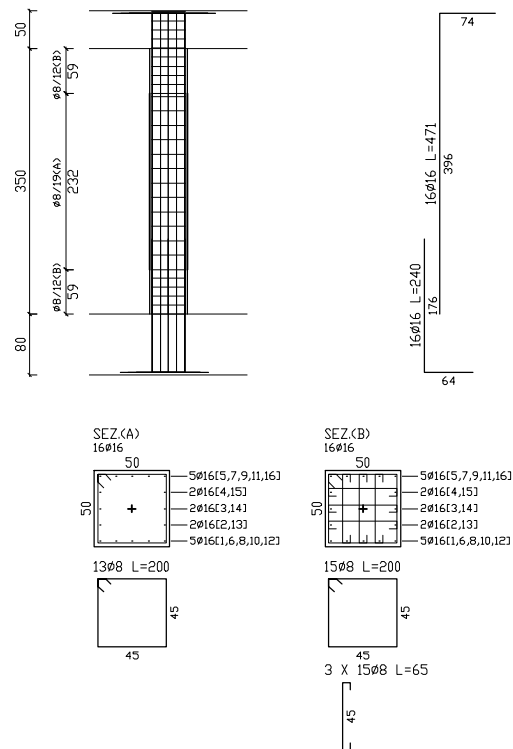


Figura 5.20-Carpenteria pilastri-Edificio a pannelli

5.6. Verifica di elementi strutturali

Si è proceduto infine alla verifica dei pannelli strutturali in quanto di dimensioni predefinite dai fabbricatori [8].

La verifica è stata eseguita andando a valutare lo stato di sollecitazione agente sul singolo pannello e verificando che tale valore sia al di sotto di un valore limite di tensione.

Tale valore è stato preso da letteratura e assunto pari a 50 daN/cm^2 .

Si riporta l'output grafico dello stato di tensione agente sui pannelli:

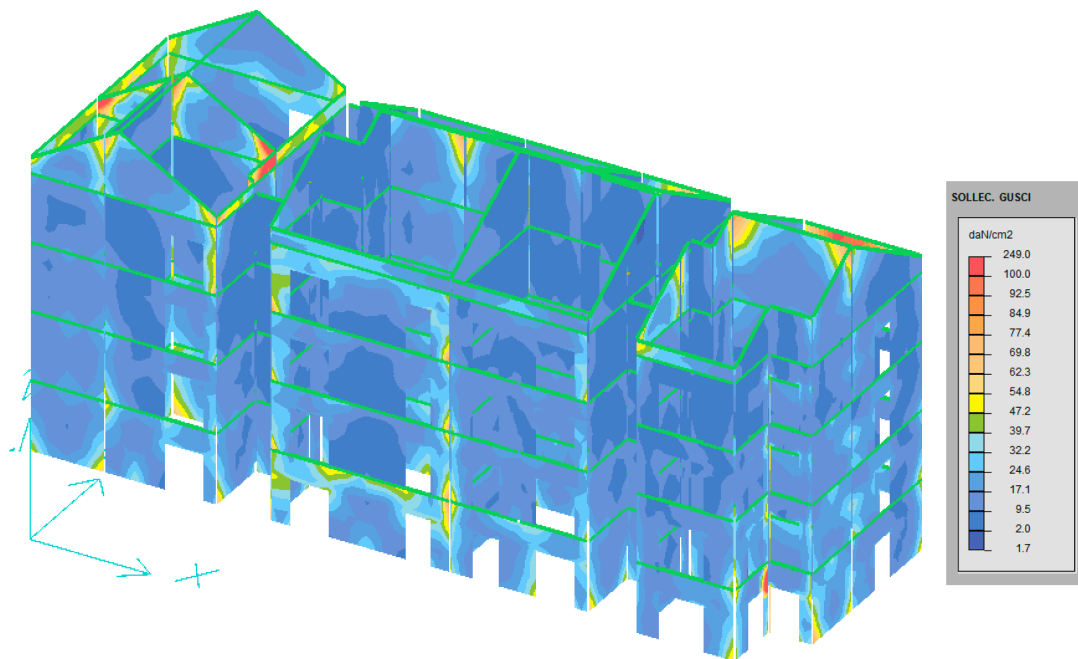


Figura 5.21-Sollecitazioni gusci-Edificio a pannelli

Lungo i bordi dei singoli pannelli, il modello risente dell'interazione con le aste fittizie utilizzate nella modellazione e pertanto la verifica andrà fatta al centro del pannello.

6. Life Cycle Assessment (LCA)

6.1. Introduzione

La maggiore consapevolezza dell'importanza della protezione dell'ambiente e i possibili impatti dovuti ai prodotti fabbricati e consumati ha accresciuto l'interesse verso lo sviluppo di metodi atti a comprendere meglio e a ridurre tali impatti. Una di queste tecniche in corso di sviluppo è la valutazione del ciclo di vita (LCA)

Questo processo studia gli aspetti ambientali e gli impatti possibili di un prodotto lungo tutta la sua vita: dalle materie prime necessarie per produrlo, passando per la produzione e l'utilizzazione, fino allo smaltimento dello stesso.

La valutazione del ciclo di vita deve comprendere la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio, l'analisi dell'inventario, la valutazione dell'impatto, l'interpretazione dei risultati, come è illustrato in Figura 6.1 [9].

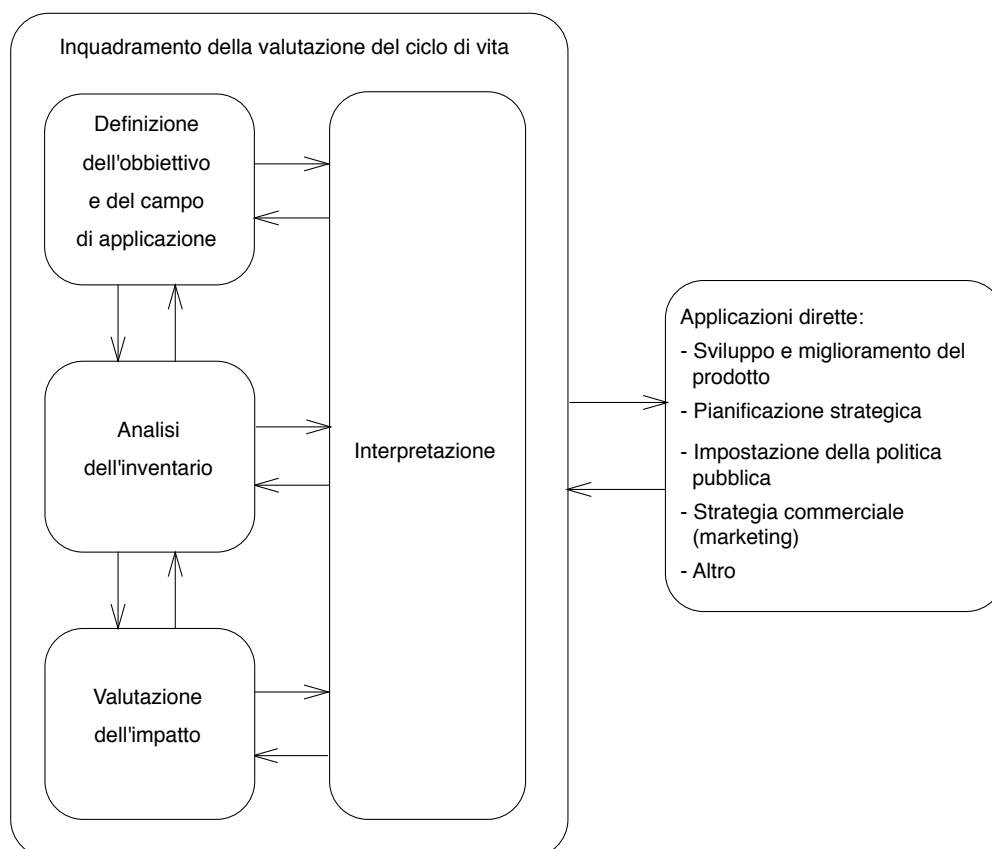


Figura 6.1-Fasi di un LCA [9]

L'obiettivo e il campo di applicazione di un LCA devono essere definiti con chiarezza e essere coerenti con l'applicazione prevista. L'obiettivo di un LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio. Nel definire il campo di applicazione di un LCA, devono essere tenute in considerazione le funzioni del sistema di prodotto, l'unità funzionale, il sistema di prodotto allo studio, i confini del sistema di prodotto, le procedure di attribuzione, i tipi di impatto, i requisiti necessari, le ipotesi, le limitazioni, i requisiti di qualità dei dati iniziali, il tipo di revisione critica e in fine il tipo e lo schema della relazione richiesta per lo studio [10].

L'analisi d'inventario comprende la raccolta dei dati e i procedimenti di calcolo che consentono di quantificare i flussi in entrata e in uscita di un sistema di prodotto. Questi flussi possono comprendere l'utilizzo di risorse e i rilasci nell'aria, nell'acqua e nel terreno associati al sistema. Partendo da questi dati, si possono ricavare delle interpretazioni, in relazione agli obiettivi e al campo di applicazione dell'LCA. Questi dati costituiscono pure la base per la valutazione dell'impatto del ciclo di vita. Il procedimento per condurre un'analisi d'inventario è iterativo [11].

La fase di valutazione dell'impatto di un LCA ha lo scopo di valutare la portata di potenziali impatti ambientali utilizzando i risultati dell'analisi d'inventario del ciclo di vita. In generale questo processo comporta l'associare i dati d'inventario a specifici impatti ambientali e l'approfondire la comprensione di questi impatti. Il livello di dettaglio, la scelta degli impatti valutati e le metodologie da usare dipendono dall'obiettivo e dal campo di applicazione dello studio [12].

L'interpretazione è la fase dell'LCA nella quale i risultati ottenuti nell'analisi d'inventario e nella valutazione d'impatto vengono combinati fra loro, oppure, nel caso di studi riguardanti l'inventario del ciclo di vita, vengono combinati i risultati della sola analisi d'inventario, in coerenza con l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio, al fine di trarre conclusioni e raccomandazioni [13].

6.2. Il ciclo di vita dell'edificio

L'oggetto della valutazione è l'edificio e il suo sito. Questo include tutti i processi a monte e a valle necessari per stabilire e mantenere la funzione dell'edificio, dall'acquisizione dei materiali a loro disposizione o al punto in cui i materiali escono dal contorno del sistema durante o alla fine del ciclo di vita dell'edificio. La valutazione delle prestazioni ambientali

degli edifici dev'essere effettuata secondo il metodo di calcolo indicato nella norma BS EN 15978. [14]

L'organizzazione dei diversi moduli utilizzati per la valutazione dell'edificio citati in tale norma corrisponde alla struttura modulare dell'EPD (Environmental product declaration) per i prodotti, i processi e i servizi di costruzione secondo la norma EN 15804 [15] (Figura 6.2).

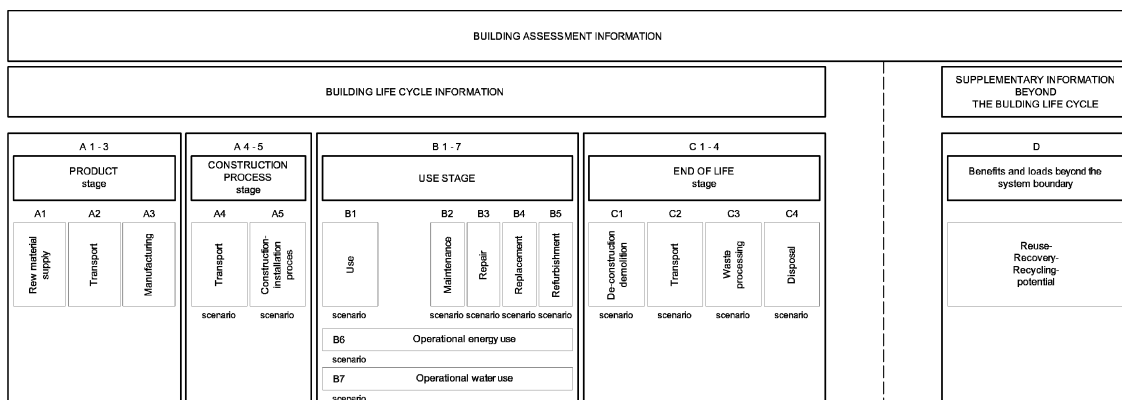


Figura 6.2-Moduli del ciclo vita [15]

I moduli sono così suddivisi:

- **A1-A3, fase di produzione**

La fase della produzione include:

- A1, estrazione e lavorazione di materie prime, lavorazione di materiali secondari (ad es. processi di riciclo),
- A2, trasporto al fabbricante,
- A3, produzione, compresa la fornitura di tutti i materiali, prodotti ed energia, nonché la lavorazione dei rifiuti fino allo stato di fine dei rifiuti o lo smaltimento dei residui finali durante la fase del prodotto.

- **A4-A5, fase di processo di costruzione**

La fase del processo di costruzione comprende:

- A4, trasporto al cantiere;
- A5, installazione nell'edificio.

Nella fase di costruzione è compresa la fornitura di tutti i materiali, prodotti ed energia, nonché la lavorazione dei rifiuti fino allo stato di fine dei rifiuti o lo smaltimento dei residui finali durante la fase del processo di costruzione. Questi

moduli includono tutti gli impatti e gli aspetti relativi a eventuali perdite durante questa fase del processo di costruzione.

- **B1-B5, fase d'uso, moduli relativi al tessuto edilizio**

La fase di utilizzo, legata al tessuto edilizio, comprende:

- B1, l'uso o l'applicazione del prodotto installato;
- B2 manutenzione;
- B3 riparazione;
- B4 sostituzione;
- B5 ristrutturazione.

Nella fase d'uso è compresa la fornitura e il trasporto di tutti i materiali, prodotti e relativi consumi energetici e idrici, nonché la trasformazione dei rifiuti fino allo stato di fine dei rifiuti o lo smaltimento dei residui finali durante questa parte della fase d'uso. Questi moduli includono anche tutti gli impatti e gli aspetti relativi alle perdite durante questa parte della fase d'uso.

- **B6-B7, fase d'uso, moduli relativi al funzionamento dell'edificio**

La fase d'uso relativa al funzionamento dell'edificio comprende:

- B6, uso dell'energia operativa (ad es. funzionamento del sistema di riscaldamento e altri servizi installati connessi all'edilizia);
- B7, uso idrico operativo.

Questi moduli comprendono la fornitura e il trasporto di tutti i materiali, prodotti, nonché le disposizioni in materia di energia e acqua, il trattamento dei rifiuti fino allo stato di fine del rifiuto o lo smaltimento dei residui finali durante questa parte della fase di utilizzo.

- **C1-C4 fase di fine vita**

La fase di fine vita comprende:

- C1, de-Costruzione, Demolizione;
- C2, trasporto al trattamento dei rifiuti;
- C3, trattamento dei rifiuti per il riutilizzo, il recupero e/o il riciclaggio;
- C4, smaltimento.

Nella fase di fine vita è compresa la fornitura e tutti i trasporti, la fornitura di tutti i materiali, i prodotti e il relativo consumo di energia e acqua.

- **D, vantaggi e carichi oltre il limite del sistema**

Il modulo D include:

- D, riutilizzo, recupero e/o riciclo potenziali, espressi come impatti netti e benefici.

6.3. Assunzioni

In questa fase, è stato considerato il ciclo vita della costruzione dalla fase della produzione (moduli A1-A3), del trasporto (Moduli A4, A5) e del fine vita (Moduli C1-C4, D) dei materiali impiegati.

La valutazione si basa principalmente sui dati secondari provenienti dalla letteratura e dai database del ciclo di vita disponibili, che vengono valutati in relazione ad alcune stime e ipotesi necessarie:

- la distanza tra i piani di produzione dei materiali e la costruzione è stato stimato in 50 km per tutti i materiali;
- il fine vita dei materiali è stato ipotizzato come segue:
 - barre di acciaio: 70% riciclato e 30% discarica,
 - materiali cementizi: 70% riciclato e 30% discarica,
 - pannelli xlam: 100% riciclato,
 - altri materiali (come materiali plastici): 100% di discarica.

Le percentuali degli scenari di fine vita per le barre di acciaio e il calcestruzzo sono state basate sulla relazione tecnica del CCR [16]. Queste ipotesi sono coerenti con l'obiettivo di questo studio LCA, che è quello di fornire una prima valutazione generale degli impatti ambientali dell'edificio. Per una valutazione più specifica, sarebbe necessaria un'ulteriore raccolta di dati primari.

6.4. Procedimento di calcolo

Il procedimento di calcolo rigoroso è descritto nella norma UNI 14044 [17]. Tuttavia, non avendo a disposizione tutte le informazioni necessarie per effettuare un LCA completo, si è fatto ricorso al database OpenLCA [18] o a valori presi da letteratura come per i pannelli xlam e le barre di armatura.

Tale database, inseriti i parametri definiti nel paragrafo 6.3, fornisce, in funzione dell'unità di misura del materiale scelto, la quantità di emissioni di CO₂ espressa in kg.

La Tabella 6.1 mostra i valori di CO₂ emessi e assorbiti dal singolo materiale utilizzato nei tre edifici in riferimento alle diverse fasi del ciclo di vita degli stessi.

Tabella 6.1-Emissioni CO₂ unitarie

Emissioni unitarie CO ₂					
Materiale	U.D.M.	Produzione A1, A2, A3	Costruzione A4, A5	Fine vita C1, C2, C3, C4, D	Totale
		[kg CO ₂ /U.D.M]	[kg CO ₂ /U.D.M]	[kg CO ₂ /U.D.M]	[kg CO ₂ /U.D.M]
Barre di armatura	kg	1,9624	0,0078	-0,5860	1,3842
Calcestruzzo C25/30	m ³	237,9451	19,4841	-44,7700	212,6592
X-lam	m ³	-685,5300	55,2100	810,2300	179,9100
Mattoni	kg	0,2315	0,0078	0,0042	0,2434
Isolante Rockwool	kg	1,1746	0,0102	0,0042	1,1890
Intonaco	kg	0,2257	0,0078	0,0042	0,2376
Malta	kg	0,2032	0,0244	0,0042	0,2318
Vernice	kg	1,9414	0,0244	0,0042	1,9699
Tegole	kg	0,3449	0,0078	0,0042	0,3568
Guaina impermeabile	kg	0,7375	0,0244	0,0042	0,7660
Barriera al vapore	kg	2,5171	0,0244	0,0042	2,5456
Piastrelle	kg	0,5465	0,0078	0,0042	0,5585
Colla	kg	1,1040	0,0005	0,0042	1,1086
Portland	kg	0,8269	0,0078	0,0042	0,8389
Isolante EPS	kg	3,7577	0,0244	0,0042	3,7862
Vespaio areato	kg	1,9114	0,0244	0,0042	1,9400
Isolante acustico	kg	1,8899	0,0244	0,0042	1,9184
Cartongesso	kg	0,1618	0,0102	0,0042	0,1762

Nei casi di elementi in cemento armato, i valori negativi della CO₂ di recupero per la carbonatazione sono dovuti a scenari di fine vita, mentre quella che si verifica durante la fase d'uso non è stata ancora considerata perché tale valutazione è condotta secondo quanto riportato nel paragrafo 6.4. Invece, nelle strutture in x-lam, il valore negativo è dovuto alla CO₂ biogenetica, che è la capacità del legno di assorbire l'anidride carbonica durante la crescita dell'albero.

Per quanto riguarda i valori riportati nella Tabella 6.1, è necessaria la seguente osservazione: per calcolare l'equivalente di CO₂ per i pannelli prefabbricati, è stato preso in considerazione separatamente il calcestruzzo, l'armatura e l'isolante termico. Tuttavia, poiché non sono disponibili dati specifici, le risorse necessarie per ottenere il pannello finale assemblato non sono state prese in considerazione.

6.5. Computo dei materiali

Si è proceduto quindi al computo di tutte le quantità dei materiali che costituiscono il singolo edificio. Per ogni componente presente nelle disarticolazioni tecnologiche degli edifici si è composta una tabella con i materiali che lo componevano, le quantità di ciascuno di essi e il loro peso. Si riporta in Tabella 6.2, a titolo di esempio, il calcolo effettuato per i muri esterni verso autorimessa denominati Me1, comune a tutti gli edifici:

Tabella 6.2-Esempio calcolo quantità dei materiali componente Me1

Muri Esterni Autorimessa - Me1							
Materiale	Quantità [m ²]	Peso unitario [kg/m ²]			Peso totale [kg]		
		TO	CT	OS	TO	CT	OS
Verince interna	327	0,25			82		
Intonaco interno	327	22,97			7517		
Poroton	327	190,13			62229		
Malta	327	20,00			6546		
Colla	327	6,00			1964		
Formelle	327	21,53			7047		

Si riporta nelle pagine seguenti un breve elenco con tutte le considerazioni effettuate per il calcolo delle quantità di ciascun materiale riportato in Tabella 6.1.

- Barre di armatura e Calcestruzzo C25/30:

Per gli elementi progettati il calcolo delle quantità di calcestruzzo e barre di acciaio, è stato fatto mediante il modulo “VARIE CA” incluso nel software utilizzato per la progettazione.

Si riporta in Figura 6.3 l’output fornito dal software:

Unit# di misura adottata per i pesi: daN			

Aste Livello	0		
y 16	Peso:	4444	
y 20	Peso:	1069	
y 22	Peso:	4972	
y 12	Peso:	10343	

	Peso Tot:	20828	
	mq casseri:	481.77	
	mc cls:	146.94	

Totali complessivi:			
y 16	Peso:	4444	
y 20	Peso:	1069	
y 22	Peso:	4972	
y 12	Peso:	10343	
Totale peso ferri:		20828	
Totale mq casseri:		481.77	
Totale mc cls:		146.94	

Figura 6.3-Computo travi di fondazione-Edificio a pannelli, output CDM DOLMEN

Per gli elementi che non son stati progettati, quali pannelli prefabbricati e getti di completamento si è fatto ricorso a dati presenti in letteratura.

- X-lam:

Le quantità calcolate sono riferite alle pareti portanti, ai solai e ai tavolati presenti nel manto di copertura. Il peso totale è calcolato in funzione dello spessore di ciascun elemento, considerando un peso specifico di 420 kg/m³;

- Mattoni:

Le quantità calcolate sono riferite ai blocchi Poroton, costituenti le tamponature esterne e gli eventuali tramezzi interni con un peso rispettivamente pari a 190 kg e 61 kg per 1 m² di muratura, e alle pignatte dei solai in latero-cemento, disposte in ragione di 8 blocchi ogni m² di solaio con un peso pari a 9,8 kg per ciascun blocco.

- Isolante Rockwool:

Le quantità calcolate sono riferite agli strati di isolante espressi in m² presenti nel singolo edificio. Il peso totale è calcolato in funzione dello spessore di ciascun elemento, considerando un peso specifico di 60 kg/m³.

- Intonaco:

Le quantità calcolate sono riferite agli strati di intonaco espressi in m² applicati su pareti e soffitti. Il peso totale è calcolato considerando uno spessore dello strato pari a 1,5 cm, considerando un peso specifico di 1530 kg/m³.

- Malta:

Le quantità calcolate sono riferite agli strati di malta interposti tra i blocchi Poroton che costituiscono le varie tamponature. Il peso totale è stato calcolato considerando l'utilizzo di 40 kg di malta per realizzare 1 m² di parete in blocchi Poroton da 25 cm e 20 kg per realizzare 1 m² di parete in blocchi da 10 cm.

- Vernice:

Le quantità calcolate sono riferite agli strati di vernice espressi in m² applicati su pareti e soffitti. Il peso totale è calcolato considerando un peso di 0,25 kg applicato su 1 m² di superficie

- Tegole:

Le quantità calcolate sono riferite alla superficie di manto realizzato, considerando un peso di 50 kg per 1 m² di copertura.

- Guaina impermeabile:

Le quantità calcolate sono riferite alla superficie di copertura impermeabilizzata, nei tratti di copertura piana, è stata disposta una doppia guaina essendo questa calpestabile. Si è considerato un peso di 3,98 kg per 1 m² di guaina disposta in singolo strato.

- Barriera al vapore:

Le quantità calcolate sono riferite alla superficie coperta dalla barriera al vapore, considerando un peso di 0,15 kg a m².

- Piastrelle:

Le quantità calcolate sono riferite alla superficie piastrellata, sia essa orizzontale (pavimentazione) o verticale come per il muro perimetrale esterno dell'autorimessa, considerando un peso pari a 21,5 kg per m² di superficie piastrellata.

- Colla:

Le quantità calcolate sono riferite alla colla utilizzata per la posa delle piastrelle. Si è considerato un peso pari a 6 kg di colla ogni m² di piastrelle.

- Portland:

Le quantità calcolate sono riferite ai contenuti di cemento presenti nei getti di sottofondi, massetti e magrone. Per tali composti, si è considerato esclusivamente l'impatto dovuto al cemento in quanto di maggior incidenza rispetto agli altri componenti. Si sono considerati 200 kg di cemento per 1 m³ di getto di massetti e sottofondi e 100 kg di cemento per 1 m³ di getto di magrone.

- Isolante EPS:

Le quantità calcolate sono riferite agli strati di isolante presente nei solai interpiano come riportato nelle varie stratigrafie. I pannelli sono di spessore pari a 2 cm con un peso pari a 0,71 kg/m².

- Vespaio areato:

Le quantità calcolate sono riferite al vespaio areato tipo Igloo. Gli “Igloo” utilizzati sono di altezza pari a 20 cm con un peso di 5,65 kg per 1 m² di vespaio realizzato.

- Isolante acustico:

Le quantità calcolate sono riferite alla superficie di pavimentazione su cui è stato disposto l'isolante acustico, in ragione di 0,09 kg per m² di materiale.

- Cartongesso

Le quantità calcolate sono riferite alla superficie delle pareti realizzata mediante l'utilizzo di tali pannelli o alla superficie semplicemente ricoperta da questi.

6.6. Risultati

Si riportano nelle pagine successive le tabelle riassuntive con le emissioni globali di ogni singolo edificio, inoltre sono significativi i grafici relativi all'incidenza del singolo materiale rispetto alle emissioni totali.

Tabella 6.3-Emissioni CO₂-LCA, Edificio in x-lam, Torino

EDIFICIO IN XLAM - Torino				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	478038	0,085	40663,65	12,6%
Barre di armatura	37227	1,384	51530,12	16,0%
Pignatte	21717	0,243	5286,93	1,6%
X-lam	249456	0,428	106856,38	33,1%
Vernice	1687	1,970	3323,42	1,0%
Intonaco	44728	0,238	10629,57	3,3%
Cartongesso	41455	0,176	7303,84	2,3%
Malta	6546	0,232	1517,16	0,5%
Colla	10460	1,109	11596,14	3,6%
Poroton	62229	0,243	15149,63	4,7%
Cemento Portland	28616	0,839	24005,36	7,4%
Piastrelle	37534	0,558	20961,38	6,5%
Isolante - Rockwool	12739	1,189	15145,90	4,7%
Isolante acustico	101	1,918	193,51	0,1%
Barriera al vapore	298	2,546	759,18	0,2%
Tegole	18724	0,357	6680,88	2,1%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,4%
Totale			322889,54	100%

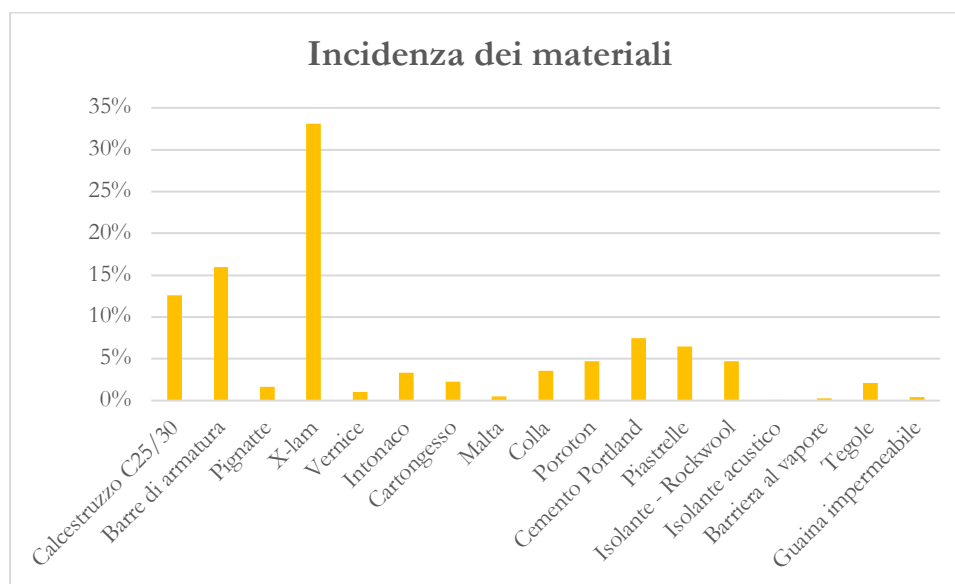


Grafico 6.1-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio in x-lam, Torino

Tabella 6.4-Emissioni CO₂-LCA, Edificio in x-lam, Catania

EDIFICIO IN XLAM - Catania				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	478038	0,085	40663,65	12,9%
Barre di armatura	37227	1,384	51530,12	16,4%
Pignatte	21717	0,243	5286,93	1,7%
X-lam	249456	0,428	106856,38	34,0%
Vernice	1687	1,970	3323,42	1,1%
Intonaco	44728	0,238	10629,57	3,4%
Cartongesso	41455	0,176	7303,84	2,3%
Malta	6546	0,232	1517,16	0,5%
Colla	10460	1,109	11596,14	3,7%
Poroton	62229	0,243	15149,63	4,8%
Cemento Portland	28616	0,839	24005,36	7,6%
Piastrelle	37534	0,558	20961,38	6,7%
Isolante - Rockwool	5411	1,189	6433,93	2,0%
Isolante acustico	101	1,918	193,51	0,1%
Barriera al vapore	298	2,546	759,18	0,2%
Tegole	18724	0,357	6680,88	2,1%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,4%
Totale			314177,57	100%

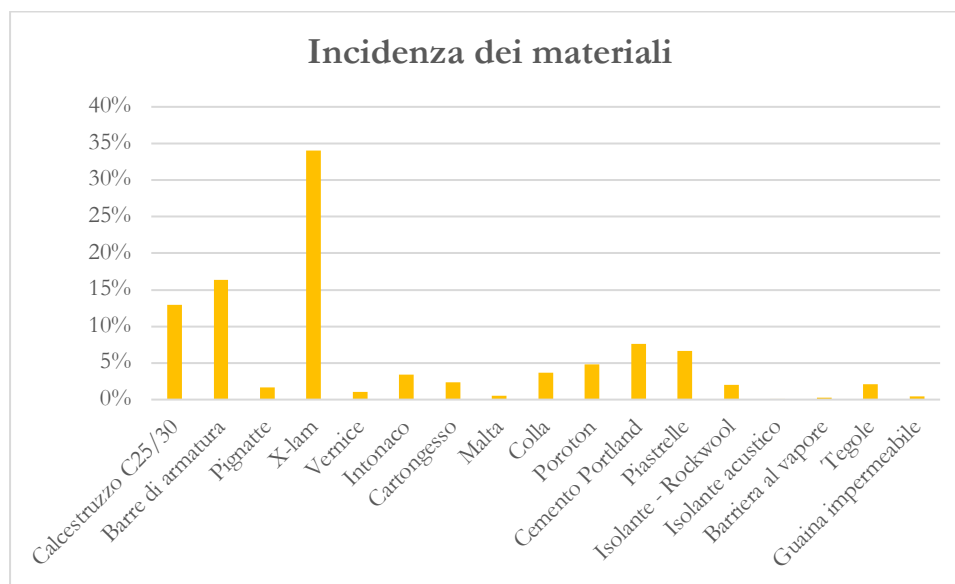


Grafico 6.2-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio in x-lam, Catania

Tabella 6.5-Emissioni CO₂-LCA, Edificio in x-lam, Oslo

EDIFICIO IN XLAM - Oslo				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	478038	0,085	40663,65	12,5%
Barre di armatura	37227	1,384	51530,12	15,9%
Pignatte	21717	0,243	5286,93	1,6%
X-lam	249456	0,428	106856,38	32,9%
Vernice	1687	1,970	3323,42	1,0%
Intonaco	44728	0,238	10629,57	3,3%
Cartongesso	41455	0,176	7303,84	2,2%
Malta	6546	0,232	1517,16	0,5%
Colla	10460	1,109	11596,14	3,6%
Poroton	62229	0,243	15149,63	4,7%
Cemento Portland	28616	0,839	24005,36	7,4%
Piastrelle	37534	0,558	20961,38	6,5%
Isolante - Rockwool	14299	1,189	17000,39	5,2%
Isolante acustico	101	1,918	193,51	0,1%
Barriera al vapore	298	2,546	759,18	0,2%
Tegole	18724	0,357	6680,88	2,1%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,4%
Totale			324744,03	100%

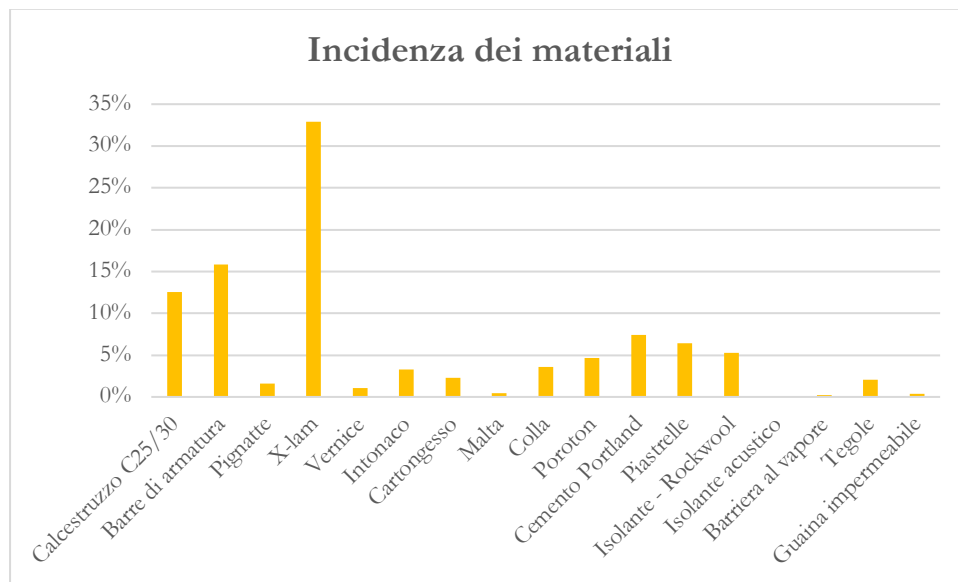


Grafico 6.3-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio in x-lam, Oslo

Tabella 6.6-Emissioni CO₂-LCA, Edificio a telaio, Torino

EDIFICIO A TELAIO - Torino				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	1385640	0,085	117867,66	22,2%
Barre di armatura	86863	1,384	120236,43	22,6%
Vespaio areato	1564	1,940	3034,02	0,6%
Pignatte	108584	0,243	26434,66	5,0%
Vernice	1787	1,970	3520,48	0,7%
Intonaco	172600	0,238	41018,12	7,7%
Malta	93119	0,232	21582,05	4,1%
Colla	10460	1,109	11596,14	2,2%
Poroton	436472	0,243	106258,73	20,0%
Cemento Portland	30403	0,839	25504,52	4,8%
Piastrelle	43880	0,558	24505,38	4,6%
Isolante - Rockwool	13536	1,189	16093,96	3,0%
Isolante EPS	752	3,786	2847,78	0,5%
Isolante acustico	120	1,918	230,31	0,0%
Barriera al vapore	319	2,546	810,81	0,2%
Tavolato	3146	0,428	1347,49	0,3%
Tegole	18724	0,357	6680,88	1,3%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,2%
Totale			530855,90	100%

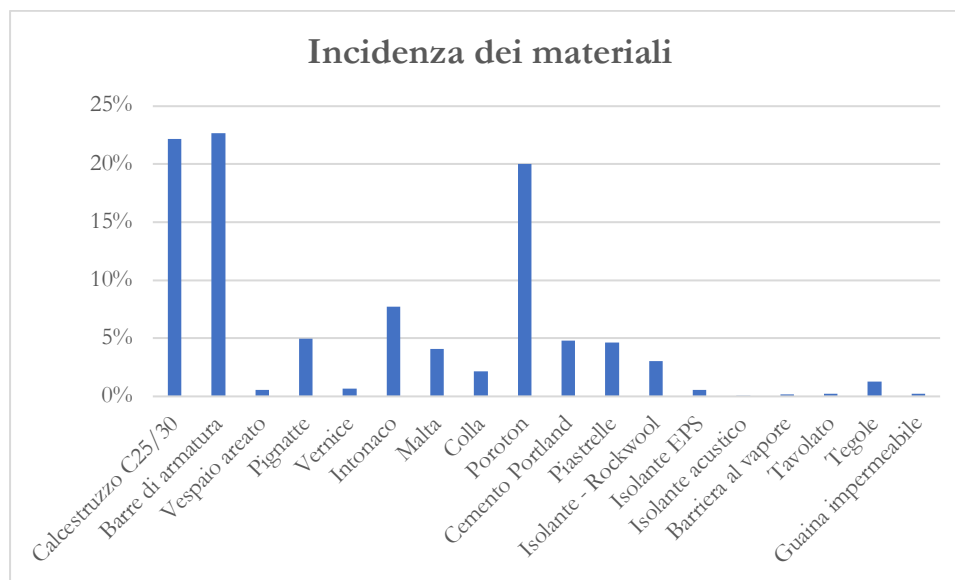


Grafico 6.4-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a telaio, Torino

Tabella 6.7-Emissioni CO₂-LCA, Edificio a telaio, Catania

EDIFICIO A TELAIO - Catania				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	1385640	0,085	117867,66	22,6%
Barre di armatura	86863	1,384	120236,43	23,1%
Vespaio areato	1564	1,940	3034,02	0,6%
Pignatte	108584	0,243	26434,66	5,1%
Vernice	1787	1,970	3520,48	0,7%
Intonaco	172600	0,238	41018,12	7,9%
Malta	93119	0,232	21582,05	4,1%
Colla	10460	1,109	11596,14	2,2%
Poroton	436472	0,243	106258,73	20,4%
Cemento Portland	30403	0,839	25504,52	4,9%
Piastrelle	43880	0,558	24505,38	4,7%
Isolante - Rockwool	5763	1,189	6851,98	1,3%
Isolante EPS	752	3,786	2847,78	0,5%
Isolante acustico	120	1,918	230,31	0,0%
Barriera al vapore	319	2,546	810,81	0,2%
Tavolato	3146	0,428	1347,49	0,3%
Tegole	18724	0,357	6680,88	1,3%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,2%
Totale			521613,91	100%

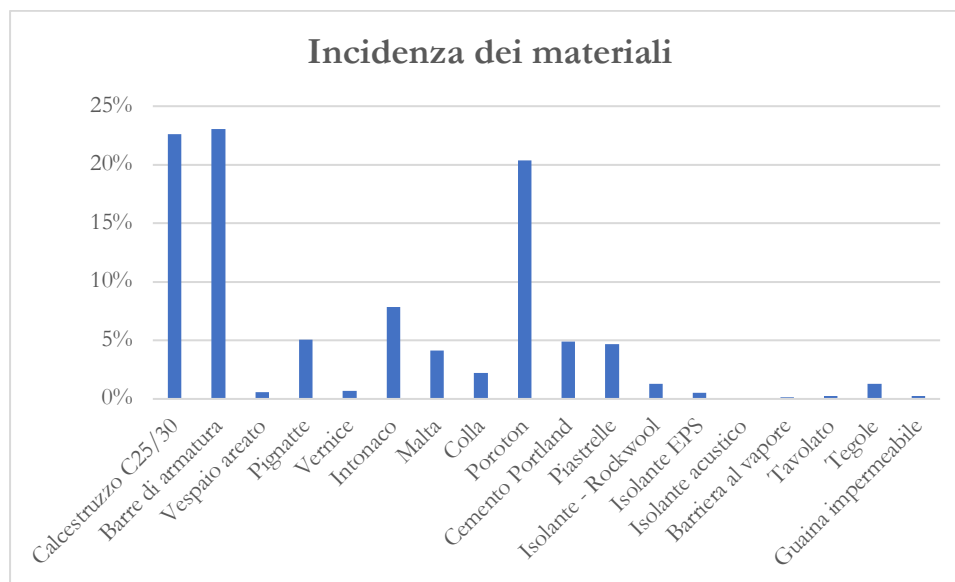


Grafico 6.5-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a telaio, Catania

Tabella 6.8-Emissioni CO₂-LCA, Edificio a telaio, Oslo

EDIFICIO A TELAIO - Oslo				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	1385640	0,085	117867,66	22,1%
Barre di armatura	86863	1,384	120236,43	22,6%
Vespaio areato	1564	1,940	3034,02	0,6%
Pignatte	108584	0,243	26434,66	5,0%
Vernice	1787	1,970	3520,48	0,7%
Intonaco	172600	0,238	41018,12	7,7%
Malta	93119	0,232	21582,05	4,1%
Colla	10460	1,109	11596,14	2,2%
Poroton	436472	0,243	106258,73	19,9%
Cemento Portland	30403	0,839	25504,52	4,8%
Piastrelle	43880	0,558	24505,38	4,6%
Isolante - Rockwool	15246	1,189	18127,39	3,4%
Isolante EPS	752	3,786	2847,78	0,5%
Isolante acustico	120	1,918	230,31	0,0%
Barriera al vapore	319	2,546	810,81	0,2%
Tavolato	3146	0,428	1347,49	0,3%
Tegole	18724	0,357	6680,88	1,3%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,2%
Totale			532889,32	100%

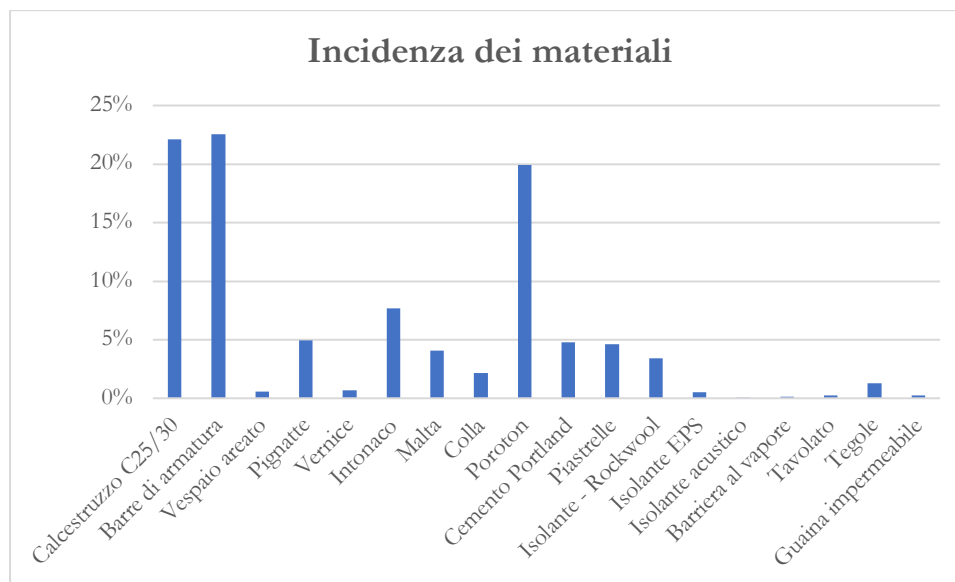


Grafico 6.6-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a telaio, Oslo

Tabella 6.9-Emissioni CO₂-LCA, Edificio a pannelli, Torino

EDIFICIO A PANNELLI PREFABBRICATI - Torino				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	1572439	0,085	133757,44	33,1%
Barre di armatura	67233	1,384	93064,47	23,0%
Vespaio areato	1564	1,940	3034,02	0,7%
Pignatte	21717	0,243	5286,93	1,3%
Vernice	1687	1,970	3323,42	0,8%
Intonaco	128073	0,238	30436,47	7,5%
Cartongesso	53817	0,176	9482,05	2,3%
Malta	6546	0,232	1517,16	0,4%
Colla	10460	1,109	11596,14	2,9%
Poroton	62229	0,243	15149,63	3,7%
Cemento Portland	52813	0,839	44303,72	10,9%
Piastrelle	37534	0,558	20961,38	5,2%
Isolante EPS	600	3,786	2271,73	0,6%
Isolante - Rockwool	16951	1,189	20153,76	5,0%
Isolante acustico	101	1,918	193,51	0,0%
Barriera al vapore	298	2,546	759,18	0,2%
Tavolato	3146	0,428	1347,49	0,3%
Tegole	18724	0,357	6680,88	1,7%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,3%
Totale			404605,87	100%

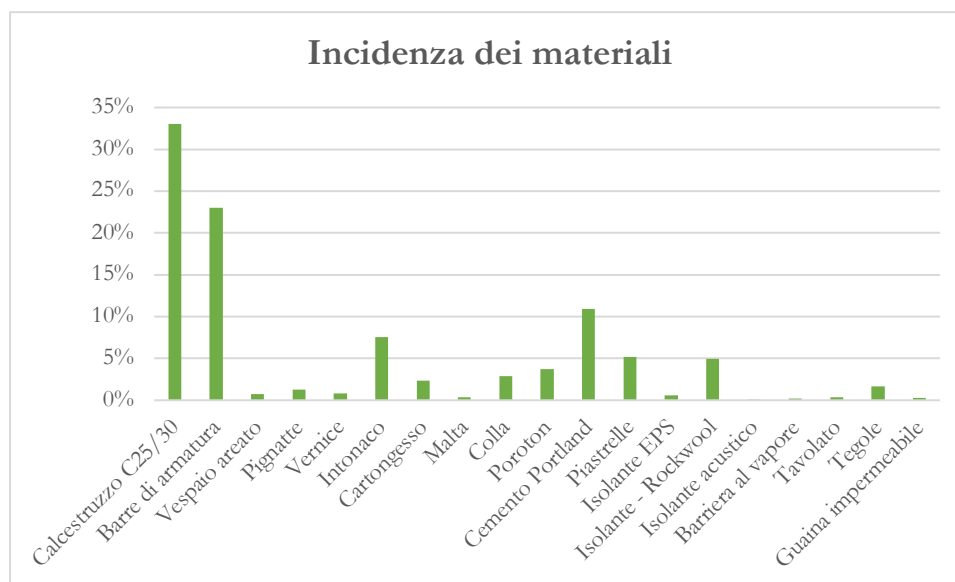


Grafico 6.7-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a pannelli, Torino

Tabella 6.10-Emissioni CO₂-LCA, Edificio a pannelli, Catania

EDIFICIO A PANNELLI PREFABBRICATI - Catania				
Catania				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	1572439	0,085	133757,44	33,8%
Barre di armatura	67233	1,384	93064,47	23,5%
Vespai areato	1564	1,940	3034,02	0,8%
Pignatte	21717	0,243	5286,93	1,3%
Vernice	1687	1,970	3323,42	0,8%
Intonaco	128073	0,238	30436,47	7,7%
Cartongesso	53817	0,176	9482,05	2,4%
Malta	6546	0,232	1517,16	0,4%
Colla	10460	1,109	11596,14	2,9%
Poroton	62229	0,243	15149,63	3,8%
Cemento Portland	52813	0,839	44303,72	11,2%
Piastrelle	37534	0,558	20961,38	5,3%
Isolante EPS	600	3,786	2271,73	0,6%
Isolante - Rockwool	9279	1,189	11032,09	2,8%
Isolante acustico	101	1,918	193,51	0,0%
Barriera al vapore	298	2,546	759,18	0,2%
Tavolato	3146	0,428	1347,49	0,3%
Tegole	18724	0,357	6680,88	1,7%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,3%
Totale			395484,19	100%

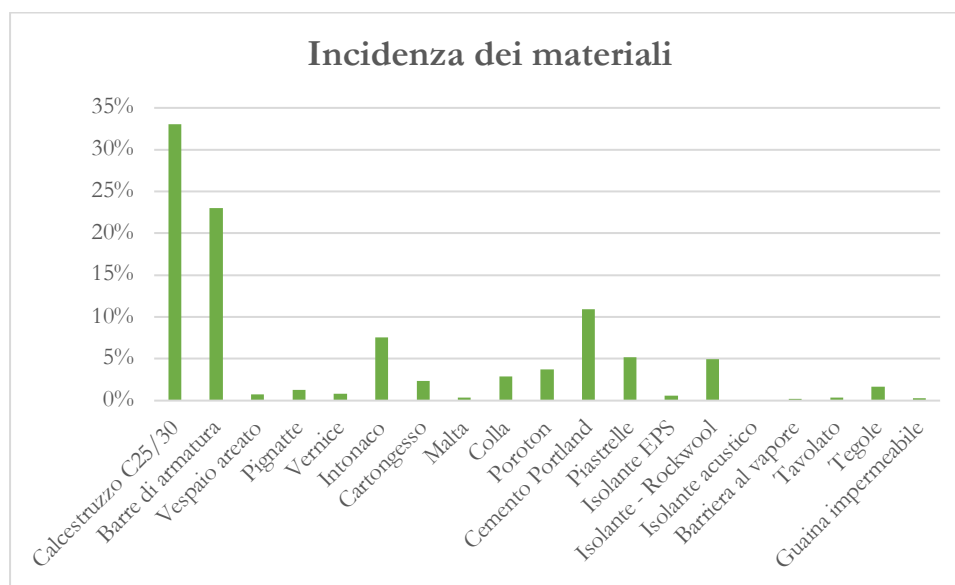


Grafico 6.8-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a pannelli, Catania

Tabella 6.11-Emissioni CO₂-LCA, Edificio a pannelli, Oslo

EDIFICIO A PANNELLI PREFABBRICATI - Oslo				
Materiale	Quantità [kg]	Emissioni unitarie [kg CO ₂ /kg]	Emissioni totali [kg CO ₂]	Incidenza [%]
Calcestruzzo C25/30	1572439	0,085	133757,44	32,9%
Barre di armatura	67233	1,384	93064,47	22,9%
Vespaio areato	1564	1,940	3034,02	0,7%
Pignatte	21717	0,243	5286,93	1,3%
Vernice	1687	1,970	3323,42	0,8%
Intonaco	128073	0,238	30436,47	7,5%
Cartongesso	53817	0,176	9482,05	2,3%
Malta	6546	0,232	1517,16	0,4%
Colla	10460	1,109	11596,14	2,9%
Poroton	62229	0,243	15149,63	3,7%
Cemento Portland	52813	0,839	44303,72	10,9%
Piastrelle	37534	0,558	20961,38	5,2%
Isolante EPS	600	3,786	2271,73	0,6%
Isolante - Rockwool	18662	1,189	22188,78	5,5%
Isolante acustico	101	1,918	193,51	0,0%
Barriera al vapore	298	2,546	759,18	0,2%
Tavolato	3146	0,428	1347,49	0,3%
Tegole	18724	0,357	6680,88	1,6%
Guaina impermeabile	1679	0,766	1286,48	0,3%
Totale			406640,88	100%

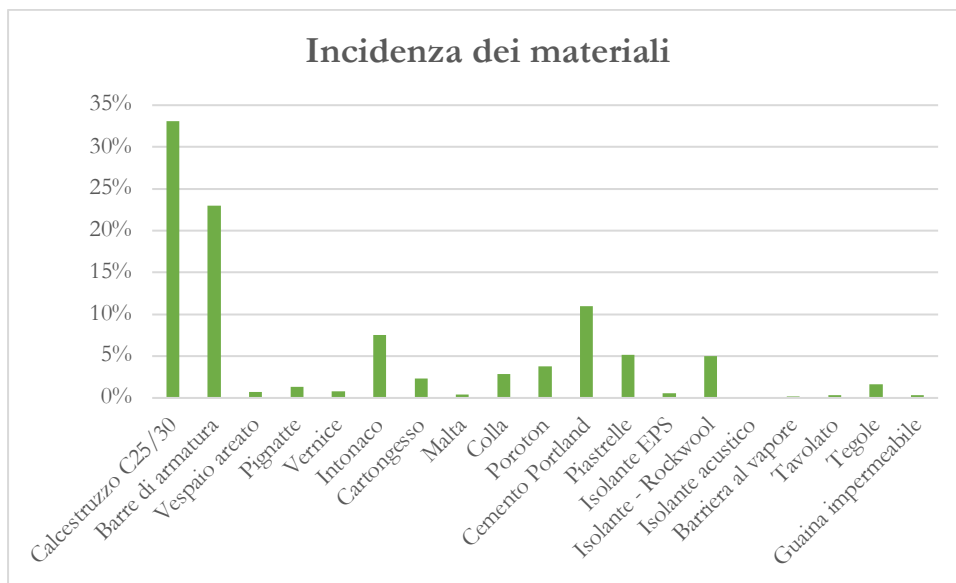


Grafico 6.9-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a pannelli, Oslo

6.7. Considerazioni

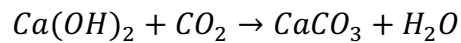
Possiamo notare come in tutte le tipologie costruttive l'incidenza dei materiali che compongono le strutture sia la predominante. Negli edifici in legno lamellare, possiede ancora una certa rilevanza la parte di struttura in cemento armato. Infatti, le fondazioni e tutto il primo piano fuori terra sono costruiti con questa tecnologia. Una progettazione di partenza differente avrebbe potuto ridurre l'impatto dei materiali da costruzione tradizionali a cospetto del legno lamellare.

In tutti gli edifici hanno un'incidenza marginale gli isolanti, siano essi termici o acustici, e i vari materiali plastici impiegati per le impermeabilizzazioni.

Da evidenziare l'incidenza dei blocchi in Poroton utilizzati per le tamponature esterne che si aggira attorno al 20%. L'introduzione di un prodotto innovativo con le medesime caratteristiche ma con emissioni inferiori potrebbe influire benevolmente sui risultati ottenuti. Osservando i grafici legati all'incidenza dei materiali è possibile capire su quali materiali orientare la ricerca e l'innovazione in termini di riduzione delle emissioni.

7. Carbonatazione

La carbonatazione del calcestruzzo è una reazione chimica, un processo naturale nel quale l'anidride carbonica presente nell'atmosfera reagisce con l'idrossido di calcio, composto presente nei materiali leganti che compongono il calcestruzzo, con conseguente formazione di carbonato di calcio e acqua, secondo la seguente reazione:



Non solo l'idrossido di calcio $Ca(OH)_2$ presente nella pasta cementizia è soggetto a carbonatazione, ma anche altri ossidi idratati ricchi di calcio presenti nel calcestruzzo hanno dimostrato di trasformarsi gradualmente in carbonato trasformandosi da prima in idrossido di calcio quando, a causa della carbonatazione, il pH si abbassa.

Ciò significa che una parte dell'anidride carbonica emessa durante la produzione del cemento viene riassorbita dal calcestruzzo durante le fasi di uso e fine vita come mostrato in Figura 7.1 [19]:

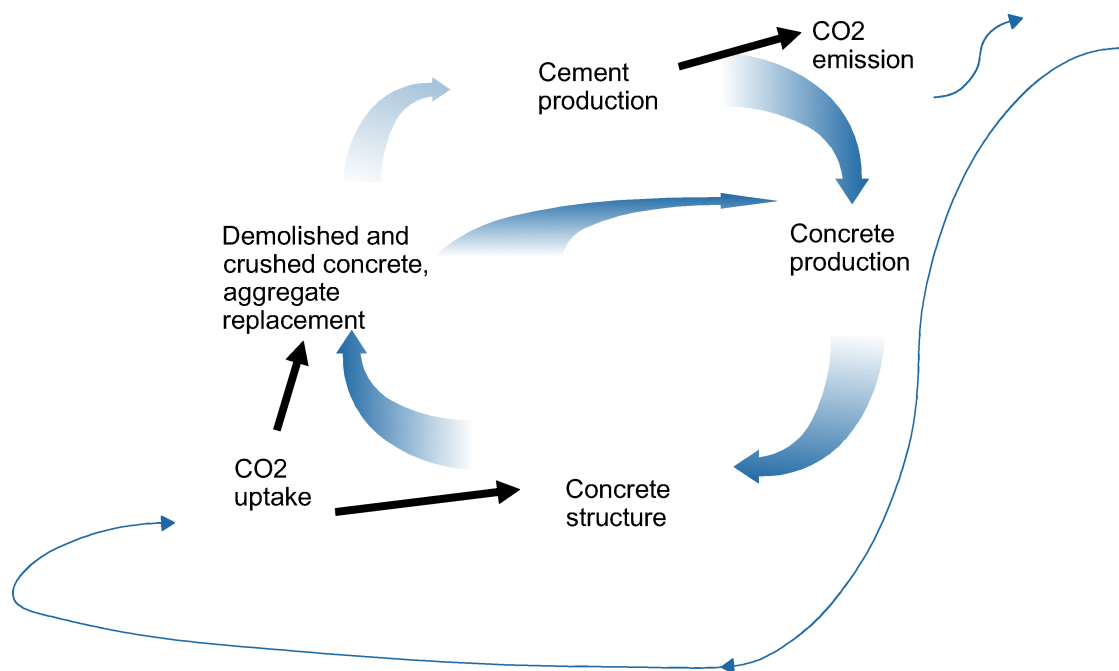


Figura 7.1-Ciclo della CO₂ nel cemento e calcestruzzo [19]

Il processo della carbonatazione, tuttavia, è oggetto di particolare attenzione nella progettazione delle strutture. Sebbene apporti benefici all'ambiente, riducendo le emissioni di anidride carbonica, questo processo riduce il pH della struttura e induce un processo di corrosione delle barre di armatura. Per evitare tale fenomeno occorre far sì che la carbonatazione non raggiunga le armature imponendo un adeguato copriferro.

Poiché la CO_2 dell'atmosfera si diffonde nel calcestruzzo attraverso la superficie, la carbonatazione si verificherà in varie fasi del ciclo di vita di un edificio. Soprattutto dopo la demolizione e lo schiacciamento del calcestruzzo questi processi aumentano drasticamente. Nella fase di produzione la carbonatazione può verificarsi per i prodotti in calcestruzzo prefabbricato durante la conservazione a lungo termine prima della consegna. Nella fase di utilizzo l'assorbimento di CO_2 dipende dalla resistenza del calcestruzzo e dalla condizione di esposizione. Un calcestruzzo interno a bassa resistenza assorbirà più CO_2 durante l'uso rispetto a un calcestruzzo ad alta resistenza esposto all'aperto. I trattamenti superficiali limiteranno la carbonatazione. Nella fase di fine vita la carbonatazione dipenderà dalle azioni intraprese. La più efficace è una frantumazione del calcestruzzo e qui la dimensione delle particelle è importante, più piccola è la migliore [19]. In Figura 7.2 è riportato l'andamento tipico dell'assorbimento di CO_2 :

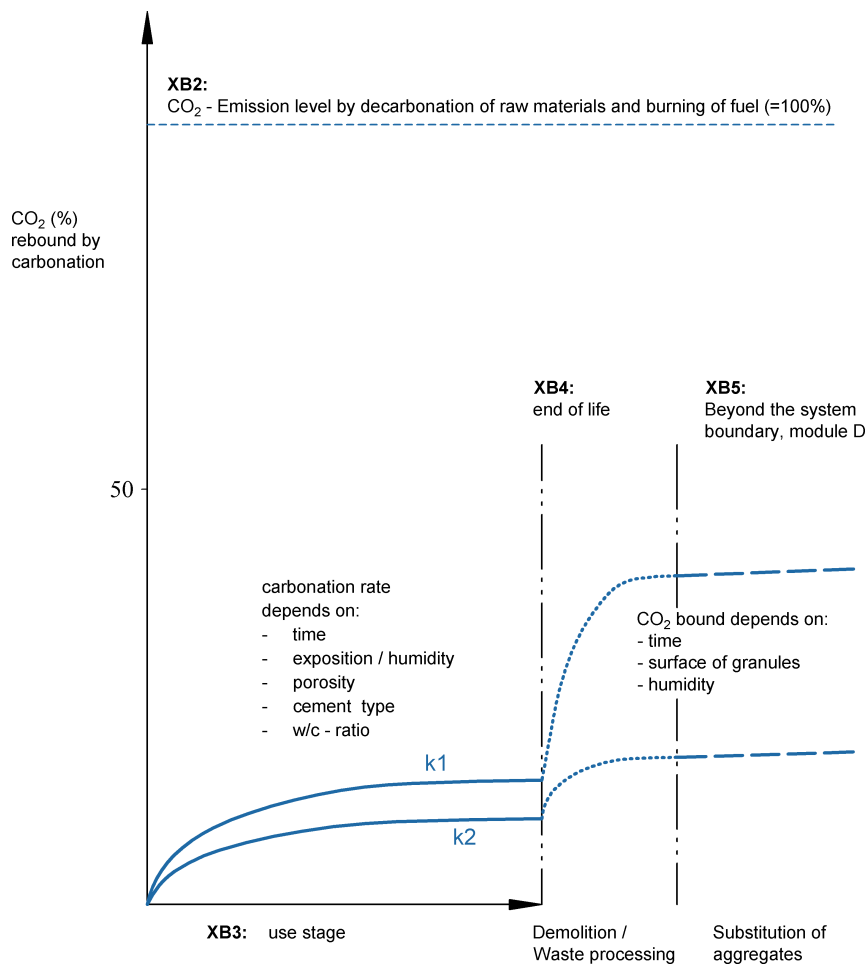


Figura 7.2-Assorbimento della CO_2 dalla carbonatazione del calcestruzzo [19]

Poiché nell'analisi del ciclo vita dei prodotti si è già tenuto conto del fine vita, nel successivo paragrafo si riporterà solamente il calcolo dell'assorbimento di CO₂ nella fase di utilizzo.

7.1. Fase di utilizzo, assorbimento di CO₂

Come detto, la carbonatazione avviene attraverso la superficie, per questo motivo riferiamo il calcolo all'unità di superficie (m²). La CO₂ assorbita durante la fase di utilizzo di t anni può essere calcolata come riportato nell'allegato B della norma EN-16757:

$$(CO_2)_{assorbita} = \left(\frac{k \cdot \sqrt{t}}{1000} \right) \cdot (CO_2)_{assorbita, TCC} \cdot C \cdot \%_{Carbonatazione} \quad [kg]$$

Dove:

k : è il fattore che tiene conto della resistenza cilindrica del calcestruzzo e del tipo di esposizione [mm/anni^{0,5}];

t : è la durata della fase di utilizzo [anni];

$(CO_2)_{assorbita, TCC}$: è la massima CO₂ teorica assorbita per la Totale Carbonatazione del Calcestruzzo (TCC) [kg];

C : è il contenuto di cemento in un m³ di calcestruzzo [kg/m³]

$\%_{Carbonatazione}$: è il grado di carbonatazione in percentuale

Concrete strength	≤ 15 MPa	15 to 20 MPa	20 to 25 MPa	25 to 35 MPa	≥ 35 MPa	Degree of carbonation
Parameters	Value of k-factor, in mm/year ^{0.5}					Degree of carbonation, in percentage
Civil engineering structures						
Exposed to rain		2,7	1,6	1,1		85
Sheltered from rain		6,6	4,4	2,7		75
In ground ^a		1,1	0,8	0,5		85
Buildings						
<u>Outdoor</u>						
Exposed to rain	5,5	2,7	1,6	1,1		85
Sheltered from rain	11	6,6	4,4	2,7		75
<u>Indoor in dry climate ^c</u>						
With cover ^b	11,6	6,9	4,6	2,7		40
Without	16,5	9,9	6,6	3,8		40
<u>In ground ^a</u>		1,1	0,8	0,5		85
^a Under groundwater level k = 0,2. ^b Paint or wall paper. (Under tiles, parquet and laminate k is considered to be 0.) ^c Indoor in dry climate means that the RH is normally between 45 % and 65 %.						

Figura 7.3-Estratto Tabella BB.1 EN 16757, Fattore k per il calcolo della quantità di carbonatazione per differenti classi di resistenza e per condizioni di esposizione differenti [19]

La CO_2 TCC è data da:

$$(CO_2)_{\text{assorbita, TCC}} = \left(\frac{w\%CaO_{\text{reagente}}}{100} \right) \cdot \text{legante} \cdot \frac{m_{CO_2}}{m_{CaO}}$$

Dove:

$w\%CaO_{\text{reagente}}$: è la parte di ossido di calcio reagente [$100 \cdot kg \text{ CaO} / kg \text{ cemento}$],

legante : è la massa di cemento [kg],

m_{CO_2} : è la massa molare dell'anidride carbonica $CO_2 = 44 \text{ g/mole}$,

m_{CaO} : è la massa molare dell'ossido di calcio $CaO = 56 \text{ g/mole}$.

Per la maggior parte dei cementi, è inoltre possibile calcolare il contenuto di ossido di calcio considerando solo il clinker e trascurando gli altri componenti.

Il cemento Portland è costituito almeno dal 95% di clinker e per tale cemento, un valore tipico di ossido di calcio reagente è 65%.

A seguito di tali considerazioni la massima CO_2 teoricamente assorbita per un chilo di cemento portland è:

$$(CO_2)_{\text{assorbita, TCC}} = \left(\frac{65}{100} \right) \cdot 0,95 \cdot \frac{44}{56} = 0,49 \text{ kg } CO_2 / Kg_{\text{cemento}}$$

Per questo motivo, si può dedurre che tutti i composti a base cementizia assorbano anidride carbonica nel corso della propria vita. È utile soffermarsi sui materiali composti da cemento al di fuori delle strutture in calcestruzzo, come nel caso degli intonaci utilizzati come finiture interna ed esterna di pareti e soffitti e delle malte cementizie utilizzate nella costruzione di muri in mattoni esterni e interni.

Per tali materiali, essendo il loro spessore ridotto, possiamo considerare che la carbonatazione avvenga completamente e dunque assumere come valore di calcolo la CO_2 TCC.

Infatti, la profondità di penetrazione della carbonatazione è data dalla seguente equazione:

$$d = k \cdot \sqrt{t}$$

Dove:

d : è la profondità di carbonatazione [mm];

k : è il fattore che tiene conto del [mm/anni^{0,5}];

t : è la durata della fase di utilizzo [anni].

Saranno sufficienti da 2 a 8 anni per carbonatare completamente uno strato di intonaco di 15 mm esposto rispettivamente all'interno e all'esterno.

7.2. Risultati

Per ciascun edificio quindi, sono state calcolate le quantità dei materiali a base cementizia che carbonatano completamente e le superfici di calcestruzzo soggette a carbonatazione.

Per le superfici disposte al di sotto di strati di intonaco, il tempo di carbonatazione non è riferito alla vita utile dell'edificio ma si è tenuto conto del tempo impiegato da tale fenomeno per raggiungere la superficie.

Si riportano nelle successive tabelle i risultati ottenuti:

Tabella 7.1-CO₂ assorbita, Edificio in x-lam

Edificio in X-Lam							
Elemento	Parametro	k	Tempo	Grado carb.	Quantità	Co ₂ TCC	Totale Co ₂ Assorbita
		[mm/anni ^{0,5}]	[anni]	[%]	[kg]	[kg/kg]	[kg]
Intonaco	Interno	11,6	1,7	100%	1879	0,49	920,79
Intonaco	Esterno	5,5	7,4	100%	9303	0,49	4558,40
Malta	Interno	11,6	1,7	100%	1636,50	0,49	801,89
Elemento	Parametro	k	Tempo	Grado carb.	Quantità	Co ₂ Assorbita	Totale Co ₂ Assorbita
		[mm/anni ^{0,5}]	[anni]	[%]	[m²]	[kg/m² cls]	[kg]
Fondazioni	Terreno	0,8	50,0	85%	553	0,71	391
Pilastrì	Interno	4,6	50,0	40%	176	1,91	337
Travi		4,6	50,0	40%	66	1,91	126
Solai		4,6	48,3	40%	66	1,88	125
Setti		4,6	50,0	40%	54	1,91	104
Totale							7364

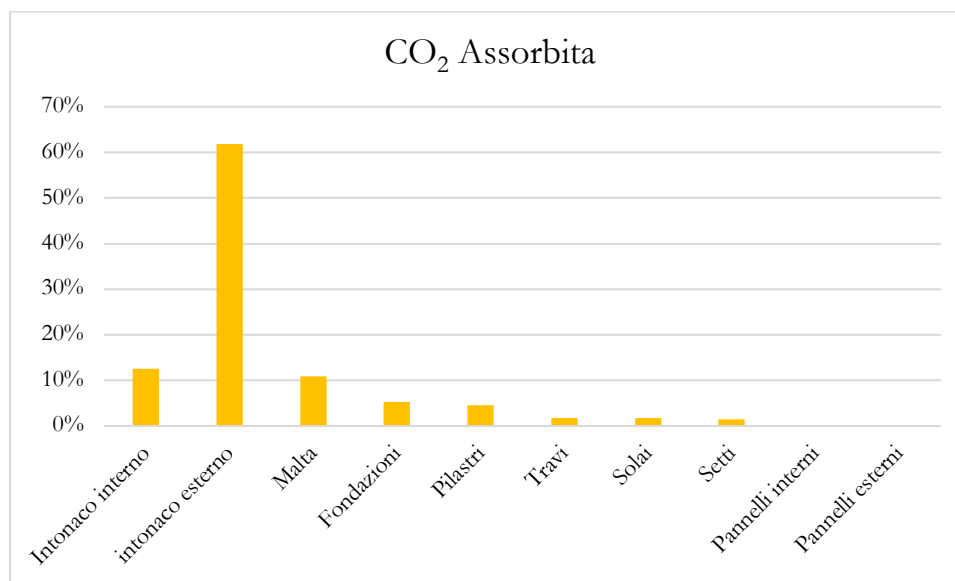


Grafico 7.1-Incidenza degli elementi a base cementizia sulla CO₂ assorbita-Edificio in x-lam

Tabella 7.2 CO₂ assorbita, Edificio a telaio

Edificio a Telaio							
Elemento	Parametro	k	Tempo	Grado carb.	Quantità	Co2 TCC	Totale Co2 Assorbita
		[mm/anni ^{0,5}]	[anni]	[%]	[kg]	[kg/kg]	[kg]
Intonaco	Interno	11,6	1,67	100%	33849	0,49	16586
Intonaco	Esterno	5,5	7,44	100%	9301	0,49	4558
Malta	Interno	11,6	1,67	100%	23280	0,49	11407
Elemento	Parametro	k	Tempo	Grado carb.	Quantità	Co2 Assorbita	Totale Co2 Assorbita
		[mm/anni ^{0,5}]	[anni]	[%]	[m²]	[kg/m² cls]	[kg]
Fondazioni	Terreno	0,8	50,00	85%	553	0,71	391
Pilastrì	Interno	4,6	50,00	40%	764	1,91	1460
Travi		4,6	50,00	40%	331	1,91	633
Solai		4,6	48,33	40%	332	1,88	624
Setti		4,6	50,00	40%	247	1,91	471
Totale							36130

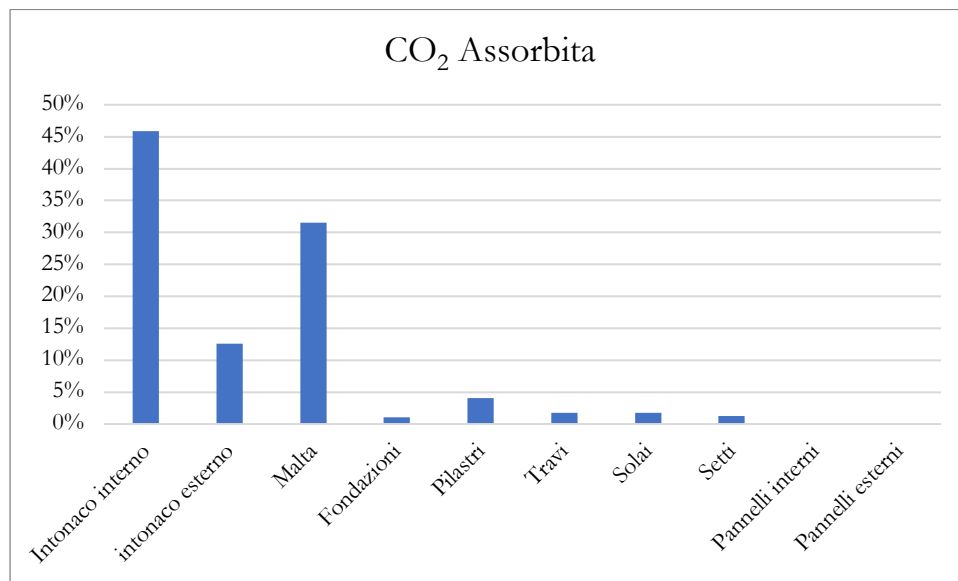


Grafico 7.2-Incidenza degli elementi a base cementizia sulla CO₂ assorbita-Edificio a telaio

Tabella 7.3-CO₂ assorbita, Edificio a pannelli

Edificio in Pannelli prefabbricati							
Elemento	Parametro	k	Tempo	Grado carb.	Quantità	Co ₂ TCC	Totale Co ₂ Assorbita
		[mm/anni ^{0,5}]	[anni]	[%]	[kg]	[kg/kg]	[kg]
Intonaco	Interno	11,6	1,67	100%	24823	0,49	12163
Intonaco	Esterno	5,5	7,44	100%	9303	0,49	4558
Malta	Interno	11,6	1,67	100%	1637	0,49	802
Elemento	Parametro	k	Tempo	Grado carb.	Quantità	Co ₂ Assorbita	Totale Co ₂ Assorbita
		[mm/anni ^{0,5}]	[anni]	[%]	[m ²]	[kg/m ² cls]	[kg]
Fondazioni	Terreno	0,8	50,0	85%	735	0,71	520
Pilastrì	Interno	4,6	50,0	40%	176	1,91	337
Travi		4,6	50,0	40%	66	1,91	126
Solai		4,6	48,3	40%	1385	1,88	2649
Setti		4,6	50,0	40%	247	1,91	471
Pannelli		4,6	48,3	40%	2598	1,88	4969
Pannelli	Esterno	4,4	42,6	75%	1620	3,16	5127
Totale							31722

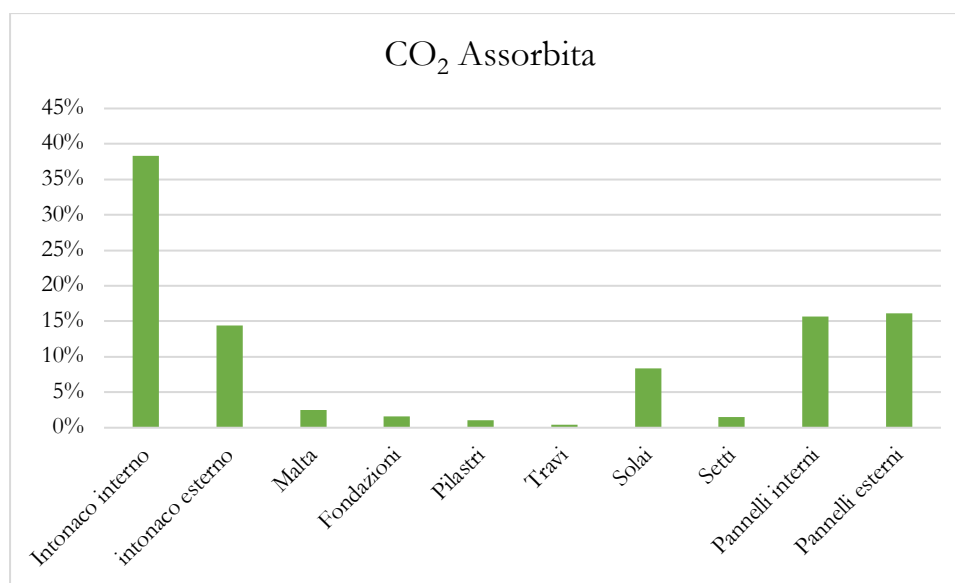


Grafico 7.3-Incidenza degli elementi a base cementizia sulla CO₂ assorbita-Edificio a pannelli

7.3. Considerazioni

Si può notare come l'incidenza maggiore sulla quantità di anidride carbonica assorbita sia data dai materiali a base cementizia quali intonaco e malta. Questo è dovuto al fatto che tali materiali completano il loro processo di carbonatazione in minor tempo e con una percentuale pari al 100%. Per questo motivo, anche l'edificio in x-lam presenta valori significativi di CO₂ assorbita.

L'edificio a pannelli prefabbricati sebbene abbia ampie superfici di calcestruzzo soggette a carbonatazione (i pannelli stessi) assorbe meno dell'edificio a telaio in quanto, in quest'ultimo, sono impiegate maggiori quantità di malta per la realizzazione delle tamponature esterne. Inoltre, le quantità di intonaco interne sono maggiori nell'edificio a telaio poiché utilizzate anche come finitura delle partizioni interne.

8. Analisi energetica

Lo scopo dell'analisi energetica è quello di poter quantificare i fabbisogni di energia per riscaldamento e raffrescamento di ciascun edificio per poterli confrontare fra loro.

La scelta di ubicarli in tre località differenti ci fornirà indicazioni circa l'efficacia di ciascuna tecnica costruttiva.

Tale analisi è stata svolta mediante l'utilizzo di un software di calcolo dedicato: Design Builder [20]. Questo consente, a partire dal modello dell'edificio, di eseguire l'analisi dinamica del fabbisogno energetico dell'edificio.

Si riporta nell'immagine seguente il modello utilizzato per il calcolo.



Figura 8.1-Modello a blocchi, Design Builder

A seconda della tecnologia utilizzata e dell'ubicazione si son variate le stratigrafie dei componenti, mantenendo inalterate le ipotesi comuni ai nove edifici.

Nel paragrafo successivo, si riportano i dati di imputati per le analisi.

8.1. Assunzioni

Per rendere quanto più possibile comparabili i risultati dei diversi edifici si è partiti da un'impostazione comune:

8.1.1. Zone Termiche

li edifici sono stati suddivisi in zone riscaldate e non riscaldate. Il piano terreno adibito ad autorimessa, i vani scale e il sottotetto non abitabile sono stati modellati come zone termiche non riscaldate e pertanto non rientreranno nell'analisi termica e influiranno solo nel calcolo delle dispersioni dagli ambienti riscaldati verso questi ultimi.

In Figura 8.2 è rappresentata una schematizzazione delle zone termiche considerate per il piano tipo.

Le zone non riportate in figura sono state modellate come zone non riscaldate.

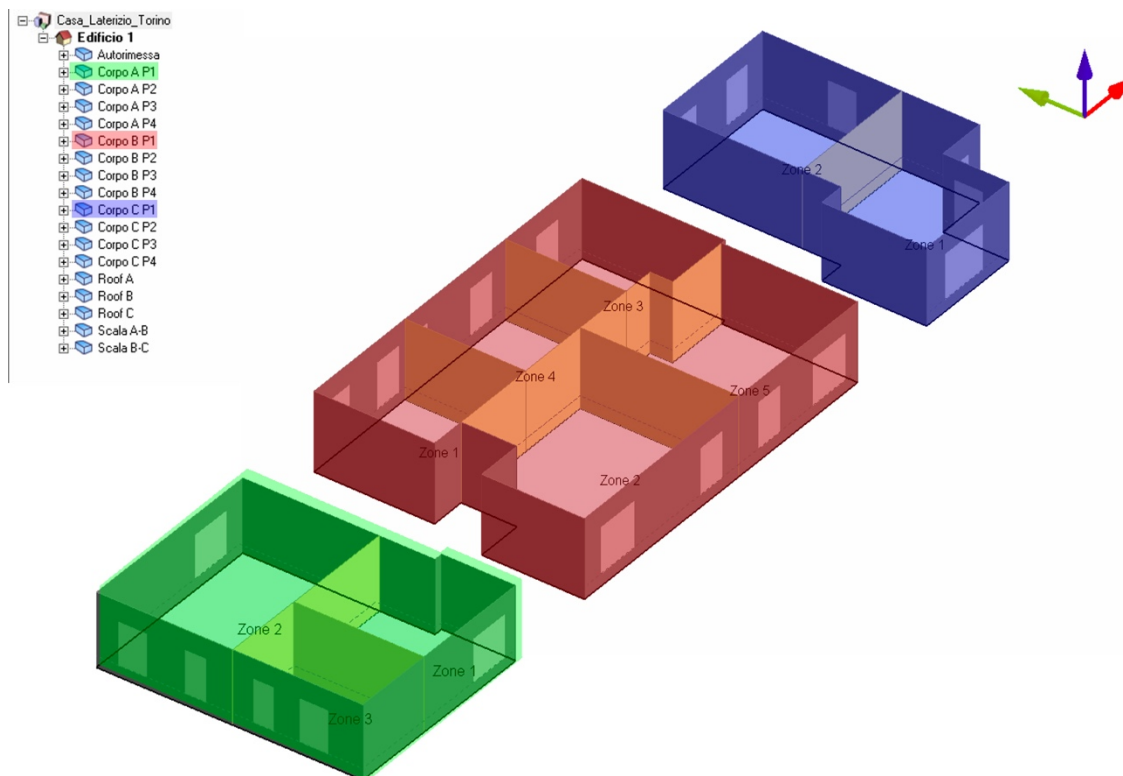


Figura 8.2-Zone termiche piano tipo, Design Builder

8.1.2. Trasmittanze

Come già detto al paragrafo 2.1 le trasmittanze dei componenti sono state scelte in accordo con l'Appendice A del decreto del 26 giugno 2015 [3]. Si riportano in Tabella 8.1, in

Tabella 8.2 e in

Tabella 8.3 i valori assunti per i vari edifici.

Tabella 8.1-Trasmittanza termica del fabbricato, Torino

Trasmittanza termica del fabbricato - Torino				
Tipologia edificio	U [W/m ² K]			
	Riferimento	X-lam	Telaio	Pannelli
Chiusure opache verticali	0,260	0,252	0,251	0,256
Chiusure opache orizzontali di copertura	0,220	0,214	0,217	0,220
Chiusure opache orizzontali di pavimento	0,260	0,258	0,258	0,258
Chiusure tecniche trasparenti	1,400	1,316	1,316	1,316
Strutture opache di separazione	0,800	0,482	0,736	0,775

Tabella 8.2-Trasmittanza termica del fabbricato, Catania

Trasmittanza termica del fabbricato - Catania				
Tipologia edificio	U [W/m ² K]			
	Riferimento	X-lam	Telaio	Pannelli
Chiusure opache verticali	0,430	0,417	0,415	0,428
Chiusure opache orizzontali di copertura	0,350	0,337	0,345	0,337
Chiusure opache orizzontali di pavimento	0,440	0,433	0,433	0,433
Chiusure tecniche trasparenti	3,000	2,761	2,761	2,761
Strutture opache di separazione	0,800	0,482	0,736	0,775

Tabella 8.3-Trasmittanza termica del fabbricato, Oslo

Trasmittanza termica del fabbricato - Oslo				
Tipologia edificio	U [W/m ² K]			
	Riferimento	X-lam	Telaio	Pannelli
Chiusure opache verticali	0,240	0,235	0,234	0,239
Chiusure opache orizzontali di copertura	0,200	0,196	0,193	0,196
Chiusure opache orizzontali di pavimento	0,240	0,232	0,232	0,232
Chiusure tecniche trasparenti	1,100	1,064	1,064	1,064
Strutture opache di separazione	0,800	0,482	0,736	0,775

8.1.3. Schermature solari

Come schermature sono state impostate tende a rullo esterne. Il sistema con cui queste vengono attivate è di tipo manuale, ma all'interno del software è stato scelto di renderle attive nel momento in cui l'impianto di raffrescamento è attivo e l'irradianza solare è superiore ai 120 W/m^2 . Tale scelta è stata dettata dal fatto di non voler un sistema di controllo automatizzato ma allo stesso tempo, usando come condizione quella di avere l'impianto di raffrescamento attivo, non si vanno a ridurre gli apporti solari durante il periodo invernale. Si riporta in Figura 8.3 la schermata di input per le schermature solari:

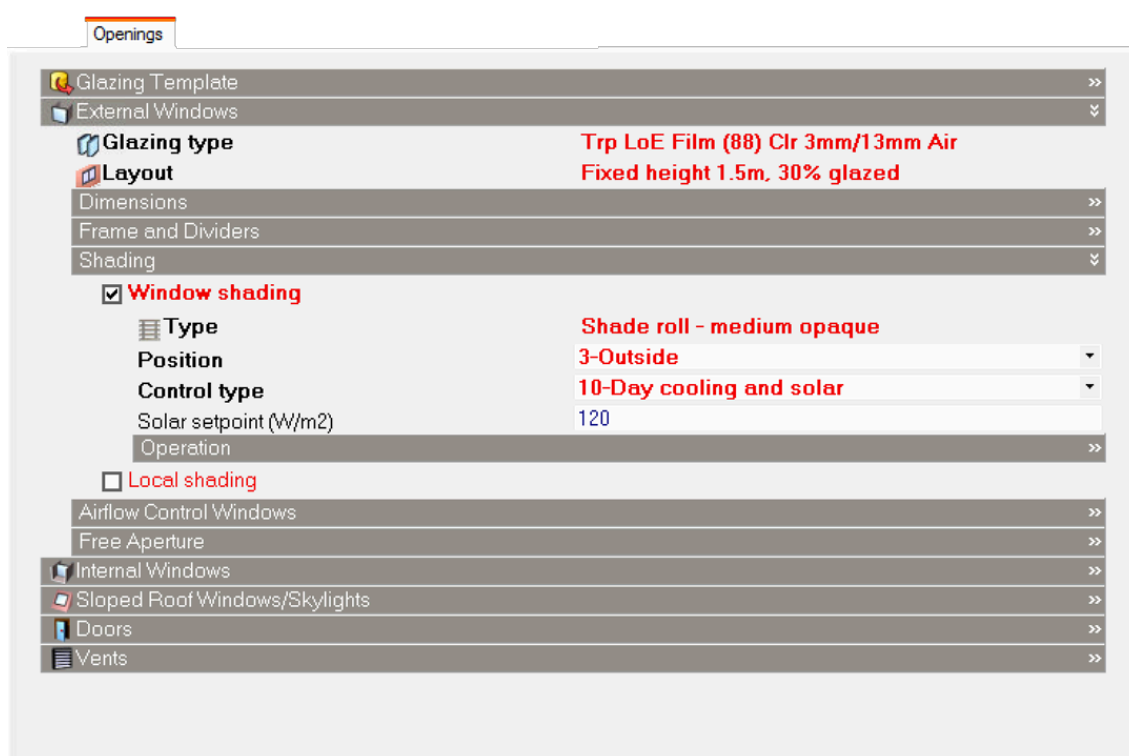


Figura 8.3-Schermature solari, Design Builder

8.1.4. Temperature di Set-Point

Le temperature di set-point utilizzate sono:

- 20° per il periodo di riscaldamento,
- 26° per il periodo di raffrescamento.

8.1.5. Ventilazione

Trattandosi di un edificio residenziale, è stata considerata la sola ventilazione naturale senza alcun tipo di sistema di controllo. Per questo motivo, si è deciso che fossero gli occupanti a regolare la ventilazione aprendo o meno gli infissi. Resta comunque sempre presente la ventilazione dovuta a infiltrazioni e impostata pari a 0,3 vol/h.

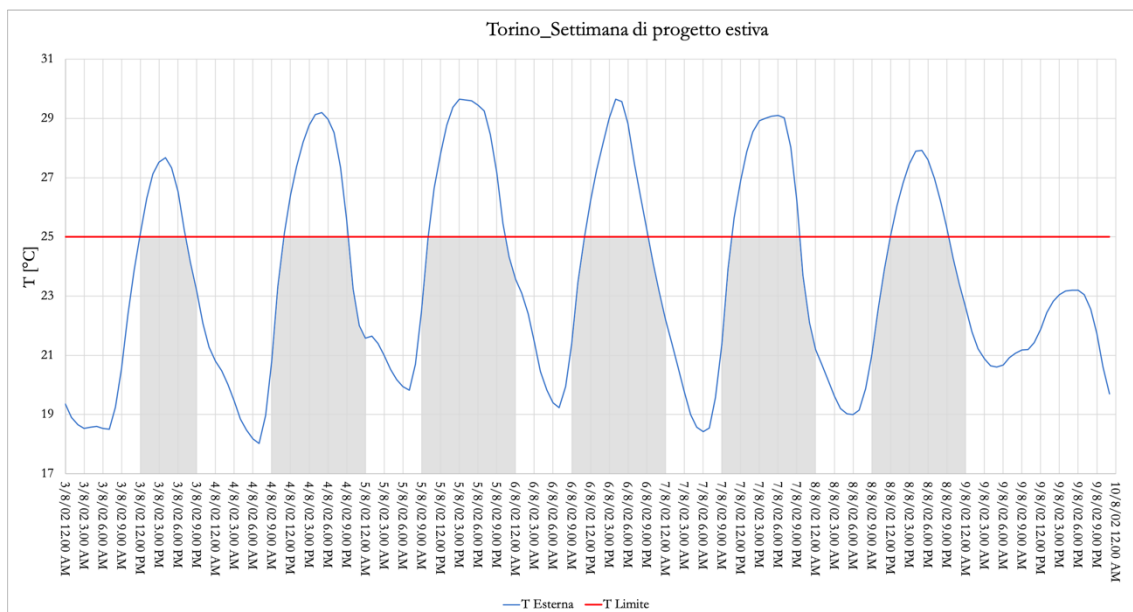
Si sono effettuate le seguenti valutazioni:

I. Determinazione del periodo di ventilazione

Per considerare quando effettuare la ventilazione, per ogni località si sono analizzate le temperature esterne e in funzione di queste è stato scelto il periodo in cui effettuare tale ventilazione.

II. Determinazione della durata giornaliera di ventilazione

Per determinare la durata della ventilazione durante la giornata invece, è stato analizzato il profilo orario della temperatura esterna della settimana più calda per ciascuna località. Si è ipotizzato che, qualora necessario, la ventilazione potesse esser effettuata con temperature esterne inferiori a 25°.



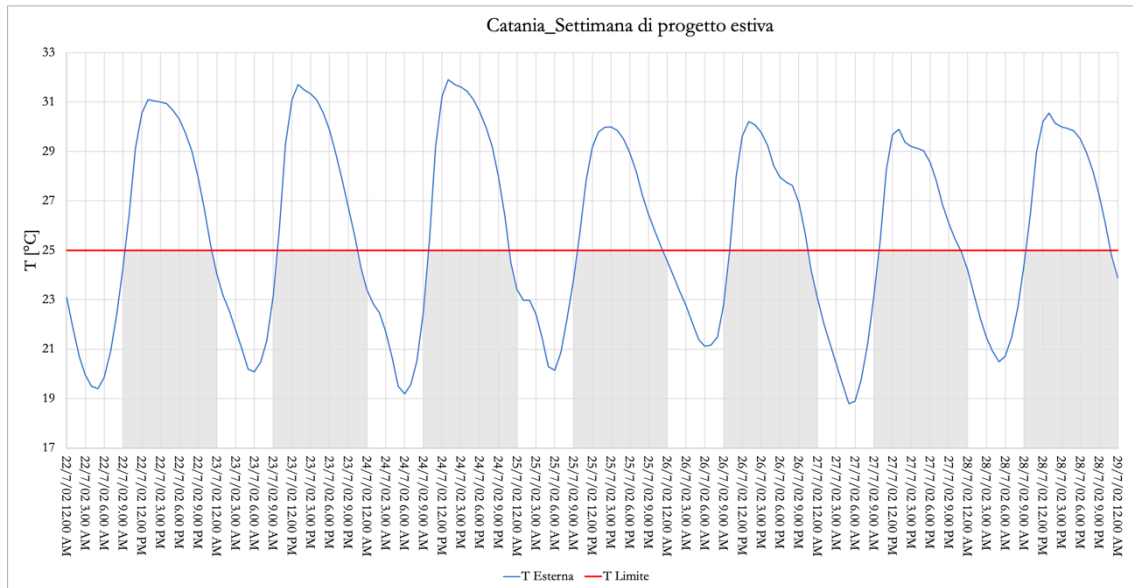


Grafico 8.2-Temperature esterne, settimana di progetto-Catania

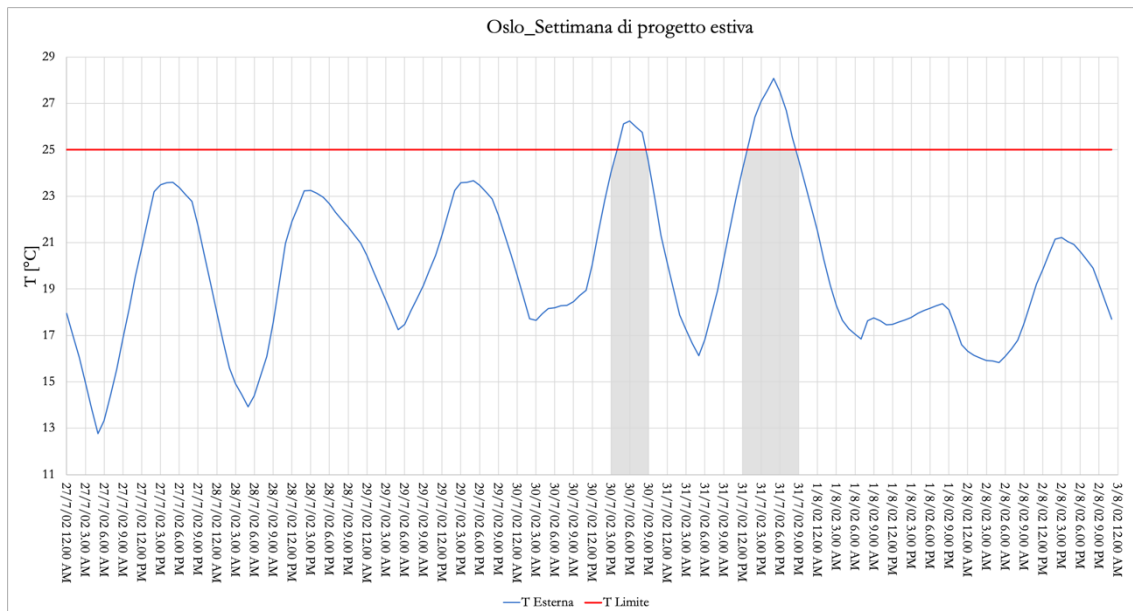


Grafico 8.3-Temperature esterne, settimana di progetto-Oslo

In grigio sono evidenziate le fasce orarie entro le quali è svantaggioso effettuare ventilazione. Tuttavia, non si è deciso di effettuare ventilazione in tutte le altre ore della giornata ma sono state impostate delle fasce orarie convenzionali a seconda della località. In Tabella 8.4, in Tabella 8.5 e in Tabella 8.6 sono riportate le strategie di ventilazione utilizzate rispettivamente per Torino, Catania e Oslo.

Tabella 8.4-Portata di ventilazione, Torino

Portata di ventilazione Torino			
Periodo	1/01 - 09/06	10/06 - 31/08	01/09 - 31/12
Orario	Portata [vol/h]		
9:00-24:00	0,3	0,3	0,3
00:00-9:00	0,3	3	0,3

Tabella 8.5-Portata di ventilazione, Catania

Portata di ventilazione Catania			
Periodo	1/01 - 31/05	01/06 - 30/09	01/10 - 31/12
Orario	Portata [vol/h]		
8:00-24:00	0,3	0,3	0,3
00:00-8:00	0,3	3	0,3

Tabella 8.6-Portata di ventilazione, Oslo

Portata di ventilazione Oslo			
Periodo	1/01 - 14/06	15/06 - 20/08	21/08 - 31/12
Orario	Portata [vol/h]		
9:00-24:00	0,3	0,3	0,3
00:00-9:00	0,3	3	0,3

8.1.6. Simulazione energetica

La simulazione energetica per ciascun edificio è stata effettuata su base oraria, effettuando due step di calcolo per ciascuna ora. Il controllo della temperatura è stato impostato sulla temperatura operativa.

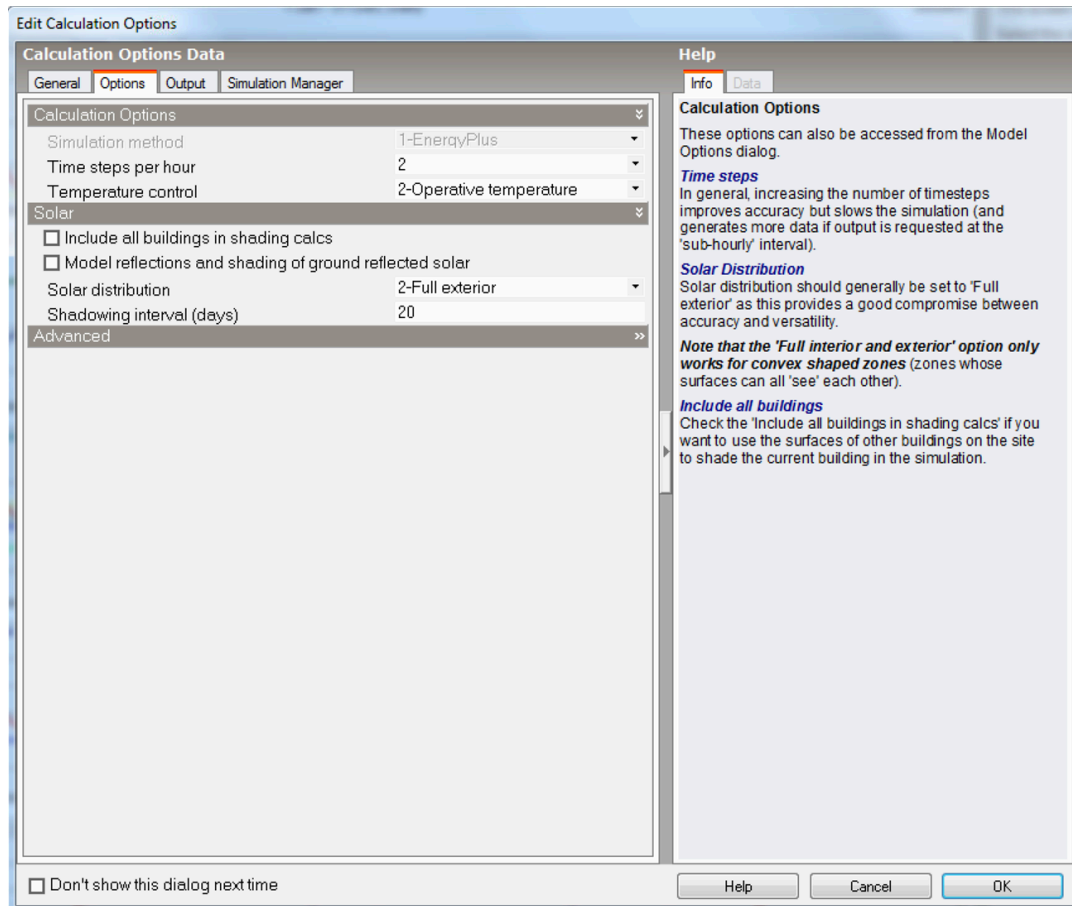


Figura 8.4-Opzioni di calcolo, Design Builder

8.2. Risultati

In Figura 8.5 è riportato l'output grafico ottenuto dal software. L'output è impostato su base giornaliera per non appesantire troppo i risultati, ma il calcolo eseguito dal programma è su base oraria come mostrato in Figura 8.4.

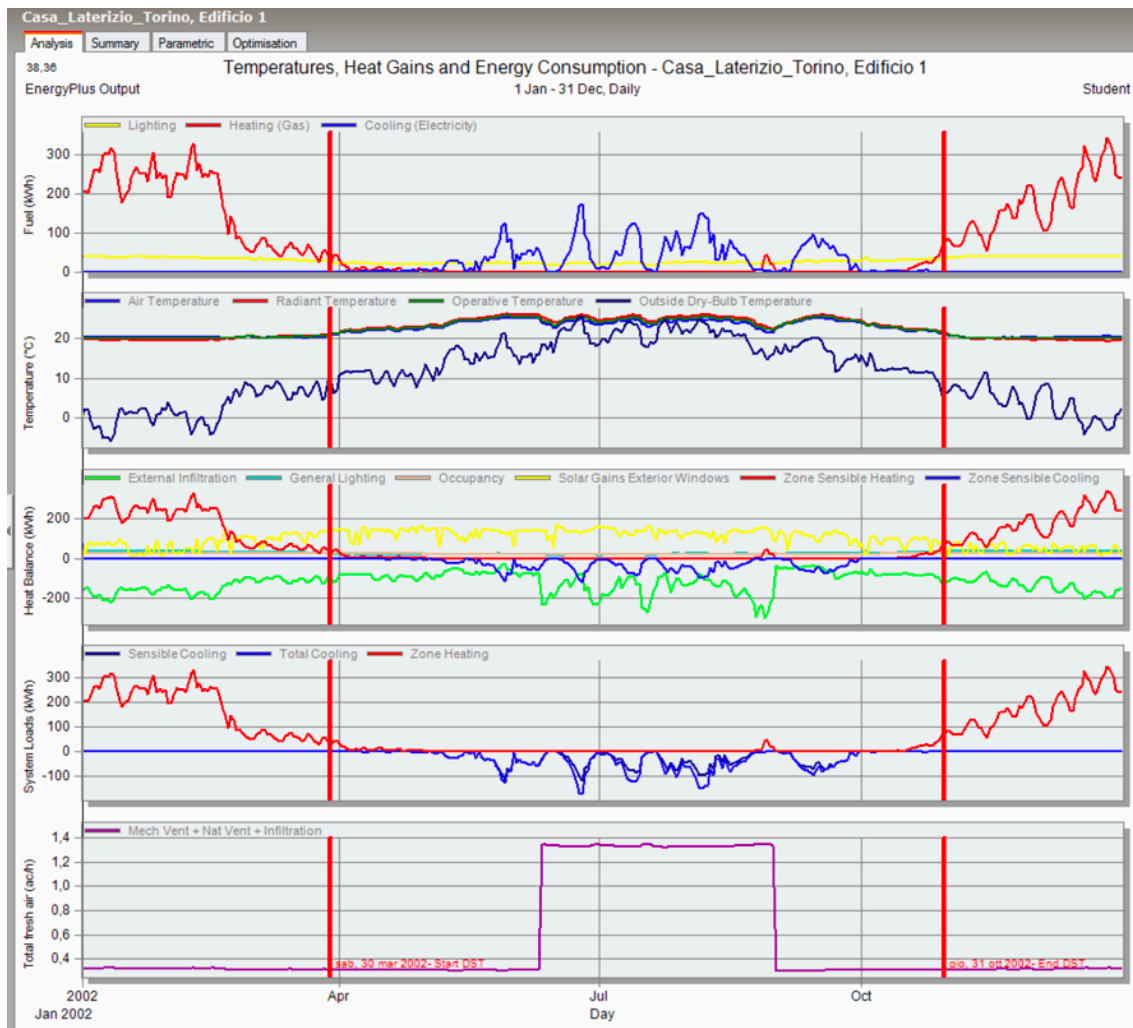


Figura 8.5-Output simulazione annuale, Edificio a telaio-Torino, Design Builder

Si riportano in Tabella 8.7 e in Tabella 8.8 i fabbisogni energetici ottenuti dalle analisi delle tre differenti tipologie di edificio per ciascuna località.

Tabella 8.7-Fabbisogno per riscaldamento annuo

Fabbisogno riscaldamento			
	Torino	Catania	Oslo
Edificio	[kWh]		
Xlam	28038,61	10944,14	43947,91
Telaio	26702,86	10098,92	41931,44
Pannelli	26373,48	9879,33	41727,80

Tabella 8.8-Fabbisogno per raffrescamento annuo

Fabbisogno raffrescamento			
	Torino	Catania	Oslo
Edificio	[kWh]		
Xlam	8966,33	23748,88	6632,53
Telaio	7056,72	22120,99	4823,99
Pannelli	6376,20	21167,24	4435,16

Si riportano in Grafico 8.4, Grafico 8.5, Grafico 8.6 i fabbisogni differenziati a seconda della tecnologia costruttiva rispettivamente per gli edifici ubicati a Torino, Catania e Oslo:

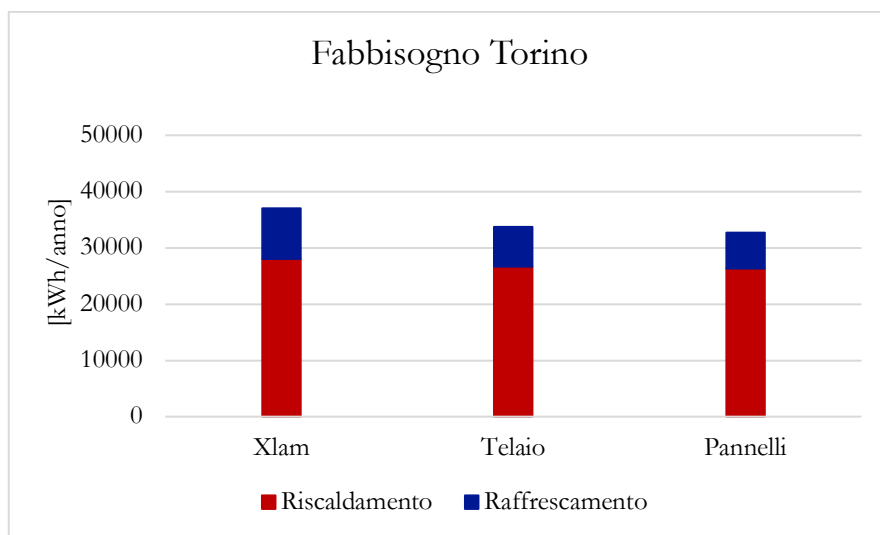


Grafico 8.4-Fabbisogno energetico annuale, Torino

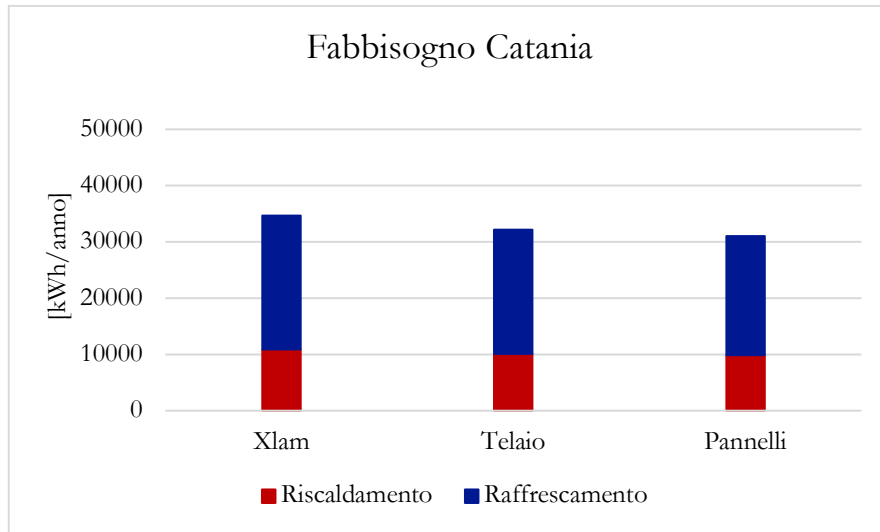


Grafico 8.5-Fabbisogno energetico annuale, Catania

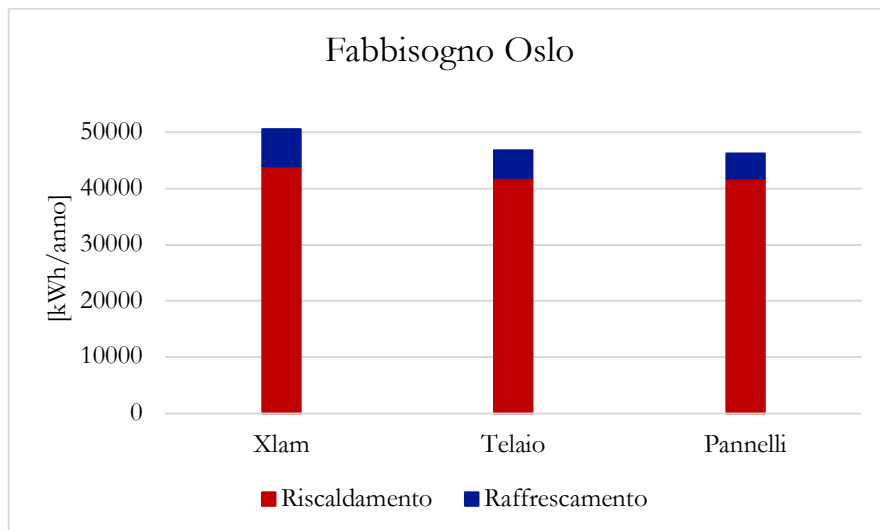


Grafico 8.6-Fabbisogno energetico annuale, Oslo

Si noti come indifferentemente dalla località i fabbisogni energetici siano più alti per gli edifici realizzati con struttura portante in legno lamellare. Nei successivi paragrafi verrà analizzato anche tale aspetto cercando di fornire una spiegazione a quanto trovato.

8.3. Emissioni CO₂

Per poter procedere con il calcolo delle emissioni totali dovute all'utilizzo dell'edificio è necessario stimare l'energia spesa per il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento durante il periodo di vita dell'edificio.

Il periodo di vita è assunto pari a 50 anni. Il consumo di energia totale sarà quindi il prodotto fra il consumo annuale e la vita utile dell'edificio. Successivamente è necessario convertire i fabbisogni energetici in termini di emissioni di CO₂. Per ottenere tale risultato è stato utilizzato un fattore di conversione pari a 0,43 kg CO₂/kWh. Tale valore è un valor medio preso da letteratura. [21]

È bene sottolineare come tale risultato possa essere approfondito ulteriormente, differenziando tale valore a seconda della località.

Si riportano in Tabella 8.9 i valori ottenuti:

Tabella 8.9-Fabbisogno energetico periodo di vita utile dell'edificio, Emissioni di CO₂ totali

Fabbisogni energetici - Emissioni CO₂						
Località	Edificio	Fabbisogno Annuo	Vita utile	Fabbisogno Totale	Fattore di conversione	Emissioni Totali
		kWh/anno	Anni	kWh	kg CO ₂ / kWh	kg CO ₂
Torino	X-lam	37004,94	50	1850246,99	0,43	795606,21
	Telaio	33759,58	50	1687979,20	0,43	725831,06
	Pannelli	32749,68	50	1637484,09	0,43	704118,16
Catania	X-lam	34693,02	50	1734651,06	0,43	745899,95
	Telaio	32219,91	50	1610995,47	0,43	692728,05
	Pannelli	31046,57	50	1552328,69	0,43	667501,33
Oslo	X-lam	50580,44	50	2529022,00	0,43	1087479,46
	Telaio	46755,43	50	2337771,71	0,43	1005241,83
	Pannelli	46162,96	50	2308148,18	0,43	992503,72

8.4. Considerazioni

Per giungere ai risultati sopra riportati si è fatto ricorso a numerose simulazioni differenti nel corso delle quali si è potuto notare come la ventilazione giochi un ruolo fondamentale nei fabbisogni di climatizzazione estiva.

Si è scelto di utilizzare la ventilazione naturale controllata dall'utente per i motivi precedentemente descritti.

Vale la pena precisare che, specialmente nel caso degli edifici collocati ad Oslo, la scelta di un opportuno sistema di ventilazione meccanica controllata avrebbe ridotto, o probabilmente azzerato, i consumi nel periodo estivo. Questa considerazione può essere effettuata osservando l'andamento delle temperature esterne durante la settimana di progetto estiva. La scelta di effettuare ventilazione solo nelle ore notturne è stata dettata dal fatto che fosse la più plausibile delle ventilazioni manuali. Aumentare l'intervallo di ventilazione avrebbe abbassato la temperatura al di sotto della soglia prevista per il periodo di riscaldamento, attivando quindi l'impianto. Con l'utilizzo di un sistema di ventilazione meccanica controllata, impostando ad esempio l'attivazione di una ventola mediante l'utilizzo di un termostato, si sarebbe potuto mantenere più a lungo l'impianto di raffrescamento spento.

Osservando i risultati ottenuti, si può notare come, indipendentemente dalla località in cui è stato collocato l'edificio, i fabbisogni di energia sono inferiori nell'edificio a pannelli in c.a.

Ciò può essere spiegato alla differente inerzia termica dei componenti dei differenti edifici.

L'edificio a pannelli è molto più massivo rispetto a quello in x-lam e sfrutterà maggiormente la capacità dei componenti di accumulare calore e rilasciarlo lentamente.

9. Risultati e considerazioni

Terminate le analisi condotte su ciascun edificio, si procede a raggruppare i risultati ottenuti. I risultati sono esposti seguendo l'ordine di calcolo riportato nei paragrafi precedenti. Per facilità di lettura si trascurano i calcoli intermedi che hanno portato al risultato poiché ampiamente descritti nei rispettivi paragrafi.

9.1. CO₂ emessa-LCA

Per valutare l'influenza della località climatica sulle emissioni di CO₂ del singolo fabbricato si riportano in Tabella 9.1 e in Grafico 9.1 i risultati ottenuti:

Tabella 9.1-CO₂ emessa-LCA, Edificio plurifamiliare

CO ₂ Emessa-LCA		
Tipologia	Città	CO ₂ emessa [kg]
X-lam	Torino	322890
	Catania	314178
	Oslo	324744
Telaio	Torino	530856
	Catania	521614
	Oslo	532889
Pannelli	Torino	404606
	Catania	395484
	Oslo	406641

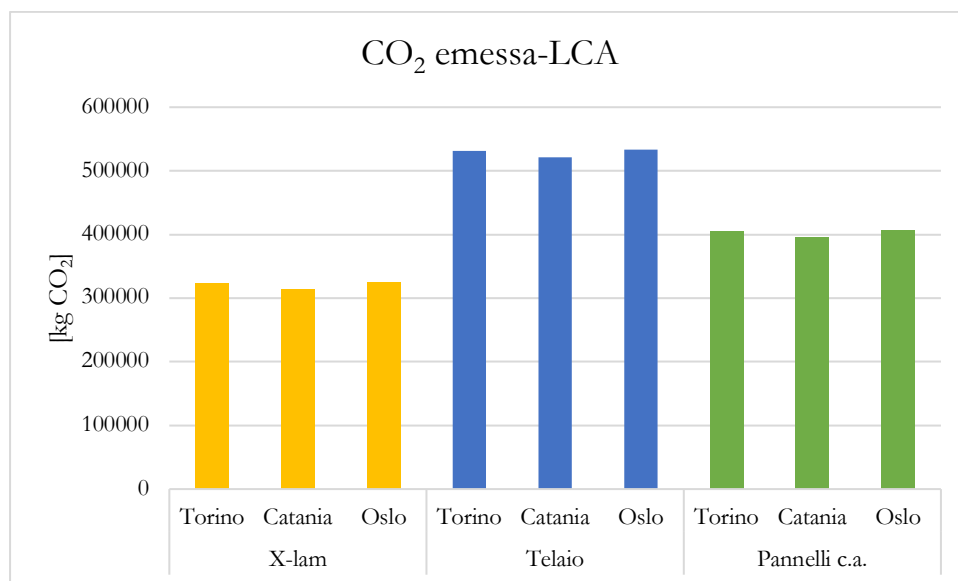


Grafico 9.1-CO₂ Emessa, Edificio plurifamiliare

Si può notare come la località non influenza particolarmente le emissioni, in quanto la differente ubicazione ha influito solamente sullo spessore dei componenti isolanti. Tali materiali, come riportato nei grafici del paragrafo 6.6, hanno un'incidenza che varia tra il 2% e il 6% sulle emissioni totali e pertanto non forniscono variazioni significative.

Differente impatto hanno invece le diverse tecnologie costruttive: rispetto all'edificio più ecologico dal punto di vista della costruzione, quello in x-lam, l'edificio a telaio ha emissioni superiori del 64%; quello a pannelli prefabbricati del 26%.

Nell'edificio a telaio, notevole impatto è dato dai blocchi in Poroton utilizzati per le tamponature esterne, elemento che negli altri edifici è limitato solamente ai muri del piano terreno. L'aver sostituito tali blocchi con pareti portanti, siano esse in legno o in calcestruzzo, ha accorpato la funzione strutturale con quella di separazione con l'esterno riducendo l'uso di materiale.

9.2. CO₂ Assorbita

I valori esposti nel precedente paragrafo indicano come le strutture in calcestruzzo abbiano un impatto maggiore rispetto a quelle in legno. Tuttavia, occorre tener presente quanto esposto al capitolo 1, ovvero al fenomeno della carbonatazione che può ridurre le emissioni in atmosfera. In Tabella 9.2 e in Grafico 9.2 sono riportati i risultati di tale fenomeno:

Tabella 9.2-CO₂ assorbita, Edificio plurifamiliare

CO ₂ Assorbita		
Tipologia	Città	CO ₂ assorbita [kg]
X-lam	Torino	7364
	Catania	
	Oslo	
Telaio	Torino	36130
	Catania	
	Oslo	
Pannelli c.a.	Torino	31722
	Catania	
	Oslo	

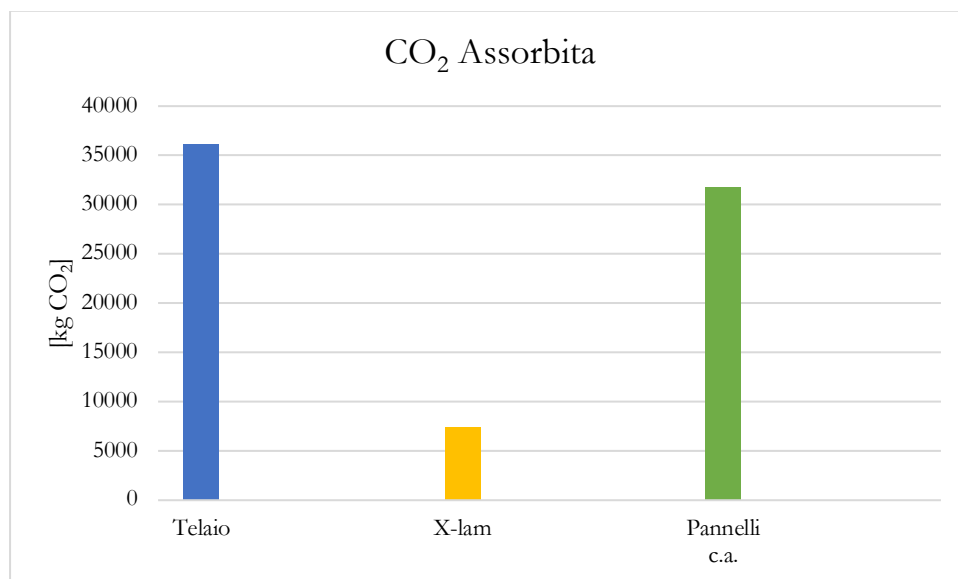


Grafico 9.2-CO₂ assorbita, Edificio plurifamiliare

Si può notare come la quantità di CO₂ assorbita dagli edifici in c.a. sia quasi 5 volte rispetto a quella assorbita dall'edificio in legno. Tale valore seppur significativo, preso singolarmente non può fornire indicazioni su quale dei tre edifici sia più sostenibile.

Pertanto, nel prossimo paragrafo ci si pone l'obiettivo di analizzare complessivamente i due risultati precedenti.

9.3. CO₂ globale-LCA

Per concludere il confronto fra le tre differenti tecnologie costruttive è bene accorpare i risultati ottenuti dalla CO₂ emessa in atmosfera e da quella assorbita dalle strutture. In Tabella 9.3 e in Grafico 9.3 si riportano i risultati ottenuti:

Tabella 9.3-CO₂ Globale-LCA, Edificio plurifamiliare

CO ₂ Globale-LCA					
Tipologia	Città	CO ₂ Assorbita [kg]	CO ₂ emessa [kg]	Emissioni globali [kg]	Incidenza
X-lam	Torino	7364	322890	315526	2,28%
	Catania		314178	306814	2,34%
	Oslo		324744	317380	2,27%
Telaio	Torino	36130	530856	494725	6,81%
	Catania		521614	485483	6,93%
	Oslo		532889	496759	6,78%
Pannelli	Torino	31722	404606	372884	7,84%
	Catania		395484	363762	8,02%
	Oslo		406641	374919	7,80%

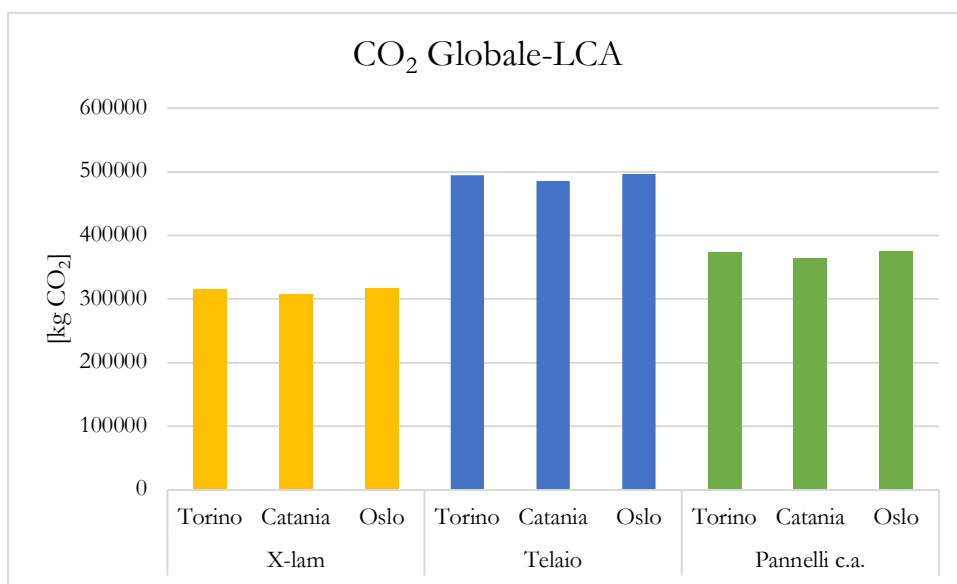


Grafico 9.3-CO₂ Globale-LCA, Edificio plurifamiliare

Le emissioni dell'edificio a telaio sono passate dal 64% al 56% in più rispetto all'edificio in x-lam, con una riduzione della differenza di oltre 20000 kg. Le emissioni dell'edificio a pannelli in c.a. sono passate dal 26% al 18% in più rispetto all'edificio in x-lam, con una riduzione simile a quella dell'edificio a telaio. Si può concludere che il beneficio, in termini di impatti ambientali, apportato dal fenomeno della carbonatazione del calcestruzzo ha ridotto il divario fra gli edifici in c.a. e gli edifici in legno.

9.4. Prestazioni Energetiche

Come si è potuto notare, l'ubicazione degli edifici nelle differenti località non ha comportato significative differenze in termini di emissioni.

È proprio grazie all'analisi dei fabbisogni energetici che possiamo rendere tale confronto significativo.

In Tabella 9.4 e in Grafico 9.4, Grafico 9.5 sono riportati i fabbisogni energetici rispettivamente per riscaldamento e raffrescamento:

Tabella 9.4-Fabbisogni energetici annuali, Edificio plurifamiliare

Fabbisogni energetici annuali				
Località	Edificio	Fabbisogno Riscaldamento	Fabbisogno Raffrescamento	Fabbisogno Annuo
		[kWh/anno]	[kWh/anno]	[kWh/anno]
Torino	X-lam	28038,61	8966,33	37004,94
	Telaio	26702,86	7056,72	33759,58
	Pannelli	26373,48	6376,20	32749,68
Catania	X-lam	10944,14	23748,88	34693,02
	Telaio	10098,92	22120,99	32219,91
	Pannelli	9879,33	21167,24	31046,57
Oslo	X-lam	43947,91	6632,53	50580,44
	Telaio	41931,44	4823,99	46755,43
	Pannelli	41727,80	4435,16	46162,96

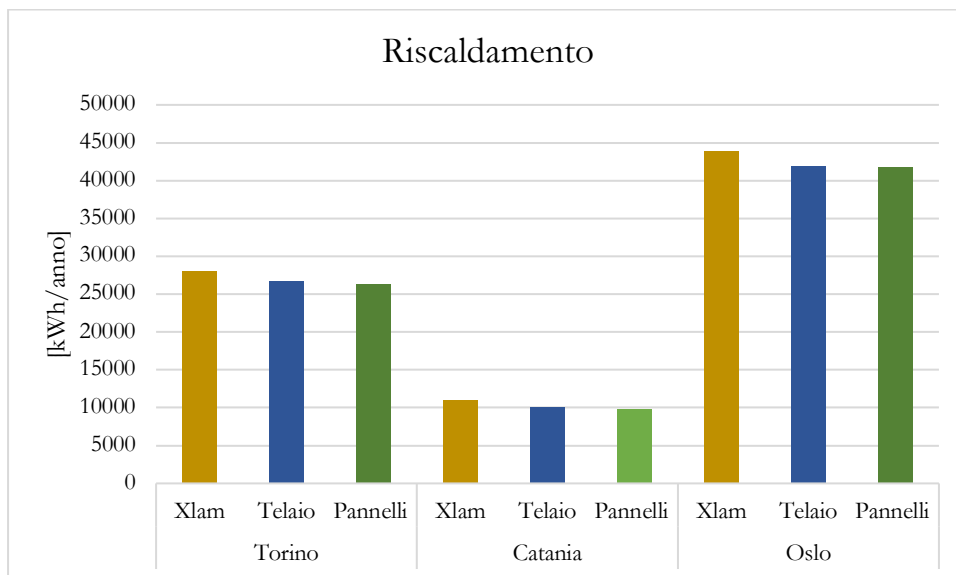


Grafico 9.4-Fabbisogno di riscaldamento annuo, Edificio plurifamiliare

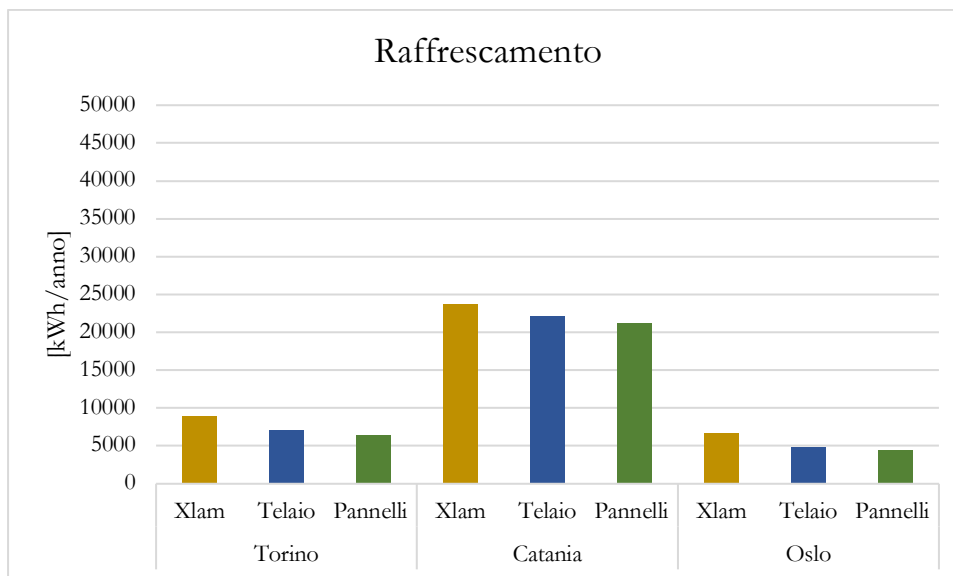


Grafico 9.5-Fabbisogno di raffrescamento annuo, Edificio pluripiano

Delle differenze fra le prestazioni delle differenti tecnologie se ne è parlato al paragrafo 8.4. Soffermiamoci ora sull'impatto dovuto alle differenti località. Come ci si aspettava, le differenze ottenute dall'aver collocato gli edifici nelle tre differenti località sono significative. A Catania il fabbisogno di riscaldamento è il 25% di quello di Oslo e il fabbisogno di raffrescamento è 4 volte.

Proseguendo il confronto, sempre a Catania il fabbisogno di riscaldamento è il 39% di quello di Torino e quello di raffrescamento è meno di 3 volte.

È particolare il risultato che otteniamo confrontando i fabbisogni tra Torino e Oslo.

Oslo ha un fabbisogno di riscaldamento superiore a Torino del 56%. Ci aspettiamo che quello di raffrescamento, come avvenuto per gli altri confronti sia il medesimo a parti invertite. Ciò non accade in quanto il fabbisogno di Oslo è solamente il 25 % in meno.

Ciò è spiegato dal fatto che a Oslo nel periodo estivo il sole tramonta solo per alcune ore. Per tale motivo, gli apporti solari sull'edificio sono molto superiori a quelli che si hanno a Torino. Va detto che una strategia di ventilazione più efficiente avrebbe portato un altro tipo di risultato. La temperatura dell'aria esterna a Oslo è quasi sempre al di sotto della temperatura di set-point di raffrescamento e una ventilazione controllata avrebbe annullato, o comunque ridotto notevolmente il fabbisogno di raffrescamento.

9.5. CO₂ Globale-Uso

Il calcolo relativo alle emissioni dovute all'uso del fabbricato è quello riportato al paragrafo 2.1. Tuttavia, per facilitare la lettura dell'elaborato si ripropongono in Tabella 9.5 e in Grafico 9.6 i risultati ottenuti:

Tabella 9.5-CO₂ Globale-Uso, Edificio plurifamiliare

CO ₂ Globale-Uso						
Località	Edificio	Fabbisogno Annuo	Vita utile	Fabbisogno Totale	Fattore di conversione	Emissioni Totali
		kWh/anno	Anni	kWh	kg CO ₂ / kWh	kg CO ₂
Torino	X-lam	37004,94	50	1850246,99	0,43	795606,21
	Telaio	33759,58	50	1687979,20	0,43	725831,06
	Pannelli	32749,68	50	1637484,09	0,43	704118,16
Catania	X-lam	34693,02	50	1734651,06	0,43	745899,95
	Telaio	32219,91	50	1610995,47	0,43	692728,05
	Pannelli	31046,57	50	1552328,69	0,43	667501,33
Oslo	X-lam	50580,44	50	2529022,00	0,43	1087479,46
	Telaio	46755,43	50	2337771,71	0,43	1005241,83
	Pannelli	46162,96	50	2308148,18	0,43	992503,72

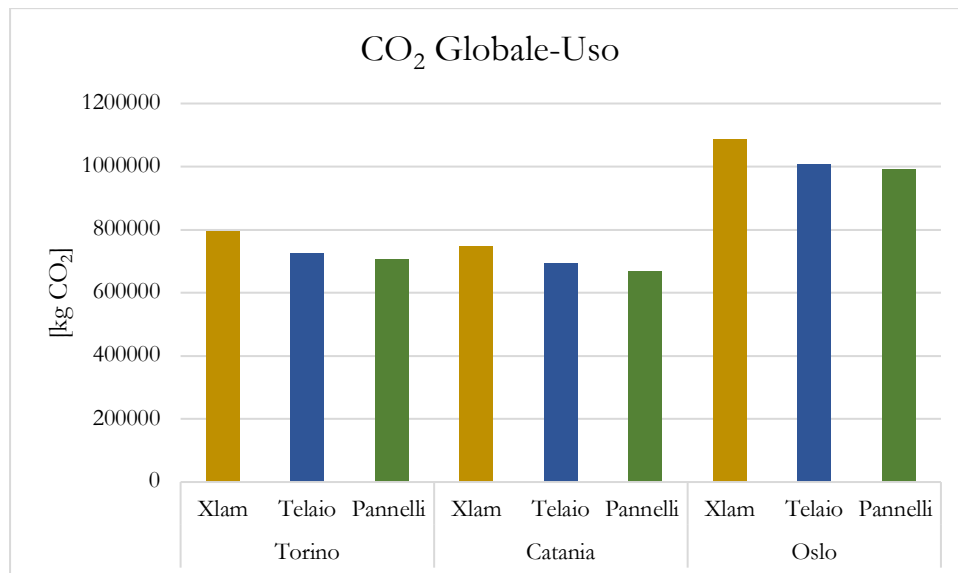


Grafico 9.6-CO₂ Globale-Uso-Edificio Plurifamiliare

9.6. Analisi globale

Trovato anche l'impatto dovuto ai fabbisogni energetici è possibile calcolare l'impatto globale per ciascun edificio.

Esso è dato dalla somma tra gli impatti legati all'edificio e quelli legati all'uso.

Si riportano in Tabella 9.6 e in Grafico 9.7 i risultati ottenuti:

Tabella 9.6-CO₂ Totale, Edificio plurifamiliare

CO ₂ Totale				
Località	Edificio	Emissioni globali LCA	Emissioni globali Uso	Emissioni Totali
		[kg CO ₂]	[kg CO ₂]	[kg CO ₂]
Torino	X-lam	315525,71	795606,21	1111131,91
	Telaio	494725,48	725831,06	1220556,53
	Pannelli	372883,98	704118,16	1077002,14
Catania	X-lam	306813,73	745899,95	1052713,69
	Telaio	485483,49	692728,05	1178211,55
	Pannelli	363762,31	667501,33	1031263,64
Oslo	X-lam	317380,20	1087479,46	1404859,66
	Telaio	496758,90	1005241,83	1502000,74
	Pannelli	374919,00	992503,72	1367422,71

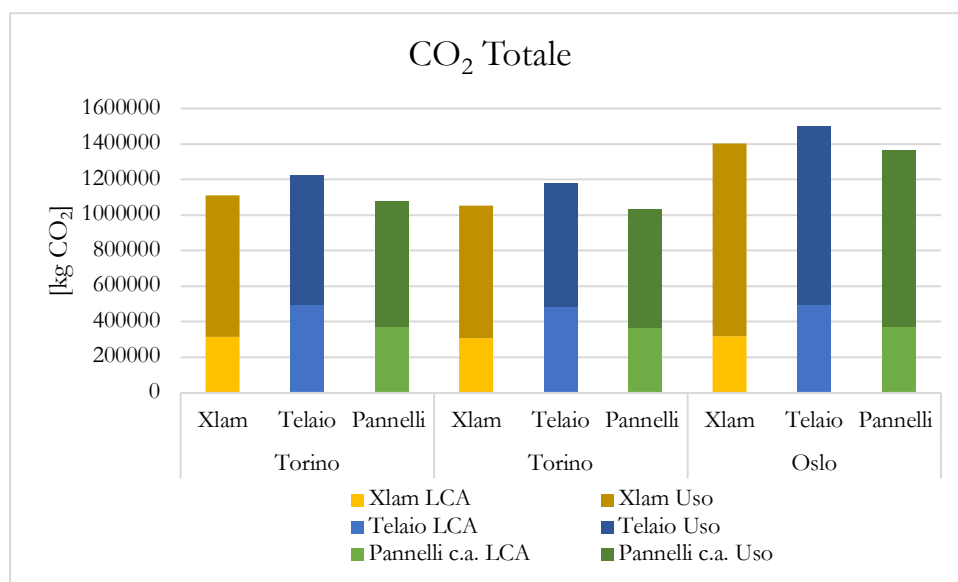


Grafico 9.7-CO₂ Totale, Edificio plurifamiliare

Come si può notare, il risparmio energetico ottenuto dall'edificio a pannelli prefabbricati, rapportato sull'intero periodo di vita utile dell'edificio, fa sì che questo sia il meno invasivo dei tre in termini di emissioni. Indipendentemente dall'ubicazione, risulta essere il più sostenibile.

È bene precisare che molti altri fattori possono influire sulla scelta di una tecnologia rispetto a un'altra. Le emissioni legate all'uso dell'edificio incidono più di quelle legate alla costruzione stessa, pertanto occorre valutare attentamente il tipo di impianto da predisporre all'interno della costruzione in funzione anche della località.

10. Confronto con l'edificio unifamiliare

Per ultimo, ci si pone l'obiettivo di mettere a confronto i risultati ottenuti sull'edificio unifamiliare analizzato in un altro lavoro di ricerca, con quelli ottenuti nel presente lavoro.

Essendo due edifici su scala differente, per rendere plausibile il confronto si è scelto di normalizzare tutti i risultati ottenuti rispetto al dato più significativo dell'edificio: la superficie lorda di pavimento (SLP).

“La somma di tutte le superfici coperte, [...], ai vari piani o interpiani, sia fuori terra che in sottosuolo” [22].

La superficie coperta è “L'area della proiezione sul piano orizzontale del massimo ingombro delle parti edificate fuori terra, delimitate dalle superfici esterne delle pareti perimetrali, o in loro mancanza dai piani verticali circoscritti alle strutture portanti” [23].

È l'indice più diffuso nel settore immobiliare edilizio.

Il filo logico seguito per il confronto segue quello del precedente capitolo.



Figura 10.1-a sinistra: Edificio plurifamiliare, a destra: Edificio unifamiliare

10.1. L'edificio unifamiliare

Prima di procedere con il confronto, è bene spendere alcune parole sull'edificio unifamiliare. Tale edificio è costituito di tre piani fuori terra con una superficie lorda di pavimento complessiva pari a 120 m². Il piano terra è adibito ad autorimessa e presenta una scala di accesso interna per i piani superiori. Al piano superiore è collocata la zona giorno e all'ultimo piano è collocata la zona notte.

I risultati ottenuti su questo edificio e che verranno riportati nei prossimi paragrafi sono stati oggetto di un lavoro di ricerca parallelo a quello trattato in queste pagine.

10.2. CO₂ Emessa

Il primo dato che occorre analizzare è quello riguardante l'anidride carbonica emessa durante il periodo di costruzione e del fine vita di ciascun edificio.

In Tabella 10.1 e in Grafico 10.1 sono riportati i risultati ottenuti:

Tabella 10.1-CO₂ Emessa-LCA, Confronto

CO ₂ Emessa-LCA			
Tipologia	Città	Co2 Emessa [kg/m ²]	
		Plurifamiliare	Unifamiliare
X-lam	Torino	269,07	189,67
	Catania	261,81	186,22
	Oslo	270,62	193,67
Telaio	Torino	442,38	321,64
	Catania	434,68	312,64
	Oslo	444,07	325,98
Pannelli	Torino	337,17	240,04
	Catania	329,57	233,73
	Oslo	338,87	244,01

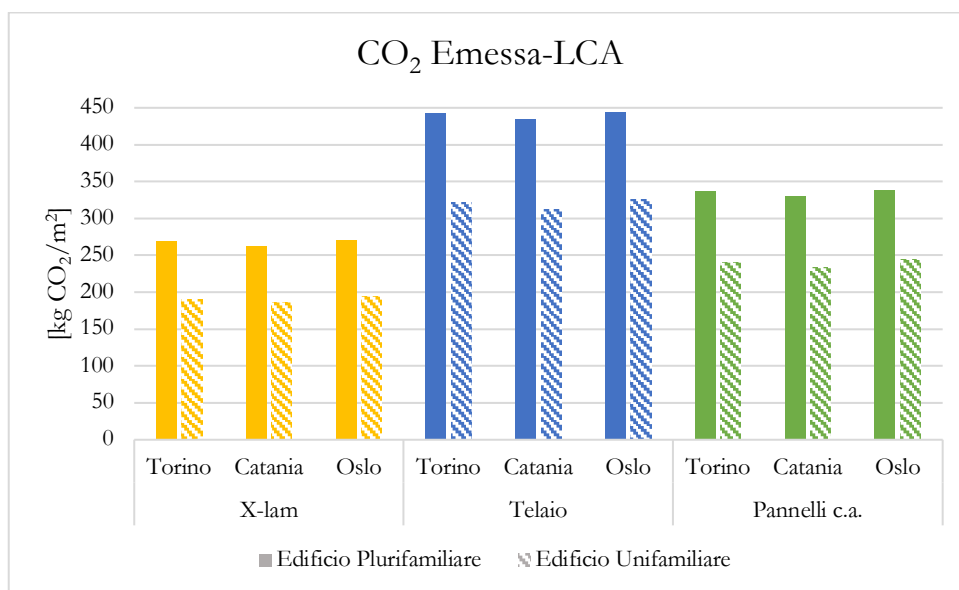


Grafico 10.1-CO₂ Emessa-LCA, Confronto

Come si può notare, gli impatti dell'edificio unifamiliare sono inferiori rispetto a quello plurifamiliare. Questo risultato può essere spiegato pensando all'incidenza delle strutture sulla costruzione. Un edificio di piccole dimensioni avrà strutture più contenute e di minore importanza e ciò influirà sulla differenza di emissioni.

10.3. CO₂ Assorbita

Il secondo risultato che viene analizzato è quello che riguarda la capacità delle strutture a base cementizia di assorbire anidride carbonica. In Tabella 10.2 e in Grafico 10.2 sono riportati i risultati ottenuti:

Tabella 10.2-CO₂ Assorbita, Confronto

CO ₂ Assorbita			
Tipologia	Città	Co2 Assorbita [kg/m ²]	
		Plurifamiliare	Unifamiliare
X-lam	Torino	6,14	7,79
	Catania		
	Oslo		
Telaio	Torino	30,11	18,26
	Catania		
	Oslo		
Pannelli	Torino	26,43	13,9
	Catania		
	Oslo		

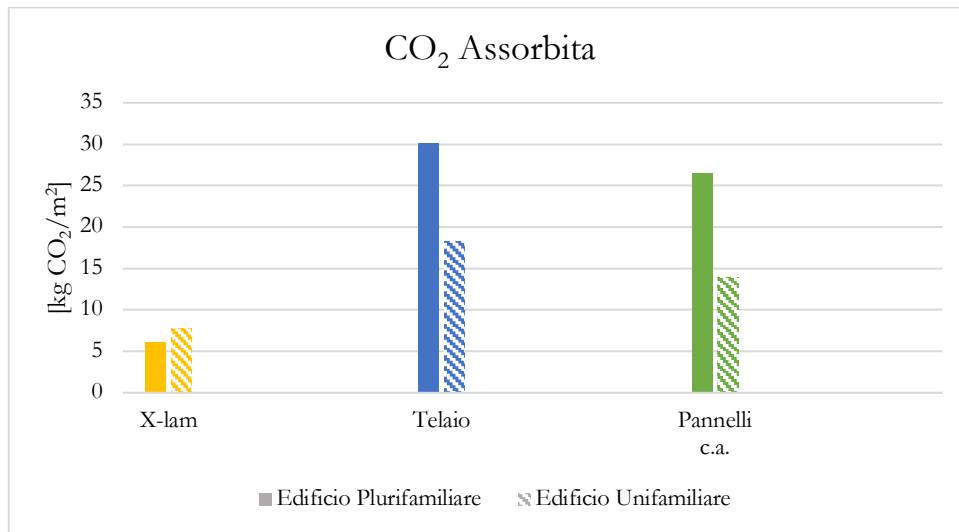


Grafico 10.2-CO₂ Assorbita, Confronto

Dal confronto emerge come gli edifici plurifamiliari costituiti prevalentemente da materiali a base cementizia assorbano più anidride carbonica in relazione alla superficie lorda di pavimento rispetto a quelli unifamiliari. Ciò è dettato dal fatto che il termine di normalizzazione usato (SLP) non può essere direttamente correlato con la capacità di un edificio di assorbire anidride carbonica. Essa infatti dipende dalla superficie esposta e influisce sul risultato il numero di aperture presenti nelle pareti. Tale dato non può essere posto in relazione fra i due edifici e il risultato ottenuto è influenzato anche da questo.

10.4. CO₂ globale-LCA

Come già fatto per il solo edificio plurifamiliare, il risultato successivo è frutto della somma dei risultati precedenti. Otteniamo quindi le emissioni di CO₂ globali legate al ciclo vita dell'edificio. In Tabella 10.3 e in Grafico 10.3 sono riportati i risultati ottenuti:

Tabella 10.3-CO₂ Globale-LCA, Confronto

CO ₂ Globale-LCA			
Tipologia	Città	Co2 Globale [kg/m ²]	
		Plurifamiliare	Unifamiliare
X-lam	Torino	262,94	181,88
	Catania	255,68	178,43
	Oslo	264,48	185,88
Telaio	Torino	412,27	303,38
	Catania	404,57	294,38
	Oslo	413,97	307,72
Pannelli	Torino	310,74	226,14
	Catania	303,14	219,83
	Oslo	312,43	230,11

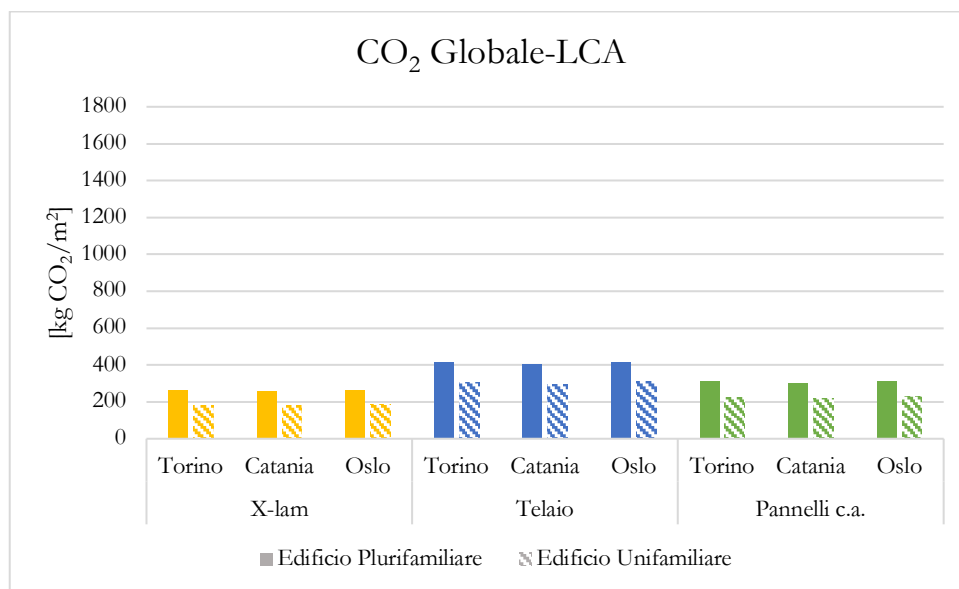


Grafico 10.3-CO₂ Globale-LCA, Confronto

I risultati ottenuti seguono l'andamento di quelli ottenuti considerando la sola CO₂ emessa. I valori di anidride carbonica assorbita incidono tra il 4 e il 6 % per l'edificio unifamiliare e tra il 2 e l'8% per quello plurifamiliare. Sarà interessante capire se, come già avvenuto analizzando il solo edificio plurifamiliare l'uso dell'edificio stravolgerà o meno i risultati fin qui ottenuti.

10.5. Prestazioni Energetiche

Si procede quindi al confronto fra le prestazioni energetiche dei differenti edifici.

Il calcolo energetico effettuato sull'edificio unifamiliare è stato effettuato mantenendo invariate le assunzioni riportate al paragrafo 8.1. L'unica differenza tra i due edifici sta nella scelta degli isolanti dei componenti opachi. Nell'edificio plurifamiliare si è scelto di differenziare gli stati di isolante rispettando quanto previsto dalla normativa vigente in merito ai requisiti di trasmittanza dei singoli componenti. Nell'edificio unifamiliare le stratigrafie dei componenti sono state differenziate seguendo altre strade.

Vi sono inoltre zone termiche differenti ma ciò è dettato dal fatto che i due edifici siano stati concepiti in maniera differente. I vani scala per l'edificio pluripiano sono stati considerati non riscaldati mentre quello dell'altro edificio, essendo una scala interna, è stata considerata come riscaldata e ha influito anche sul calcolo dell'SLP.

Queste differenze evidenziate possono aver influito sui risultati ottenuti, ma non in maniera determinante. Si riportano in Tabella 10.4 e in Grafico 10.4, Grafico 10.5 i risultati ottenuti:

Tabella 10.4-Fabbisogni energetici annuali, Confronto

Fabbisogni energetici annuali							
Località	Edificio	Fabbisogno Riscaldamento [kWh/m ² anno]		Fabbisogno Riscaldamento [kWh/m ² anno]		Fabbisogno Annuo [kWh/m ² anno]	
		Plurif.	Unif.	Plurif.	Unif.	Plurif.	Unif.
Torino	X-lam	23,37	38,89	7,47	16,25	30,84	55,15
	Telaio	22,25	38,89	5,88	12,87	28,13	51,77
	Pannelli	21,98	36,45	5,31	13,44	27,29	49,89
Catania	X-lam	9,12	14,43	19,79	31,11	28,91	45,54
	Telaio	8,42	15,35	18,43	26,26	26,85	41,61
	Pannelli	8,23	14,20	17,64	26,54	25,87	40,73
Oslo	X-lam	36,62	57,81	5,53	12,87	42,15	70,68
	Telaio	34,94	58,26	4,02	7,95	38,96	66,20
	Pannelli	34,77	55,16	3,70	8,58	38,47	63,74

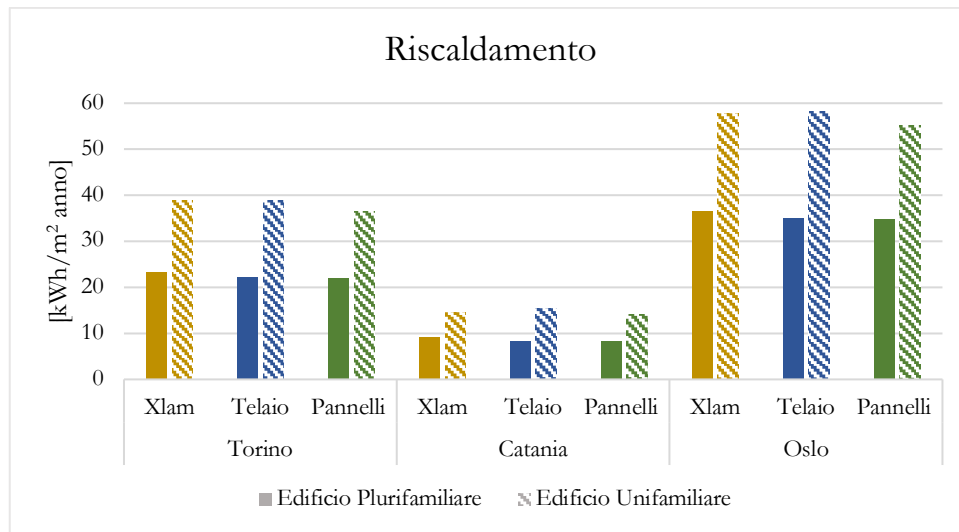


Grafico 10.4-Fabbisogno di riscaldamento annuo, Confronto

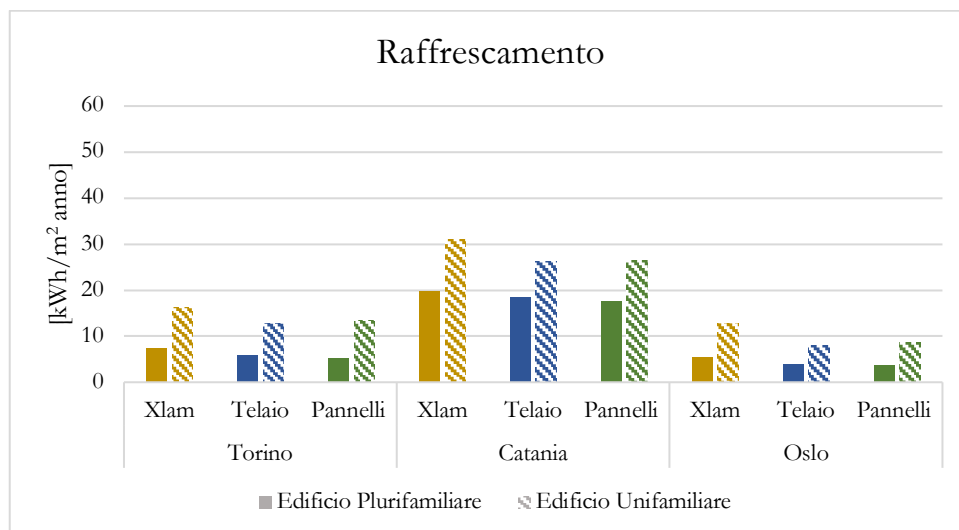


Grafico 10.5-Fabbisogno di raffrescamento annuo, Confronto

Si può notare dai risultati come i fabbisogni energetici dell'edificio unifamiliare siano maggiori rispetto a quello plurifamiliare.

Una risposta può esser data analizzando la geometria dei due edifici. L'edificio singolo ha una superficie in pianta molto ridotta e ciascuna parete confina con l'esterno. L'edificio plurifamiliare, presenta molte pareti adiacenti con zone alla stessa temperatura o non riscaldate. Le dispersioni attraverso queste pareti sono minori rispetto a quelle dell'edificio unifamiliare. Tali dispersioni diventano apporti gratuiti per le zone termiche adiacenti portando il bilancio complessivo dell'edificio a zero. Se avessimo analizzato la singola unità immobiliare presente all'interno del condominio si sarebbero ottenuti risultati simili a quelli dell'edificio singolo.

10.6. CO₂ Globale-Uso

Il risultato immediato che possiamo ottenere dal confronto fra le prestazioni energetiche è quello delle emissioni globali dovute all'uso dell'edificio.

La vita utile dei due edifici è la stessa e il fattore di conversione utilizzato è il medesimo ipotizzando le stesse condizioni al contorno per entrambi gli edifici.

Si riportano in Tabella 10.5 e in Grafico 10.6 i risultati ottenuti:

Tabella 10.5-CO₂ Globale-Uso, Confronto

CO ₂ Globale-USO					
Località	Edificio	Fabbisogno Totale [kWh/m ²]		Emissioni Totali [kg CO ₂ /m ²]	
		Plurif.	Unif.	Plurif.	Unif.
Torino	X-lam	1541,87	2757,33	663,01	1185,65
	Telaio	1406,65	2588,26	604,86	1112,95
	Pannelli	1364,57	2494,31	586,77	1072,55
Catania	X-lam	1445,54	2276,91	621,58	979,07
	Telaio	1342,50	2080,29	577,27	894,53
	Pannelli	1293,61	2036,74	556,25	875,80
Oslo	X-lam	2107,52	3533,84	906,23	1519,55
	Telaio	1948,14	3310,21	837,70	1423,39
	Pannelli	1923,46	3187,11	827,09	1370,46

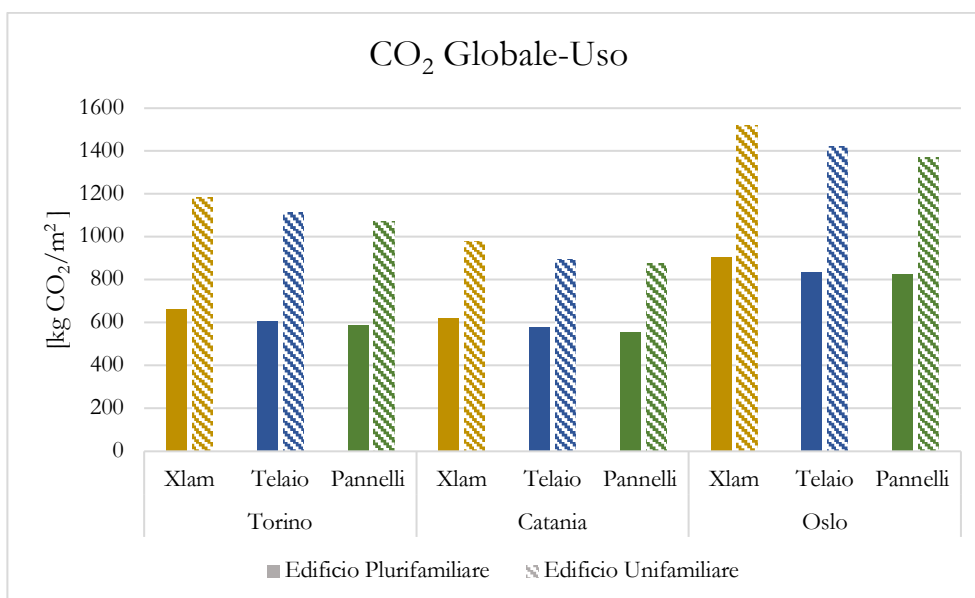


Grafico 10.6-CO₂ Globale-Uso, Confronto

I risultati ricalcano quanto già detto per le prestazioni energetiche.

10.7. Analisi globale

Per ultimo, si confrontano i risultati ottenuti sommando le emissioni dovute al ciclo di vita del fabbricato con quelle dovute all'uso dello stesso.

Si riportano in Tabella 10.6 e in Grafico 10.7 i risultati ottenuti:

Tabella 10.6-CO₂ Totale, Confronto

CO ₂ Totale							
Località	Edificio	CO ₂ Globale-LCA		CO ₂ Globale-Uso		CO ₂ Totale	
		[kg CO ₂ /m ²]		[kg CO ₂ /m ²]		[kg CO ₂ /m ²]	
		Plurif.	Unif.	Plurif.	Unif.	Plurif.	Unif.
Torino	X-lam	262,94	181,88	663,01	1185,65	925,94	1367,53
	Telaio	255,68	178,43	604,86	1112,95	860,54	1291,38
	Pannelli	264,48	185,88	586,77	1072,55	851,25	1258,43
Catania	X-lam	412,27	303,38	621,58	979,07	1033,85	1282,45
	Telaio	404,57	294,38	577,27	894,53	981,84	1188,91
	Pannelli	413,97	307,72	556,25	875,80	970,22	1183,52
Oslo	X-lam	310,74	226,14	906,23	1519,55	1216,97	1745,69
	Telaio	303,14	219,83	837,70	1423,39	1140,84	1643,22
	Pannelli	312,43	230,11	827,09	1370,46	1139,52	1600,57

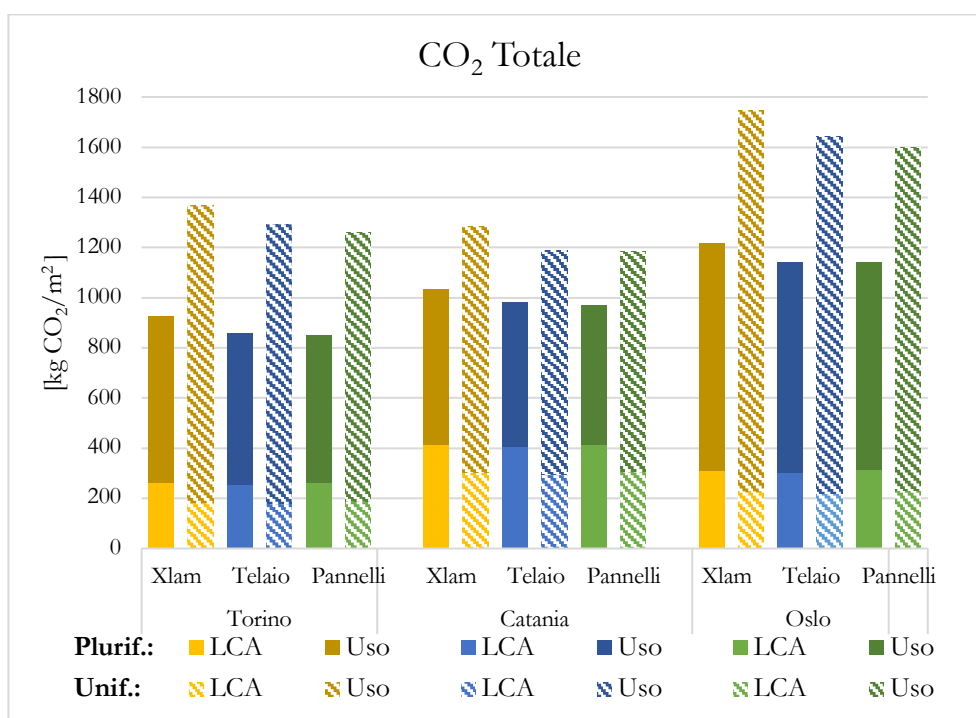


Grafico 10.7-CO₂ Totale, Confronto

Anche in questo caso, le emissioni dovute all'uso del fabbricato incidono maggiormente rispetto a quelle legate al ciclo vita. Per questo motivo, anche questo confronto è stato stravolto. Le emissioni di un edificio unifamiliare legate ai soli materiali risultano inferiori a quelle dell'edificio plurifamiliare ma, prendendo in considerazione l'uso del fabbricato, le emissioni complessive risulteranno più alte per l'edificio unifamiliare.

11. Conclusioni e sviluppi futuri

Ci si era posti l'obiettivo di rispondere alle seguenti domande:

- In che misura la sostenibilità di una costruzione è influenzata dalle tecniche costruttive e dalla sua ubicazione?
- Quali sono i risultati ottenuti dalla valutazione del ciclo di vita (LCA) quando vengono presi in considerazione solo i materiali?
- Come sono influenzati i risultati dall'uso dell'edificio?

E non c'è conclusione migliore di poter dare una risposta ad ognuna delle precedenti domande grazie al lavoro svolto.

Si è visto come le tecniche costruttive influenzino notevolmente la sostenibilità di una costruzione riuscendo quasi a dimezzare le emissioni. Tuttavia, l'ubicazione in differenti località ha prodotto pressoché i medesimi risultati.

È emerso come i materiali con maggiore impatto siano quelli utilizzati per la realizzazione delle strutture e la valutazione sull'incidenza delle emissioni dei materiali effettuata può essere un valido strumento da prendere in considerazione alla base di una progettazione.

Se i risultati ottenuti dall'analisi dei materiali aveva delineato un modello più sostenibile rispetto agli altri, la valutazione dell'uso dell'edificio ha rimescolato le carte in tavola e livellato i risultati.

Da quanto emerso nel presente lavoro, combinando le valutazioni legate ai materiali e all'uso l'edificio più sostenibile risulta essere quello in grande scala (edificio plurifamiliare) costruito con la tecnologia dei pannelli prefabbricati in c.a.

Tuttavia, non si può giungere a una verità assoluta, ma è necessario approfondire ulteriormente tale lavoro in funzione di ciò che si vuole andare a realizzare. Uno sviluppo interessante potrebbe essere quello di rimuovere via via le assunzioni fatte, giungendo così a una verità assoluta. Tale verità sarà limitata all'edificio analizzato ma suscettibile di variazioni per qualunque altro edificio. Tali affermazioni sono frutto del confronto fra gli edifici in scala differente.

12. Riferimenti

- [1] <http://www.piccoarchitetti.it/projects/borgo-dei-lavandai/>.
- [2] http://www.piccoarchitetti.it/wp-content/uploads/2016/01/BORG_O DEI LAVANDAI_Es2.jpg.
- [3] D.M. 26 giugno 2015, Appendice A, Allegato 1, Capitolo 3.
<http://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2015/07/15/162/so/39/sg/pdf>.
- [4] Norme Tecniche per le Costruzioni, 2018, *Par. 2.5.1*.
- [5] Norme Tecniche per le Costruzioni, 2018, *Par. 3.2*.
- [6] CDM DOLMEN e Omnia IS s.r.l, "*Manuale pilastri*".
- [7] <http://www.alveox.it/schede-tecniche/solaio-prefabbricato-continuita-20cm.html>.
- [8] <http://www.cmcduemuntozero.com/sistemi-strutturali/>.
- [9] UNI-EN-ISO 14040: 2006, "*Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*".
- [10] UNI-EN-ISO 14040: 2006, "*Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*". *Par. 5.1, Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione*.
- [11] UNI-EN-ISO 14040: 2006, "*Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*". *Par. 5.2 Analisi d'inventario del ciclo di vita*.
- [12] UNI-EN-ISO 14040: 2006, "*Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*". *Par. 5.3, Valutazione dell'impatto del ciclo di vita*.
- [13] UNI-EN-ISO 14040: 2006, "*Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*". *Par. 5.4, Interpretazione del ciclo di vita*.
- [14] BS EN 15978: 2011, "*Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*".
- [15] BS EN 15084: 2012, "*Sustainability of construction works -Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*".
- [16] Gervasio H., Dimova S. (2018). "*Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*", JRC technical Report.
- [17] UNI-EN-ISO 14044: 2006, "*Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida*".

- [18] <http://www.openlca.org>.
- [19] BS EN 16757: 2017, "*Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product Category. Rules for concrete and concrete elements*", Annex BB.
- [20] <https://designbuilder.co.uk/>.
- [21] Department for Environment, Food and Rural Affairs. Annex A: protocols for energy-related CO₂ emissions. UKETS(01)05rev2. "Guidelines for the Measurement and Reporting of Emissions by Direct Participants in the UK Emission trading Scheme. 2003, pp.19-27.
- [22] PRG Torino, 2006, "Norme Urbanistico Edilizie di Attuazione". *Par.* 2.11.
- [23] PRG Torino, 2006, "Norme Urbanistico Edilizie di Attuazione". *Par.* 2.12.

Indice delle figure

Figura 2.1-Borgo dei lavandai, vista [2].....	3
Figura 2.2-Pianta piano tipo	3
Figura 3.1--Edificio in x-lam	6
Figura 3.2-Muri esterni Me2-Edificio in x-lam.....	7
Figura 3.3-Muri interni Mi1-Edificio in x-lam.....	8
Figura 3.4-Muri interni Mi2-Edificio in x-lam.....	9
Figura 3.5-Solaio interno Si1-Edificio in x-lam	10
Figura 3.6-Solaio interno Si2-Edificio in x-lam	11
Figura 3.7-Solaio interno Si3-Edificio in x-lam	12
Figura 3.8-Solaio esterno Se1-Edificio in x-lam	13
Figura 3.9-Solaio esterno Se2-Edificio in x-lam	14
Figura 3.10-Solaio esterno Se3-Edificio in x-lam.....	15
Figura 4.1-Muri esterni Me1-Edificio a telaio.....	18
Figura 4.2-Muri esterni Me2-Edificio a telaio.....	19
Figura 4.3-Muri interni Mi1-Edificio a telaio.....	20
Figura 4.4-Solaio interno Si1-Edificio a telaio	21
Figura 4.5-Solaio interno Si2-Edificio a telaio	22
Figura 4.6-Solaio interno Si3-Edificio a telaio	23
Figura 4.7-Solaio esterno Se1-Edificio a telaio	24
Figura 4.8-Solaio esterno Se2-Edificio a telaio	25
Figura 4.9-Solaio esterno Se3-Edificio a telaio	26
Figura 4.10-Modello FEM, vista assonometrica-Edificio a telaio	27
Figura 4.11-Estratto Tabella 3.1.II NTC 2018- Sovraccarichi per le diverse categorie d'uso	29
Figura 4.12-Dati di input e Output Modulo VENTO-CDM DOLMEN	30
Figura 4.13-Finestra di input e output NEVE-CDM DOLMEN.....	31
Figura 4.14-Dati di input e output Analisi simica-CDM DOLMEN	32
Figura 4.15-Pressioni sul terreno-Edificio a telaio.....	33
Figura 4.16-Sollecitazioni Mz agenti sulle aste-Edificio a telaio	34
Figura 4.17-Sforzo Normale N agente sulle aste-Edificio a telaio	34
Figura 4.18-Sollecitazioni agenti su solaio-Edificio a telaio.....	35

Figura 4.19-Carpenteria solaio-Edificio a telaio	36
Figura 4.20-Carpenteria travi di fondazione-Edificio a telaio	37
Figura 4.21-Carpenteria travi di bordo-Edificio a telaio	38
Figura 4.22-Carpenteria travi interne-Edificio a telaio	38
Figura 4.23-Tabella report pilastro-Edificio a telaio	39
Figura 4.24-Carpenteria pilastrata-Edificio a telaio.....	40
Figura 4.25-Carpenteria setti-Edificio a telaio	41
Figura 5.1-Struttura in c.a. gettato in opera-Edificio a pannelli	43
Figura 5.2-Muri esterni Me1-Edificio a pannelli	44
Figura 5.3-Muri esterni Me2-Edificio a pannelli	45
Figura 5.4-Muri interni Mi1-Edificio a pannelli.....	46
Figura 5.5-Muri interni Mi2-Edificio a pannelli.....	47
Figura 5.6-Solaio interno Si1-Edificio a pannelli.....	48
Figura 5.7-Solaio interno Si2-Edificio a pannelli.....	49
Figura 5.8-Solaio interno Si3-Edificio a pannelli.....	50
Figura 5.9-Solaio esterno Se1-Edificio a pannelli.....	51
Figura 5.10-Solaio esterno Se2-Edificio a pannelli	52
Figura 5.11-Solaio esterno Se3-Edificio a pannelli	53
Figura 5.12-Modello 3D-Edificio a pannelli	54
Figura 5.13-Collegamento delle pareti con staffe fittizie-Edificio a pannelli.....	55
Figura 5.14-Pressioni sul terreno-Edificio a pannelli.....	57
Figura 5.15-Sollecitazioni Mz agenti sulle aste-Edificio a pannelli.....	57
Figura 5.16-Sforzo normale N-Edificio a pannelli.....	57
Figura 5.17-Scheda tecnica solaio Alveox [7].....	58
Figura 5.18-Carpenteria travi di fondazione-Edificio a pannelli.....	59
Figura 5.19-Carpenteria travi-Edificio a pannelli	59
Figura 5.20-Carpenteria pilastri-Edificio a pannelli	60
Figura 5.21-Sollecitazioni gusci-Edificio a pannelli	61
Figura 6.1-Fasi di un LCA [9].....	63
Figura 6.2-Moduli del ciclo vita [15].....	65
Figura 6.3-Computo travi di fondazione-Edificio a pannelli, output CDM DOLMEN.....	70
Figura 7.1-Ciclo della CO ₂ nel cemento e calcestruzzo [19].....	83
Figura 7.2-Assorbimento della CO ₂ dalla carbonatazione del calcestruzzo [19]	84

Figura 7.3-Estratto Tabella BB.1 EN 16757, Fattore k per il calcolo della quantità di carbonatazione per differenti classi di resistenza e per condizioni di esposizione differenti [19]	85
Figura 8.1-Modello a blocchi, Design Builder	93
Figura 8.2-Zone termiche piano tipo, Design Builder	94
Figura 8.3-Schermature solari, Design Builder	96
Figura 8.4-Opzioni di calcolo, Design Builder	100
Figura 8.5-Output simulazione annuale, Edificio a telaio-Torino, Design Builder	101
Figura 10.1-a sinistra: Edificio plurifamiliare, a destra: Edificio unifamiliare	117

Indice delle tabelle

Tabella 2.1-Classificazione zone climatiche	4
Tabella 2.2-Trasmittanze minime edificio di riferimento.....	4
Tabella 3.1-Muri esterni Me1-Edificio in x-lam	6
Tabella 3.2-Muri esterni Me2-Edificio in x-lam	7
Tabella 3.3-Muri interni Mi1-Edificio in x-lam	8
Tabella 3.4-Muri interni Mi2-Edificio in x-lam	9
Tabella 3.5-Solaio interno Si1-Edificio in x-lam.....	10
Tabella 3.6-Solaio interno Si2-Edificio in x-lam.....	11
Tabella 3.7-Solaio interno Si3-Edificio in x-lam.....	12
Tabella 3.8-Solaio esterno Se1-Edificio in x-lam	13
Tabella 3.9-Solaio esterno Se2-Edificio in x-lam	14
Tabella 3.10-Solaio esterno Se3-Edificio in x-lam	15
Tabella 4.1-Muri esterni Me1-Edificio a telaio	18
Tabella 4.2 Muri esterni Me2-Edificio a telaio.....	19
Tabella 4.3-Muri interni Mi1-Edificio a telaio	20
Tabella 4.4-Solaio interno Si1-Edificio a telaio	21
Tabella 4.5-Solaio interno Si2-Edificio a telaio	22
Tabella 4.6-Solaio interno Si3-Edificio a telaio	23
Tabella 4.7-Solaio esterno Se1-Edificio a telaio	24
Tabella 4.8-Solaio esterno Se2-Edificio a telaio	25
Tabella 4.9-Solaio esterno Se3-Edificio a telaio	26
Tabella 5.1-Muri esterni Me1-Edificio a pannelli.....	44
Tabella 5.2-Muri esterni Me2-Edificio a pannelli.....	45
Tabella 5.3-Muri interni Mi1-Edificio a pannelli.....	46
Tabella 5.4-Muri interni Mi2-Edificio a pannelli.....	47
Tabella 5.5-Solaio interno Si1-Edificio a pannelli	48
Tabella 5.6-Solaio interno Si2-Edificio a pannelli	49
Tabella 5.7-Solaio interno Si3-Edificio a pannelli	50
Tabella 5.8-Solaio esterno Se1-Edificio a pannelli.....	51
Tabella 5.9-Solaio esterno Se2-Edificio a pannelli	52
Tabella 5.10-Solaio esterno Se3-Edificio a pannelli.....	53

Tabella 6.1-Emissioni CO ₂ unitarie	68
Tabella 6.2-Esempio calcolo quantità dei materiali componente Me1	69
Tabella 6.3-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio in x-lam, Torino	73
Tabella 6.4-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio in x-lam, Catania	74
Tabella 6.5-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio in x-lam, Oslo.....	75
Tabella 6.6-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio a telaio, Torino	76
Tabella 6.7-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio a telaio, Catania	77
Tabella 6.8-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio a telaio, Oslo.....	78
Tabella 6.9-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio a pannelli, Torino.....	79
Tabella 6.10-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio a pannelli, Catania.....	80
Tabella 6.11-Emissioni CO ₂ -LCA, Edificio a pannelli, Oslo	81
Tabella 7.1-CO ₂ assorbita, Edificio in x-lam.....	88
Tabella 7.2CO ₂ assorbita, Edificio a telaio	89
Tabella 7.3-CO ₂ assorbita, Edificio a pannelli	90
Tabella 8.1-Trasmittanza termica del fabbricato, Torino.....	95
Tabella 8.2-Trasmittanza termica del fabbricato, Catania.....	95
Tabella 8.3-Trasmittanza termica del fabbricato, Oslo	95
Tabella 8.4-Portata di ventilazione, Torino	99
Tabella 8.5-Portata di ventilazione, Catania	99
Tabella 8.6-Portata di ventilazione, Oslo.....	99
Tabella 8.7-Fabbisogno per riscaldamento annuo	102
Tabella 8.8-Fabbisogno per raffrescamento annuo	102
Tabella 8.9-Fabbisogno energetico periodo di vita utile dell'edificio, Emissioni di CO ₂ totali	104
Tabella 9.1-CO ₂ emessa-LCA, Edificio plurifamiliare.....	107
Tabella 9.2-CO ₂ assorbita, Edificio plurifamiliare.....	109
Tabella 9.3-CO ₂ Globale-LCA, Edificio plurifamiliare.....	110
Tabella 9.4-Fabbisogni energetici annuali, Edificio plurifamiliare.....	111
Tabella 9.5-CO ₂ Globale-Uso, Edificio plurifamiliare.....	113
Tabella 9.6-CO ₂ Totale, Edificio plurifamiliare.....	114
Tabella 10.1-CO ₂ Emessa-LCA, Confronto	118
Tabella 10.2-CO ₂ Assorbita, Confronto	119
Tabella 10.3-CO ₂ Globale-LCA, Confronto	120

Tabella 10.4-Fabbisogni energetici annuali, Confronto	121
Tabella 10.5-CO ₂ Globale-Uso, Confronto	123
Tabella 10.6-CO ₂ Totale, Confronto.....	124

Indice dei grafici

Grafico 6.1-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio in x-lam, Torino.....	73
Grafico 6.2-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio in x-lam, Catania.....	74
Grafico 6.3-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio in x-lam, Oslo.....	75
Grafico 6.4-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a telaio, Torino.....	76
Grafico 6.5-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a telaio, Catania.....	77
Grafico 6.6-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a telaio, Oslo.....	78
Grafico 6.7-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a pannelli, Torino	79
Grafico 6.8-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a pannelli, Catania.....	80
Grafico 6.9-Incidenza dei materiali sulle emissioni-Edificio a pannelli, Oslo	81
Grafico 7.1-Incidenza degli elementi a base cementizia sulla CO ₂ assorbita-Edificio in x-lam	88
Grafico 7.2-Incidenza degli elementi a base cementizia sulla CO ₂ assorbita-Edificio a telaio	89
Grafico 7.3-Incidenza degli elementi a base cementizia sulla CO ₂ assorbita-Edificio a pannelli	90
Grafico 8.1-Temperature esterne, settimana di progetto-Torino	97
Grafico 8.2-Temperature esterne, settimana di progetto-Catania	98
Grafico 8.3-Temperature esterne, settimana di progetto-Oslo.....	98
Grafico 8.4-Fabbisogno energetico annuale, Torino.....	102
Grafico 8.5-Fabbisogno energetico annuale, Catania	103
Grafico 8.6-Fabbisogno energetico annuale, Oslo	103
Grafico 9.1-CO ₂ Emessa, Edificio plurifamiliare.....	107
Grafico 9.2-CO ₂ assorbita, Edificio plurifamiliare.....	109
Grafico 9.3-CO ₂ Globale-LCA, Edificio plurifamiliare	110
Grafico 9.4-Fabbisogno di riscaldamento annuo, Edificio plurifamiliare	111
Grafico 9.5-Fabbisogno di raffrescamento annuo, Edificio pluripiano	112
Grafico 9.6-CO ₂ Globale-Uso-Edificio Plurifamiliare	113
Grafico 9.7-CO ₂ Totale, Edificio plurifamiliare	114
Grafico 10.1-CO ₂ Emessa-LCA, Confronto	118
Grafico 10.2-CO ₂ Assorbita, Confronto	119
Grafico 10.3-CO ₂ Globale-LCA, Confronto	120

Grafico 10.4-Fabbisogno di riscaldamento annuo, Confronto.....	122
Grafico 10.5-Fabbisogno di raffrescamento annuo, Confronto.....	122
Grafico 10.6-CO ₂ Globale-Uso, Confronto	123
Grafico 10.7-CO ₂ Totale, Confronto.....	124