



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Individuazione dei sistemi di integrazione
impiantistica, studio degli ancoraggi, analisi
finale di integrazione delle soluzioni
standardizzate

F. Baldi, A. Gugliandolo, M. Malvoni, M. Ricci, M.-A. Segreto, A. Tallini, E. Genova, C.
Romeo, A. Marzo, I. Rosselli, F. Saitta, C. Triepi

Report RdS/PTR2020/070

INDIVIDUAZIONE DEI SISTEMI DI INTEGRAZIONE IMPIANTISTICA, STUDIO DEGLI ANCORAGGI, ANALISI FINALE DI INTEGRAZIONE DELLE SOLUZIONI STANDARDIZZATE

Autori: F. Baldi, M. Malvoni, M. Ricci, M.-A. Segreto, A. Tallini, E. Genova, C. Romeo, A. Marzo, I. Rosselli, F. Saitta, C. Tripepi (ENEA)

Con la collaborazione di: M. Benedetti, A. Ciappa, A. Di Micco, I. Falcone, A. Gugliandolo, E. Monno, P. Sdringola, T. Susca, S. Tamburrino (ENEA)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: N. 1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 - Efficienza energetica e dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 2 - Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito

Linea di attività: LA2.2 - Individuazione dei sistemi impiantistici integrati in facciata, studio ed analisi degli ancoraggi ed analisi finale delle soluzioni standardizzate a catalogo

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti

Responsabile del Work package: Maria-Anna Segreto

Si ringrazia per il supporto alle attività di test su tavole vibranti le aziende ETANCO, FLORIM, FRIULSIDER, INPEK, IRONDONO il cui aiuto ha visto la partecipazione di aziende diverse animate da uno stesso grande obiettivo dando un enorme valore aggiunto al progetto.

Indice

SOMMARIO.....	13
SEZIONE I – INTEGRAZIONE IMPIANTI AL MODULO	14
1 INTRODUZIONE.....	14
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	15
2.1 ANALISI DEGLI IMPIANTI ESISTENTI	15
2.1.1 <i>Scopo e obiettivi</i>	15
2.1.2 <i>Consistenza del parco immobiliare residenziale italiano</i>	15
2.1.2.1 Edifici in generale.....	15
2.1.2.2 Condomini	16
2.1.3 <i>Stato dell’arte dei sistemi di climatizzazione invernale negli edifici residenziali</i>	17
2.1.4 <i>Gli impianti di riscaldamento a servizio degli edifici residenziali</i>	17
2.1.5 <i>Impianti autonomi</i>	17
2.1.6 <i>Impianti centralizzati</i>	18
2.1.6.1 Impianti centralizzati a distribuzione verticale	18
2.1.6.2 Impianti centralizzati a distribuzione orizzontale	18
2.1.7 <i>Cenni metodologici allo studio delle tipologie impiantistiche degli edifici residenziali</i>	19
2.1.8 <i>Descrizione delle tipologie impiantistiche</i>	20
2.1.8.1 Sottosistema di generazione	20
2.1.8.2 Sottosistema di distribuzione	21
2.1.8.3 Rendimenti di distribuzione.....	25
2.1.8.4 Sottosistema di emissione	26
2.1.8.5 Sottosistema di accumulo.....	27
2.1.8.6 Sottosistema ausiliari elettrici	27
2.1.9 <i>Definizione di “impianto ricorrente”</i>	28
2.1.9.1 Individuazione di configurazioni impiantistiche ricorrenti.....	31
2.2 ANALISI DI LETTERATURA SU INTEGRAZIONE IMPIANTI IN SISTEMI DI ISOLAMENTO MODULARI PREFABBRICATI	33
2.2.1 <i>Scopo e obiettivi</i>	33
2.2.2 <i>Analisi del contesto di riferimento europeo</i>	33
2.2.3 <i>La deep renovation nei progetti finanziati dall’UE: stato dell’arte</i>	34
2.2.4 <i>Retrofit modulare di facciata</i>	36
2.2.5 <i>Tipologie di sistemi modulari</i>	38
2.2.5.1 Sistema modulare <i>layer-based</i>	38
2.2.5.2 Sistema modulare <i>frame-based</i>	39
2.2.5.3 Sistema modulare misto	40
2.2.6 <i>Pannelli a parete prefabbricati: classificazione e aspetti funzionali</i>	40
2.2.7 <i>Sistemi modulari multifunzionali prefabbricati PnP per il retrofit di facciata: mercato di riferimento</i>	42
2.2.8 <i>Retrofit modulari con pannelli prefabbricati per isolamento termico senza integrazione impiantistica</i>	44
2.2.9 <i>Retrofit modulari di facciata con pannelli prefabbricati ad elevata integrazione impiantistica</i>	46
2.2.9.1 Aspetti di integrazione impiantistica in sistemi modulari multifunzionali prefabbricati	46
2.2.9.1.1 Pannello modulare MORE-CONNECT.....	46
2.2.9.1.2 Pannello modulare BERTIM	50
2.2.9.1.3 Pannello modulare iNSPIRE	55
2.2.9.1.4 Pannello modulare 4RinEU	56
2.2.9.1.5 Pannello modulare E2VENT	57
2.2.9.1.6 Sistemi modulari di facciata metal-frame PnP.....	59
2.2.10 <i>Retrofit per l’adeguamento energetico e sismico</i>	62
2.2.11 <i>Interventi di ristrutturazione energetica e sismica tradizionali e innovativi</i>	62
2.2.11.1 Soluzioni tradizionali di riqualificazione sismica	62
2.2.11.2 Interventi integrati di riqualificazione energetica e sismica	63
2.2.11.2.1 Pannelli prefabbricati in CLT in sostituzione delle pareti esterne di tamponamento	64
2.2.11.2.2 Pannelli prefabbricati in CLT sovrapposti alle pareti esterne di tamponamento	64
2.2.12 <i>Esempi di sistemi commerciali per l’adeguamento energetico e sismico</i>	66
2.3 PROPOSTE DI SOLUZIONI IMPIANTISTICHE	69

2.3.1	<i>Sottosistema di distribuzione: impianti ad aria e ad acqua</i>	69
2.3.1.1	Impianti ad aria.....	69
2.3.1.2	Impianti ad acqua.....	69
2.3.2	<i>Sottosistema di generazione: caldaie a condensazione, pompe di calore e sistemi ibridi</i>	70
2.3.2.1	Caldaia a condensazione.....	70
2.3.2.2	Pompa di calore.....	70
2.3.2.3	Sistema ibrido.....	71
2.3.3	<i>Soluzioni impiantistiche individuate</i>	71
2.3.3.1	Impianto ad acqua con radiatori.....	71
2.3.3.2	Impianto ad acqua con ventilconvettori.....	72
2.3.3.3	Impianti ad aria.....	75
3	CONCLUSIONI.....	79
	SEZIONE II – ANCORAGGI.....	80
4	INTRODUZIONE.....	80
4.1	INQUADRAMENTO DELL'ATTIVITÀ.....	80
4.2	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	81
5	PROGETTAZIONE DEL MANUFATTO IN C.A.....	83
5.1	PRE-DIMENSIONAMENTO.....	83
5.2	DEFINIZIONE DEL CARICO SISMICO.....	85
5.3	ANALISI NUMERICHE PRELIMINARI.....	89
5.3.1	<i>Telaio monopiano</i>	90
5.3.2	<i>Telaio multipiano</i>	97
5.3.3	<i>Verifica a sollevamento sul modello preliminare</i>	103
5.4	ANALISI NUMERICHE.....	109
5.4.1	<i>Calcolo del peso proprio e analisi del carico da sollevamento</i>	109
5.4.2	<i>Verifiche strutturali nei confronti del sollevamento</i>	110
5.4.3	<i>Analisi dinamiche lineari e non lineari</i>	117
5.4.4	<i>Struttura con travi in spessore di solaio</i>	124
5.5	CONFIGURAZIONE FINALE DEL PROVINO.....	137
6	DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI SUPPORTO.....	138
6.1	CARICHI E IPOTESI DI CALCOLO.....	138
6.2	ANALISI E VERIFICHE.....	139
6.2.1	<i>Caso 1.a</i>	139
6.2.2	<i>Caso 1.b</i>	145
6.2.3	<i>Caso 1.c</i>	151
6.2.4	<i>Caso 2.a</i>	154
6.2.5	<i>Caso 2.b</i>	160
6.2.6	<i>Caso 2.c</i>	165
6.2.7	<i>Caso 2.d</i>	170
6.2.8	<i>Caso 2.e</i>	176
6.3	CRITERI PER LA SCELTA DEL SISTEMA DI SUPPORTO.....	182
7	REALIZZAZIONE DEL PROVINO.....	184
7.1	COSTRUZIONE DEL PROVINO.....	184
7.2	ALLESTIMENTO DEL PROVINO.....	189
7.3	ALLESTIMENTO DEL PROVINO: PARETE OVEST, CERAMICA CON SISTEMA A GRAFFE.....	193
7.4	ALLESTIMENTO DEL PROVINO: PARETE EST, HPL CON SISTEMA A VISTA CON RIVETTO.....	197
7.5	ALLESTIMENTO DEL PROVINO: PARETE NORD, CERAMICA CON SISTEMA A SCOMPARSA S1 MAGNUM SU SISTEMA FLOOR TO FLOOR 201.....	
7.6	CONFIGURAZIONE FINALE DEL PROVINO.....	208
8	PROVE SPERIMENTALI SU TAVOLA VIBRANTE.....	211
8.1	CARATTERISTICHE DELLE TAVOLE VIBRANTI DI ENEA.....	211

8.2	DESCRIZIONE DELLE PROVE SU TAVOLA VIBRANTE	213
8.3	STRUMENTAZIONE DI MISURA E MONITORAGGIO DEL PROVINO.....	216
8.4	RISULTATI DELLE PROVE	222
9	CONCLUSIONI.....	228
SEZIONE III – CATALOGO.....		231
10	INTRODUZIONE	231
11	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	231
11.1	ORGANIZZAZIONE DELL'ATTIVITÀ	231
11.1.1	<i>Solution Matrix</i>	232
11.1.2	<i>Input Matrix</i>	232
11.1.3	<i>Selection Matrix</i>	237
11.1.4	<i>Evaluation Matrix</i>	238
12	CONCLUSIONI.....	239
13	ADDENDUM ALLE ATTIVITÀ 2019: SIMULAZIONE IN REGIME DINAMICO DI UN EDIFICIO UNIFAMILIARE RICORRENTE DEL PARCO EDILIZIO ITALIANO.....	240
13.1	INTRODUZIONE	240
13.2	MODELLO EDILIZIO	241
13.2.1	<i>Caratteristiche dimensionali e distributive</i>	241
13.2.2	<i>Caratteristiche costruttive</i>	242
13.2.3	<i>Impianti di climatizzazione, ventilazione e produzione dell'acqua calda sanitaria</i> <i>Impianti di climatizzazione, ventilazione e produzione dell'acqua calda sanitaria</i>	242
13.2.2.1	Ventilazione	243
13.2.2.2	Acqua calda sanitaria.....	243
13.2.2.3	Climatizzazione invernale	243
13.2.2.4	Climatizzazione estiva.....	244
13.3	CONCLUSIONI: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.....	244
14	ATTIVITA' DI DISSEMINAZIONE	250
15	ALLEGATI.....	251
15.1	ABACO DEGLI ANCORAGGI	252
	# AN1	252
	# AN2	253
15.2	ABACO DEGLI IMPIANTI.....	254
	# IMP1	255
	# IMP2	256
	# IMP3	257
	# IMP4	258
	# IMP5	259
	# IMP6	260
15.3	CATALOGO SOLUZIONI STANDARDIZZATE.....	261
	# S1	263
	# S2	264
	# S3	265
	# S4	266
	# S5	267
	# S6	268
	# S7	269
	# S8	270
	# S9	271
	# S10	272
	# S11	273
	# S12	274

# S13	275
# S14	276
# S15	277
# S16	278
# S17	279
# S18	280
# S19	281
# S20	282
# S21	283
16	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... 284
17	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI..... 288

Indice delle figure

Figura 1.	Suddivisione degli edifici residenziali in Italia [fonte: ISTAT, elaborazione ENEA].....	16
Figura 2.	Matrice tipologia edilizia nazionale italiana [fonte: TABULA].....	20
Figura 3.	Schema di impianto centralizzato a colonne montanti con distribuzione “a cascata” (o “a pioggia”).....	22
Figura 4.	Schema di impianto centralizzato a colonne montanti con distribuzione “a sorgente” o “dal basso”	22
Figura 5.	Schema di circuito con ritorno diretto.....	23
Figura 6.	Schema di circuito con ritorno inverso	23
Figura 7.	Distribuzione monotubo	23
Figura 8.	Circuito monotubo a sviluppo verticale, con distribuzione a pioggia e ritorno diretto	24
Figura 9.	Circuito monotubo a sviluppo verticale, con distribuzione a pioggia e ritorno inverso	24
Figura 10.	Rete di distribuzione orizzontale a collettore complanare.....	24
Figura 11.	Modello di struttura dell’involucro edilizio.....	36
Figura 12.	Modello funzionale di retrofit modulare di facciata	37
Figura 13.	Prototipo di struttura modulare per il retrofit di facciata	37
Figura 14.	Progetto ADAPTIWALL – Pannello multifunzionale	39
Figura 15.	Design concept dei pannelli prefabbricati a telaio	39
Figura 16.	Progetto BRESAER – Schema di pannello prefabbricato modulare con sistema misto	40
Figura 17.	Tavola sinottica di classificazione dei PEWPS [fonte: Lopes et al., 2018]	41
Figura 18.	Classificazione dei PEWPS secondo criteri funzionali e costruttivi [Lopes et al., 2018].....	42
Figura 19.	Progetto EASEE – Retrofit di edificio dimostrativo ALER a Milano	45
Figura 20.	Progetto EASEE – Ancoraggio dei pannelli in facciata [fonte: Halfen].....	45
Figura 21.	Progetto MORE-CONNECT – Schema del modulo standard prefabbricato	47
Figura 22.	Progetto MORE-CONNECT – Integrazione di condotti di ventilazione nei pannelli.....	47
Figura 23.	Progetto MORE-CONNECT – Unità dimostrative di soluzioni integrate di condotti di ventilazione.....	48
Figura 24.	Progetto MORE-CONNECT – Connettori a bussola con elemento di tenuta	48
Figura 25.	Progetto MORE-CONNECT – Connettori a pressione per il collegamento tra pannelli	49
Figura 26.	Progetto MORE-CONNECT – Connettori pressati per il collegamento dentro i pannelli	49
Figura 27.	Progetto MORE-CONNECT – Test di installazione del pannello standard in laboratorio.....	49
Figura 28.	Progetto BERTIM – Schema del modulo standard.....	51
Figura 29.	Progetto BERTIM – Schema dei moduli con installazioni ad incasso	51
Figura 30.	Progetto BERTIM – Render dello schema di connessione tra moduli con installazioni.....	52
Figura 31.	Progetto BERTIM – Installazione dei moduli in facciata	52
Figura 32.	Progetto BERTIM – Integrazione di tubi e condotti nel modulo	52
Figura 33.	Progetto BERTIM – Giunto di accoppiamento di condotti di distribuzione.....	53
Figura 34.	Progetto BERTIM – Flussi termici e perdite termiche del modulo di installazione.....	54
Figura 35.	Progetto iNSPIRE – Schema del pannello (a sinistra) e integrazione impiantistica (a destra)	55
Figura 36.	Progetto 4RinEU – Prospetto, rendering e sezione del modulo prefabbricato	56
Figura 37.	Progetto 4RinEU – Edificio dimostrativo a Oslo.....	56
Figura 38.	Progetto E2VENT – Schema del sistema e relativi componenti.....	57
Figura 39.	Progetto E2VENT – Schema con unità SMHRU (a sinistra) e sistema di accumulo termico LHTES	57
Figura 40.	Progetto E2VENT – Sistema di ancoraggio delle unità impiantistiche nel prototipo.....	58

Figura 41. Progetto E2VENT – Distribuzione unità LHTES e SMHRU per due morfologie di facciata	59
Figura 42. Progetto P2ENDURE – Sequenza di installazione di tubi e cavi e chiusura del vano di installazione	59
Figura 43. Progetto P2ENDURE – Retrofit con pannelli multifunzionali e canalizzazioni per tubi e condotti	60
Figura 44. Progetto P2ENDURE – Vano per integrato tubi HVAC, condotti e canali di distribuzione nel modulo	60
Figura 45. Progetto PLUG-N-HARVEST – Schema del sistema modulare metal-frame	61
Figura 46. Progetto PLUG-N-HARVEST – Struttura di base degli elementi di facciata.....	61
Figura 47. Retrofitting con pannelli CLT, anche in versione con facciata ventilata [fonte: Margani et al., 2020]	64
Figura 48. Schema del <i>damper</i> [fonte: Margani et al., 2020]	65
Figura 49. Render del sistema costruttivo Rhinoceros-Wall.....	66
Figura 50. Render del sistema Rhinoceros-Steel	66
Figura 51. Schema di ancoraggio ai muri in corrispondenza del cordolo (sistema Rhinoceros-Wall)	67
Figura 52. Ancoraggio in fondazione (sistema Rhinoceros-Wall - Wood Beton).....	68
Figura 53. Cunicolo passaggio impianti e modulo di tamponamento rimovibile (sistema Rhinoceros-Wall)	68
Figura 54. Schema impianto 1	72
Figura 55. Schema impianto 2	73
Figura 56. Schema impianto 3	74
Figura 57. Schema impianto 4	75
Figura 58. Schema impianto 5	76
Figura 59. Schematizzazione impianto 6	77
Figura 60. Il <i>Green Deal</i> europeo [1].....	80
Figura 61. Consumi finali energia per settore per l’anno 2018 (fonte: Eurostat).....	80
Figura 62. Geometria del provino.....	83
Figura 63. Elementi di primo dimensionamento: a) Carpenteria solaio; b) Distinta armatura travi e pilastri	84
Figura 64. Elementi definitivi: a) Carpenteria solaio; b) Distinta armatura travi e pilastri	85
Figura 65. Esecutivi travi di base del provino: a) Configurazione in pianta; b) Distinta delle armature.....	85
Figura 66. Localizzazione della stazione accelerometrica.....	86
Figura 67. Componenti del terremoto di Amatrice: (a) Est; (b) Nord; (c) Verticale.....	86
Figura 68. Spettri di risposta delle componenti orizzontali.....	87
Figura 69. Spettri elastici di normativa: (a) componente orizzontale e (b) componente verticale	87
Figura 70. Ordinata spettrale media in funzione di α	88
Figura 71. Accelerazioni del sisma scalate per ciascun stato limite.....	88
Figura 72. Confronto tra gli spettri degli accelerogrammi scalati e quelli di normativa per: SLO; SLD; SLV; SLC.....	89
Figura 73. Convenzione di segno sulle forze sull’elemento.....	90
Figura 74. Modello ad elementi finiti del telaio monopiano	91
Figura 75. Sforzo normale dovuto ai carichi statici.....	91
Figura 76. Momento flettente dovuto ai carichi statici	92
Figura 77. Taglio dovuto ai carichi statici.....	92
Figura 78. Primi tre modi di vibrare della struttura a telaio monopiano.....	93
Figura 79. Componenti orizzontali del sisma registrato alla stazione di Amatrice (m/s^2): (a) Est; (b) Nord.....	94
Figura 80. Modello isteretico con incrudimento cinematico.....	94
Figura 81. Spostamento massimo ottenuto dalle analisi dinamiche	95
Figura 82. Sforzi normali nei pilastri durante il sisma	95
Figura 83. Tagli nei pilastri durante il sisma.....	96
Figura 84. Momenti flettenti nei pilastri durante il sisma	96
Figura 85. Stato delle cerniere plastiche a fine sisma (Rotazione R_y).....	97
Figura 86. Telaio <i>shear-type</i>	97
Figura 87. Telaio multipiano	98
Figura 88. Deformate modali dei primi tre modi naturali di vibrare	99
Figura 89. Sforzi normali nei pilastri del torrino (kN)	100
Figura 90. Tagli nei pilastri del torrino (kN)	100
Figura 91. Momenti nei pilastri del torrino (in figura ordinata in kNm).....	101
Figura 92. Stato delle cerniere plastiche a fine sisma: rotazione R_y	101
Figura 93. Stato delle cerniere plastiche a fine sisma: rotazione R_z	102
Figura 94. Accelerazione assoluta al piano III (m/s^2)	102
Figura 95. Modello completo di cordolo di base vincolato verticalmente in 4 punti.....	103
Figura 96. Diagramma dei momenti flettenti (Combinazione 1, kNm).....	104

Figura 97. Diagramma dei tagli (Combinazione 1, kN)	104
Figura 98. Diagramma degli sforzi normali (Combinazione 1, kN).....	105
Figura 99. Diagramma degli sforzi normali nei tiranti (Combinazione 1, kN).....	105
Figura 100. Diagramma dei momenti flettenti (Combinazione 2, kNm).....	106
Figura 101. Diagramma dei tagli (Combinazione 2, kN)	106
Figura 102. Diagramma degli sforzi normali (Combinazione 2, kN).....	107
Figura 103. Diagramma degli sforzi normali nei tiranti (Combinazione 2, kN).....	107
Figura 104. Equilibrio	108
Figura 105. Diagramma dei momenti flettenti (Combinazione 1)	110
Figura 106. Diagramma dei tagli (Combinazione 1).....	111
Figura 107. Diagramma degli sforzi normali (Combinazione 1).....	111
Figura 108. Diagramma degli sforzi normali nei tiranti (Combinazione 1)	112
Figura 109. Diagramma dei momenti flettenti (Combinazione 2)	112
Figura 110. Diagramma dei tagli (Combinazione 2).....	113
Figura 111. Diagramma degli sforzi normali (Combinazione 2).....	113
Figura 112. Diagramma degli sforzi normali nei tiranti (Combinazione 2)	114
Figura 113. Numerazione degli elementi.....	114
Figura 114. Elemento 19: verifiche strutturali dell'elemento in c.a. nei confronti del carico da sollevamento.....	115
Figura 115. Elemento 30: verifiche strutturali dell'elemento in acciaio nei confronti del carico da sollevamento	116
Figura 116. Modi di vibrare.....	117
Figura 117. Massimo spostamento per accelerogramma non scalato e numerazione nodi.....	119
Figura 118. Massimo spostamento al variare dello stato limite (TR: tempo di ritorno in anni) considerato (mm)	119
Figura 119. Sforzi normali nei pilastri durante il sisma.....	120
Figura 120. Tagli nei pilastri durante il sisma	120
Figura 121. Momenti nei pilastri durante il sisma	121
Figura 122. Sforzi normali nei pilastri per SLO.....	121
Figura 123. Sforzi normali nei pilastri per SLD.....	122
Figura 124. Sforzi normali nei pilastri per SLV	122
Figura 125. Sforzi normali nei pilastri per SLC	122
Per quanto riguarda lo stato delle cerniere plastiche, alla base dei pilastri si supera il secondo limite di snervamento per il terremoto a tutta ampiezza, come mostrato in figura 126	123
Figura 126. Stato delle cerniere plastiche per $t=22.26$ s	123
Figura 127. Numerazione degli elementi.....	123
Figura 128. Curve Rotazione-Momento alla base del pilastro 1.....	124
Figura 129. Struttura con travi in spessore di solaio	124
Figura 130. Massimo spostamento al variare dello stato limite (TR: tempo di ritorno in anni) considerato (mm)	125
Figura 131. Sforzi normali nei pilastri durante il sisma.....	126
Figura 132. Tagli nei pilastri durante il sisma	126
Figura 133. Momenti nei pilastri durante il sisma	127
Figura 134. Sforzi normali nei pilastri per SLO.....	127
Figura 135. Sforzi normali nei pilastri per SLD.....	128
Figura 136. Sforzi normali nei pilastri per SLV	128
Figura 137. Sforzi normali nei pilastri per SLC	129
Figura 138. Stato delle cerniere plastiche sui pilastri a fine sisma	129
Figura 139. Curve Rotazione-Momento alla base di un pilastro.....	130
Figura 140. Massimo spostamento per accelerogramma non scalato e numerazione nodi.....	131
Figura 141. Massimo spostamento al variare dello stato limite considerato (mm)	131
Figura 142. Sforzi normali nei pilastri durante il sisma.....	132
Figura 143. Tagli nei pilastri durante il sisma	132
Figura 144. Momenti nei pilastri durante il sisma	133
Figura 145. Sforzi normali nei pilastri per SLO.....	133
Figura 146. Sforzi normali nei pilastri per SLD.....	134
Figura 147. Sforzi normali nei pilastri per SLV	134
Figura 148. Sforzi normali nei pilastri per SLC	135
Figura 149. Stato delle cerniere plastiche sui pilastri a fine sisma (Sforzo normale)	135
Figura 150. Stato delle cerniere plastiche sui pilastri a fine sisma (Momento).....	136

Figura 151. Curve Rotazione-Momento alla base di un pilastro.....	136
Figura 152. Confronto degli spostamenti massimi per le diverse configurazioni del provino analizzate.....	137
Figura 153. Struttura di supporto dei pannelli di isolamento.....	139
Figura 154. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X.....	140
Figura 155. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y.....	140
Figura 156. Sforzi di taglio massimo e minimo – Combinazione X.....	141
Figura 157. Sforzi di taglio massimo e minimo – Combinazione Y.....	141
Figura 158. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X.....	142
Figura 159. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y.....	142
Figura 160. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	143
Figura 161. Verifiche strutturali per la sezione.....	143
Figura 162. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	144
Figura 163. Verifiche strutturali per la sezione.....	144
Figura 164. Struttura con collegamenti orizzontali.....	145
Figura 165. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X.....	146
Figura 166. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y.....	146
Figura 167. Tagli massimo e minimo – Combinazione X.....	147
Figura 168. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y.....	147
Figura 169. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X.....	148
Figura 170. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y.....	148
Figura 171. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	149
Figura 172. Verifiche strutturali per la sezione.....	149
Figura 173. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	150
Figura 174. Verifiche strutturali per la sezione.....	150
Figura 175. Struttura con collegamenti verticali.....	151
Figura 176. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X.....	151
Figura 177. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y.....	152
Figura 178. Tagli massimo e minimo – Combinazione X.....	152
Figura 179. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y.....	153
Figura 180. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X.....	153
Figura 181. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y.....	154
Figura 182. Struttura di supporto dei pannelli di isolamento.....	154
Figura 183. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X.....	155
Figura 184. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y.....	155
Figura 185. Sforzi di taglio massimo e minimo – Combinazione X.....	156
Figura 186. Sforzi di taglio massimo e minimo – Combinazione Y.....	156
Figura 187. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X.....	157
Figura 188. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y.....	157
Figura 189. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	158
Figura 190. Verifiche strutturali per la sezione.....	158
Figura 191. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	159
Figura 192. Verifiche strutturali per la sezione.....	159
Figura 193. Struttura con collegamenti orizzontali.....	160
Figura 194. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X.....	160
Figura 195. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y.....	161
Figura 196. Tagli massimo e minimo – Combinazione X.....	161
Figura 197. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y.....	162
Figura 198. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X.....	162
Figura 199. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y.....	163
Figura 200. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	163
Figura 201. Verifiche strutturali per la sezione.....	164
Figura 202. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	164
Figura 203. Verifiche strutturali per la sezione.....	165
Figura 204. Struttura con collegamenti orizzontali.....	165
Figura 205. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X e Y.....	166
Figura 206. Tagli massimo e minimo – Combinazione X.....	166

Figura 207. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y.....	167
Figura 208. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X	167
Figura 209. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y	168
Figura 210. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	168
Figura 211. Verifiche strutturali per la sezione.....	169
Figura 212. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	169
Figura 213. Verifiche strutturali per la sezione.....	170
Figura 214. Struttura con collegamenti orizzontali	170
Figura 215. Sforzi normali sotto carichi statici.....	171
Figura 216. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X.....	171
Figura 217. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y	172
Figura 218. Tagli massimo e minimo – Combinazione X.....	172
Figura 219. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y.....	173
Figura 220. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X	173
Figura 221. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y	174
Figura 222. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	174
Figura 223. Verifiche strutturali per la sezione.....	175
Figura 224. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa.....	175
Figura 225. Verifiche strutturali per la sezione.....	176
Figura 226. Struttura con profili verticali a T e dettaglio	177
Figura 227. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X.....	177
Figura 228. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y	178
Figura 229. Tagli massimo e minimo – Combinazione X.....	178
Figura 230. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y.....	179
Figura 231. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X	179
Figura 232. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y	180
Figura 233. Caratteristiche geometriche e verifiche strutturali della sezione a T	181
Figura 234. Realizzazione della trave di fondazione: casseri e ferri di armatura per la trave di fondazione	184
Figura 235. Realizzazione della trave di fondazione: vista dei ferri longitudinali dei pilastri	185
Figura 236. Realizzazione della trave di fondazione: vista dei ferri longitudinali e delle staffe	185
Figura 237. Realizzazione della trave di fondazione: vista del nodo trave-pilastro.....	186
Figura 238. Realizzazione dei pilastri e del solaio: vista dei casseri dei pilastri	186
Figura 239. Realizzazione dei pilastri e del solaio: vista dei casseri della trave in spessore.....	187
Figura 240. Realizzazione dei pilastri e del solaio: vista delle armature del solaio	187
Figura 241. Realizzazione dei pilastri e del solaio: vista delle bare filettate che emergono dal solaio	188
Figura 242. Manufatto in cemento armato	188
Figura 243. Manufatto in cemento armato completo di tamponature in laterizio	189
Figura 244. Vista in pianta del provino: allestimento delle pareti.....	190
Figura 245. Pannello HPL Max Compact Exterior qualità F utilizzato nella parete est [8].....	191
Figura 246. Montaggio dei pannelli in HPL tramite rivetti su una sottostruttura in alluminio [8]	191
Figura 247. Caratteristiche geometriche del tassello pesante FM-753 crack A4 [9]	192
Figura 248. Caratteristiche geometriche della barra filettata utilizzata per il tassello chimico [10]	192
Figura 249. Disegno esecutivo della facciata della parete ovest: ceramica-sistema con graffe.....	193
Figura 250. Disegno esecutivo facciata della parete ovest: dettaglio giunzione profili a T (a) e ad L (b)	193
Figura 251. Parete ovest: viste del sistema di facciata in costruzione	194
Figura 252. Parete ovest: ancoraggio dei profili metallici verticali.....	195
Figura 253. Parete ovest: posa dell'isolante e installazione delle lastre ceramiche di rivestimento	195
Figura 254. Parete ovest: dettaglio del sistema a graffe e posizionamento dei <i>markers</i>	196
Figura 255. Parete ovest: vista della parete finita (a) e dei <i>markers</i> utilizzati per le prove (b)	196
Figura 256. Disegno esecutivo facciata della parete est: HPL-sistema a vista con rivetto	197
Figura 257. Disegno esecutivo facciata della parete est: dettaglio rivettatura profili a T (a) e ad L (b)	198
Figura 258. Parete est: installazione dei profili verticali (a) e vista di dettaglio dei loro ancoraggi (b)	199
Figura 259. Parete est: dettaglio dell'ancoraggio della staffa al c.a. (a) e posa dell'isolante (b).....	200
Figura 260. Parete est: installazione dei pannelli in HPL	200
Figura 261. Rivettatura pannelli HPL: vista da dietro (a) e da davanti (b)	200
Figura 262. Parete est: vista della parete finita (a) e dei <i>markers</i> utilizzati per le prove (b).....	201

Figura 263. Render 3D del sistema FLORIM MAGNUM S1 [11]	202
Figura 264. Disegno esecutivo facciata della parete nord: ceramica-sistema a scomparsa <i>floor to floor</i>	203
Figura 265. Disegno esecutivo facciata della parete nord: dettaglio collegamento al bordo (a) e fra due lastre (b)	204
Figura 266. Parete nord: installazione dei profili verticali (a) e vista di dettaglio dei loro ancoraggi (b)	204
Figura 267. Parete nord: stratigrafia della tamponatura a secco	205
Figura 268. Profili in acciaio formati a freddo CFS A-100	206
Figura 269. Parete nord: montaggio della tamponatura a secco (a) e vista esterna della parete prima della posa del rivestimento ceramico (b)	207
Figura 270. Parete nord: vista della parete finita	207
Figura 271. Vista delle pareti ovest (a destra) e nord (a sinistra) del provino finito	208
Figura 272. Vista delle pareti nord (a destra) ed est (a sinistra) del provino finito	208
Figura 273. Vista dal lato aperto (sud) della tamponatura a secco IRONDON	209
Figura 274. Vista schematica in pianta della hall sismica dell'ENEA (in alto) e due viste panoramiche: all'inaugurazione dell'impianto (in basso a sinistra) e oggi (in basso a destra)	211
Figura 275. Spaccato della tavola vibrante 4 x 4 m della hall sismica dell'ENEA	212
Figura 276. Storia temporale dell'input sismico sintetico denominato "sint"	213
Figura 277. PSD dell'input sismico sintetico denominato "sint"	214
Figura 278. Storia temporale dell'input sismico sintetico denominato "sint_10-40_Hz"	214
Figura 279. PSD dell'input sismico sintetico denominato "sint_10-40_Hz"	215
Figura 280. Storia temporale dell'input di caratterizzazione dinamica denominato "random"	215
Figura 281. PSD dell'input di caratterizzazione dinamica "random"	216
Figura 282. Vista di una telecamera del sistema 3DVision	217
Figura 283. Schema di funzionamento del sistema 3DVision (a) e dettaglio di un <i>marker</i> (b). I <i>markers</i> appaiono luminosi per riflessione del flash fotografico	217
Figura 284. Posizione dei punti di misura sul lato nord: la nomenclatura indica in rosso i <i>markers</i> , in viola gli accelerometri, in blu i pannelli	218
Figura 285. Posizione dei punti di misura sul lato ovest: la nomenclatura indica in rosso i <i>markers</i> , in viola gli accelerometri, in blu i pannelli	218
Figura 286. Posizione dei punti di misura sul lato est: la nomenclatura indica in rosso i <i>markers</i> , in viola gli accelerometri, in blu i pannelli	219
Figura 287. Posizione dei punti di misura sul lato sud: la nomenclatura indica in rosso i <i>markers</i> , in viola gli accelerometri, in blu i pannelli	219
Figura 288. Dettaglio della terna accelerometrica AT	220
Figura 289. Dettaglio del <i>marker</i> EU1 sulla coppia accelerometrica A2	220
Figura 290. Visualizzazione 3D dei <i>markers</i> nell'ambiente di acquisizione ed elaborazione dati	221
Figura 291. Parete ovest, test "sint_0.80g": cedimento del pannello WP2 (a) dettaglio dell'apertura della graffa (b). 224	
Figura 292. Parete ovest, test "sint_1.00g": caduta dei pannelli WP2 e WP5.	224
Figura 293. Parete ovest al termine del test "sint_1.40g"	225
Figura 294. Spostamenti relativi del <i>marker</i> W25 rispetto a WU2 durante il test sint_080g. Il tempo è riportato in campionamenti (frames). La frequenza di campionamento è 200 frame/s	226
Figura 295. Caduta del pannello WP2 sul lato ovest durante il test sint_100g	227
Figura 296: Sottomatrice "Solution Matrix" coincidente con il Catalogo	232
Figura 297: Input Matrix	236
Figura 213: Selection Matrix	238
Figura 299: Evaluation Matrix	239
Figura 300: Programma degli orari di accensione del riscaldamento per zona climatica	243
Figura 214: Distribuzione delle temperature medie annuali sul territorio italiano [fonte: meteobook.it]	245
Figura 302: Diagramma a scatola e baffi dell'EP invernale per l'edificio residenziale unifamiliare,	247
Figura 303: Diagramma a scatola e baffi dell'EP estivo per l'edificio residenziale unifamiliare,	248

Indice delle tabelle

Tabella 1. Edifici residenziali per numero di abitazioni (al 2011)	16
Tabella 2. Parco residenziale italiano ripartito per classe di epoca di costruzione (al 2011)	16
Tabella 3. Sottosistemi di generazione	21
Tabella 4. Rendimenti di distribuzione per vari tipi di sottosistema	25
Tabella 5. Impianti di riscaldamento autonomi [UNI TS 11300-2:2014]	26
Tabella 6. Impianti autonomi a zone, distribuzione orizzontale, montanti verticali* [UNI TS 11300-2:2014]	26
Tabella 7. Impianti centralizzati tradizionali a montanti (comuni a più unità immobiliari), distribuzione orizzontale* [UNI TS 11300-2:2014]	26
Tabella 8. Sottosistemi di emissione	27
Tabella 9. Valori di riferimento per il calcolo delle perdite di energia termica del sistema di accumulo	27
Tabella 10. Sottosistema di accumulo	27
Tabella 11. Tipi di sottosistema ausiliari elettrici	28
Tabella 12. Caratteristiche principali dell' "edificio ricorrente"	29
Tabella 13. Definizione di una tipologia impiantistica ricorrente	30
Tabella 14. Impianto ricorrente – prima configurazione (periodo 1961-1975)	31
Tabella 15. Impianto ricorrente – seconda configurazione (periodo 1976-1980)	32
Tabella 16. Principali tecnologie innovative dei progetti UE in sistemi prefabbricati per <i>deep renovation</i>	35
Tabella 17. Progetto MORE-CONNECT – Stima di riduzione dei tempi di costruzione della soluzione prefabbricata rispetto alle più moderne pratiche di <i>deep renovation</i>	50
Tabella 18. Legenda valutazione impianto	71
Tabella 19. Descrizione e valutazione impianto 1	72
Tabella 20. Descrizione e valutazione impianto 2	73
Tabella 21. Descrizione e valutazione impianto 3	74
Tabella 22. Descrizione e valutazione impianto 4	75
Tabella 23. Descrizione e valutazione impianto 5	76
Tabella 24. Descrizione e valutazione impianto 6	77
Tabella 25. Quadro sinottico delle tipologie impiantistiche individuate	78
Tabella 26. Frequenze e periodi dei primi tre modi naturali di vibrare della struttura a telaio monopiano	93
Tabella 27. Frequenze e periodi dei primi tre modi naturali di vibrare della struttura a telaio multipiano	99
Tabella 28. Analisi dei carichi	109
Tabella 29. Frequenze e periodi	117
Tabella 30. Spostamenti massimi ottenuti dall'analisi dinamica	118
Tabella 31. Spostamenti massimi	125
Tabella 32. Spostamenti massimi	130
Tabella 33. Sistemi di supporto e relativo peso	182
Tabella 34. Materiali impiegati per la realizzazione del provino	184
Tabella 35. Caratteristiche del tassello pesante FM-753 crack A4 [9]	192
Tabella 36. Componenti del sistema FLORIM MAGNUM S1 [11]	202
Tabella 37. Caratteristiche dell'adesivo strutturale SikaTack [12]	203
Tabella 38. Proprietà del pannello in canapa CanaPanel [14]	205
Tabella 39. Proprietà del cementolegno BetonWood [16]	206
Tabella 40. Peso del sistema di supporto	209
Tabella 41. Principali caratteristiche tecniche delle due tavole vibranti della hall sismica dell'ENEA	212
Tabella 42. Sequenza completa dei test eseguiti su tavola vibrante	222
Tabella 43: Classificazione di fasce climatiche per riscaldamento invernale in Italia e corrispondenti periodi di accensione e spegnimento degli impianti di riscaldamento	243
Tabella 44: Lista delle località simulate	246
Tabella 45: Confronto dei valori di EP estivi ed invernali medi per i due tipi di edifici considerati, al variare della zona climatica	248
Tabella 46: Riassunto dei fabbisogni annuali di elettricità e gas naturale per l'edificio residenziale unifamiliare	249

Sommario

Nel 2019 è stato approvato dal Parlamento Europeo il pacchetto legislativo *“Energia pulita per tutti gli europei”* che diventa il punto di riferimento normativo in tema di energia e clima ed è finalizzato al raggiungimento degli obiettivi al 2030 in termini di riduzione delle emissioni. Gli obiettivi al 2030 rappresentano un primo traguardo per raggiungere la neutralità climatica nei Paesi dell’Unione Europea entro il 2050.

In tale contesto, è importante osservare che gli edifici residenziali in Italia rappresentano una parte rilevante dei consumi finali di energia e che sono allo stesso tempo caratterizzati da un elevato potenziale di efficientamento.

Alla luce di questi dati, risulta evidente che al fine di raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni fissati dall’Unione Europea per il 2030, ovvero ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 50-55% rispetto ai livelli del 1990, risulta necessario efficientare il parco edilizio nazionale. L’efficientamento energetico degli edifici esistenti può essere realizzato agendo sia sugli impianti tecnologici, sia sull’involucro edilizio. Il presente progetto di ricerca si focalizza sull’involucro edilizio ed in particolare su soluzioni di facciata modulari idonee ad essere installate su edifici esistenti in tempi rapidi. Le soluzioni di facciata non solo devono garantire adeguate prestazioni energetiche, ma devono anche essere sicure nei confronti dell’azione sismica. L’annualità 2020 ha consentito di effettuare un percorso che, a 360 gradi, ripercorresse uno studio approfondito sia dal punto di vista dell’efficientamento energetico che da quello sismico.

A seguito di attività propedeutiche svolte sia da altri partner di progetto (in particolar modo dall’Università La Sapienza riguardo l’involucro) che da ENEA (in particolare sulla componente impiantistica) sono state individuate diverse soluzioni di facciata e sono state effettuate sia delle simulazioni numeriche (sia termiche che sismiche), sia una campagna di prove sperimentali su tavola vibrante per quanto riguarda la parte sismica. I risultati hanno mostrato ottime prestazioni delle soluzioni di facciata individuate. Tali soluzioni si sono quindi rivelate essere non solo energeticamente efficienti, ma anche sufficientemente sicure nei confronti degli eventi sismici. Queste caratteristiche le rendono particolarmente interessanti per essere utilizzate su larga scala nel panorama edilizio nazionale.

Gli output delle attività svolte da ENEA sono così diventate input per le attività 2020 dell’Università di Messina e per quelle 2021 dell’Università della Tuscia.

Si sottolinea questo aspetto per far emergere quanto l’intero progetto si svolga in continua collaborazione e scambio tra tutti i co-beneficiari con un unico obiettivo che tende sì, a progettare un sistema di facciata energeticamente e sismicamente efficace, ma soprattutto tende a verificare come possa essere migliorata l’efficienza e l’efficacia dell’intero processo produttivo del/i sistema/i studiato/i.

SEZIONE I – INTEGRAZIONE IMPIANTI AL MODULO

1 Introduzione

La tematica principale affrontata nel WP2 riguarda il miglioramento delle prestazioni degli edifici in Italia tramite l'impiego di soluzioni di isolamento termico esterno modulari che permettano di rendere le operazioni di efficientamento al tempo stesso più economiche, rapide ed efficaci.

In questo contesto, una parte delle attività del work package si sono concentrate sulla possibilità di sfruttare l'intervento di riqualificazione dell'involucro allo scopo di attuare anche una riqualificazione degli impianti. Come evidenziato infatti nell'analisi dello stato di fatto estesa al territorio nazionale (si veda la sezione 2.1 di questo report) la situazione degli impianti di riscaldamento presenta ampi margini di miglioramento e si presterebbe a interventi di riqualificazione al pari dell'involucro.

In particolare, la riqualificazione dell'involucro utilizzando moduli prefabbricati, sostenuti da appositi ancoraggi, presenta l'opportunità di una riqualificazione dell'impianto di distribuzione. Come evidenziato in sezione 2.1, infatti, due situazioni ricorrenti sul territorio italiano si prestano in modo particolare ad un intervento di rifacimento dell'impianto di distribuzione:

- Edifici privi di impianto di distribuzione, attualmente serviti da caldaie individuali, che possono essere resi più efficienti passando a un impianto centralizzato ad elevata efficienza;
- Edifici dotati di impianto di distribuzione, ma caratterizzati da impiantistiche datate caratterizzate da problematiche di gestione e da rendimenti di distribuzione ridotti.

In questa prima parte del report viene dunque esplorata la possibilità di sfruttare i lavori di riqualificazione spinta sull'involucro per un aggiornamento degli impianti di riscaldamento, con particolare attenzione agli impianti di distribuzione e alla loro integrazione nei moduli prefabbricati. I risultati di questa attività sono presentati nella sezione 2. Più nello specifico:

- In sezione 2.1 è presentata l'analisi degli impianti esistenti in termini di tipologia, efficienza e diffusione territoriale. Tale analisi ha permesso l'identificazione di un "impianto ricorrente", che fornisce la base di valutazione per quanto riguarda le necessità di intervento, nonché costituisce il termine di paragone per il calcolo dei risparmi;
- In sezione 2.2 è presentata un'analisi della fattibilità tecnica nell'integrazione di nuovi impianti di distribuzione con interventi di riqualificazione spinta dell'involucro edilizio. L'analisi permette quindi di verificare il connubio con le soluzioni di riqualificazione della facciata;
- In sezione 2.3 è presentata la selezione di proposte impiantistiche più promettenti individuate durante lo svolgimento del progetto. Per ciascuna soluzione è presentato lo schema di impianto e un'analisi dell'efficienza del sistema rispetto ad impianti tradizionali, insieme ad una valutazione generale dei vantaggi e degli svantaggi del sistema.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Analisi degli impianti esistenti

2.1.1 Scopo e obiettivi

Gli obiettivi dell'attività svolta in questa sezione del work package hanno riguardato:

- la rassegna approfondita delle tipologie impiantistiche dei sistemi di climatizzazione invernale a servizio degli edifici residenziali in Italia con riferimento al periodo storico relativo all' "edificio ricorrente" definito nelle attività svolte per la linea di attività LA2.1 e utilizzato per la simulazione in regime dinamico di edifici rappresentativi del parco edilizio italiano;
- la definizione delle caratteristiche di un "impianto ricorrente" al fine di caratterizzare completamente il sistema edificio-impianti nelle proprie caratteristiche geometriche, costruttive e impiantistiche in funzione dell'epoca di costruzione e della tipologia edilizia.

È stata effettuata una rassegna della letteratura fondamentale e una ricerca bibliografica. Sono state esaminate le principali caratteristiche tipologiche degli impianti di riscaldamento autonomi e centralizzati a servizio degli edifici. Per il sottosistema di distribuzione, di particolare interesse nell'ambito delle attività di riqualificazione dell'involucro edilizio, si è approfondita la trattazione delle configurazioni impiantistiche riportandone la classificazione secondo le differenti tipologie di circuito.

È stata effettuata un'analisi delle tipologie impiantistiche più diffuse in riferimento alle tecnologie di impianto di riscaldamento tipiche all'interno delle differenti classi di epoca di costruzione, mediante il supporto della letteratura e della normativa tecnica.

Sono stati analizzati i differenti e più diffusi sottosistemi impiantistici (generazione, distribuzione, emissione, accumulo, ausiliari) per ognuno dei quali sono state definite le informazioni relative alle caratteristiche tecniche principali e ai valori orientativi dei parametri prestazionali (rendimento, perdite di energia termica, consumi di energia elettrica, ecc.).

Per i differenti sottosistemi è stato specificato il riferimento a una o più classi dimensionali. Queste informazioni, insieme ai dati tipologici e dimensionali già individuati, consentono di definire completamente il sistema edificio-impianti non solo dal punto di vista della tipologia costruttiva e dei parametri prestazionali d'involucro ma anche dal punto di vista delle caratteristiche tecniche e dei parametri di prestazione degli impianti termici.

Si possono quindi individuare le caratteristiche tecniche e di esercizio per alcune configurazioni dell' "impianto ricorrente", in linea con le ipotesi poste alla base dello studio (è stato approfondito in particolare lo studio relativo ad un edificio di riferimento multipiano costruito negli anni Settanta e dotato di impianto di riscaldamento centralizzato) utilizzabili come dati di riferimento per le simulazioni della prestazione energetica dell'edificio da sottoporre a retrofit.

2.1.2 Consistenza del parco immobiliare residenziale italiano

2.1.2.1 Edifici in generale

Secondo i dati dell'ultimo censimento ISTAT (2011) in Italia vi sono circa 12,2 milioni di edifici a destinazione d'uso residenziale con oltre 31 milioni di abitazioni. Le abitazioni occupate sono pari a 21,7 milioni nel 2001 e 24,1 milioni nel 2011.¹

La maggior parte degli edifici è di tipo monofamiliare, con percentuali più elevate nel Nord-Est (52,5%), Sud (58,3%) e nelle Isole (65%). Il 65% di tali edifici ha una età maggiore di 45 anni e sono stati costruiti in epoca

¹ 15° Censimento Generale della popolazione e delle abitazioni – Censimento 2011, ISTAT.

anteriore all'entrata in vigore della Legge 30 aprile 1976 n.373, prima legge sul risparmio energetico [fonte ISTAT, elaborazione ENEA]. Circa il 55% degli edifici residenziali ha una età superiore a 50 anni, il 20% del quale è stato costruito prima del 1919.

Nelle Tabella 1 e Tabella 2 viene riportata la consistenza del patrimonio immobiliare residenziale sulla base di elaborazioni dei dati acquisiti e resi disponibili da ISTAT attraverso l'ultimo censimento della popolazione e delle abitazioni.

Tabella 1. Edifici residenziali per numero di abitazioni (al 2011)

	Monofamiliare (%)	Bifamiliare (%)	3÷4 Abitazioni (%)	5÷8 Abitazioni (%)	9÷15 Abitazioni (%)	Grandi condomini
Edifici	62	20	9	5	2	2
Abitazioni	21	18	15	14	12	20
Abitazioni occupate	19	17	15	14	13	22

Tabella 2. Parco residenziale italiano ripartito per classe di epoca di costruzione (al 2011)

	Edifici residenziali	%	Abitazioni	Abitazioni occupate da persone residenti	Abitazioni per edificio
Ante 1918	2.150.259	18	3.656.542	2.453.037	1,7
1919 – 1945	1.383.815	11	2.799.407	2.033.438	2,0
1946 – 1960	1.659.829	14	4.268.838	3.382.138	2,6
1961 – 1970	1.967.957	16	5.986.048	4.829.923	3,0
1971 – 1980	1.983.206	16	5.770.951	4.494.257	2,9
1981 – 1990	1.290.502	11	3.874.961	3.044.874	3,0
1991 – 2000	791.027	6	2.311.576	1.870.661	2,9
Post 2001	961.103	8	2.469.955	1.956.966	2,6
Totale	12.187.698	100	31.138.278	24.065.294	2,6

Circa un quarto degli edifici non ha mai subito interventi di ristrutturazione e/o riqualificazione energetica e il 75% degli edifici necessita di manutenzione straordinaria, mentre il 25% degli edifici ha consumi medi annui elevati.

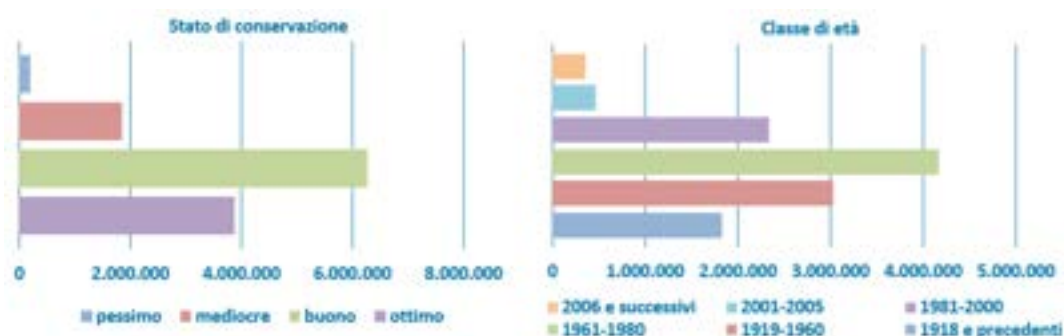


Figura 1. Suddivisione degli edifici residenziali in Italia [fonte: ISTAT, elaborazione ENEA]

2.1.2.2 Condomini

Nei circa 1.200.000 di condomini italiani (con circa 14 milioni di abitazioni) vivono circa 45 milioni di persone (75% della popolazione italiana).

Oltre il 60% dei condomini è stato costruito prima dell'emanazione della Legge n.373 del 1976.

L'82% dei condomini è antecedente all'entrata in vigore della Legge n.10 del 1991 sul contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici. Ne deriva che circa il 30% dei condomini (un numero

maggior di 400.000) si trovano in mediocre e/o pessimo stato di conservazione.²

In particolare, nel periodo storico dal 1962 al 1971 sono stati costruiti circa il 16,8% di condomini mentre il 17% nel periodo dal 1972 al 1981, per un totale circa il 34% nel periodo 1962-1981.

Il potenziale di risparmio energetico relativo i condomini è ampio (come evidenziato dalle indicazioni della SEN 2017) quale settore guida nella riduzione dei consumi finali considerando che il consumo medio annuale dello stock di condomini italiani si attesta su 4 Mtep (emissioni stimate in circa 15 milioni di tCO₂).

Da ricerche effettuate su circa 400.000 condomini dotati di impianti di riscaldamento centralizzati, risulta che circa 130.000 impianti sono stati installati da più di 15 anni e necessitano pertanto di interventi di riqualificazione, al fine di migliorarne l'efficienza energetica e il comfort abitativo.

2.1.3 Stato dell'arte dei sistemi di climatizzazione invernale negli edifici residenziali

È stata effettuata la rassegna dello stato dell'arte degli impianti di riscaldamento maggiormente diffusi nell'edilizia residenziale per epoca storica. Tale attività ha permesso di definire, per classe di epoca di costruzione, gli assetti impiantistici rappresentativi del parco immobiliare residenziale italiano, con l'identificazione del cosiddetto "impianto ricorrente" rappresentativo di due particolari epoche storiche di costruzione che interessa, come specificato, più del 30% dei condomini italiani: il periodo 1961-1975 e il periodo 1976-1980 relativo alle prime disposizioni legislative in materia di efficienza energetica negli edifici (Legge n.373 del 1976 "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici").

Lo scopo è quello di definire un sistema impiantistico tipo ("impianto ricorrente"), per epoca di costruzione considerata e classe dimensionale, con determinate caratteristiche geometriche, tipologia costruttiva (componenti di involucro opaco e trasparente), tipologia impiantistica (sottosistemi componenti per l'impianto di riscaldamento).

In particolare è stata approfondita la trattazione delle reti di distribuzione del fluido termovettore negli impianti di riscaldamento che possono essere oggetto di interventi di *deep renovation* che interessano l'involucro edilizio.

2.1.4 Gli impianti di riscaldamento a servizio degli edifici residenziali

Gli impianti di riscaldamento sono progettati per mantenere all'interno degli ambienti confinati condizioni termo-igrometriche adeguate alla destinazione d'uso. La prima grande distinzione da operare è tra impianti autonomi e centralizzati.

2.1.5 Impianti autonomi

Si tratta del sistema impiantistico più diffuso in cui ciascuna delle unità immobiliare è dotata di un generatore di calore. Il rendimento globale è inferiore a quello degli impianti centralizzati e risultano pertanto maggiori – a parità di condizioni – i costi di esercizio. Poiché si è assunto che l'edificio ricorrente sia dotato di un impianto centralizzato di riscaldamento si tralascia la trattazione specifica degli impianti autonomi per affrontare la descrizione degli impianti centralizzati negli edifici multifamiliari e nei cosiddetti blocchi di appartamenti.

² 15° Censimento Generale della popolazione e delle abitazioni – Censimento 2011, ISTAT.

2.1.6 Impianti centralizzati

Focalizzando l'attenzione sulla situazione dei condomini del patrimonio immobiliare italiano, gli impianti centralizzati condominiali sono dotati di centrale termica in cui è installato il generatore di calore e da cui si dirama la rete di distribuzione del fluido termovettore (in questo documento vengono trattati gli impianti con fluido termovettore acqua prodotta a temperature nell'intervallo tra 50÷90°C).

Gli impianti termici centralizzati hanno in generale un sistema di distribuzione a colonne montanti o a distribuzione orizzontale.

2.1.6.1 Impianti centralizzati a distribuzione verticale

Gli impianti termici centralizzati a distribuzione verticale rappresentano la tipologia più diffusa, in generale fino al 1980, caratterizzata da montanti verticali che distribuiscono il fluido termovettore (generalmente acqua calda) ai corpi scaldanti delle unità immobiliari dei piani. I corpi scaldanti sono per lo più costituiti da radiatori in ghisa, alluminio o acciaio che diffondono il calore nell'ambiente da riscaldare in parte per radiazione ed in parte per convezione naturale. La sola modalità di regolazione prevista in origine per questa tipologia di impianti è un intervento manuale del conduttore sui corpi scaldanti mediante chiusura o apertura del passaggio del fluido termovettore.

Negli impianti centralizzati a distribuzione verticale (e similari), le unità immobiliari ricevono il fluido termovettore da diversi montanti verticali. La distribuzione del fluido può avvenire principalmente dall'alto ("impianto a pioggia") o dal basso ("impianto a sorgente") o, più raramente, da impianti monotubo verticali che alimentano in serie i diversi corpi scaldanti posti ai vari piani. Quest'ultima tipologia non consente l'installazione di valvole di intercettazione sui singoli corpi scaldanti.

I terminali di emissione (radiatori) sono localizzati sulle pareti e la loro distribuzione a volte non tiene in debito conto le dispersioni dovute alla diversa disposizione dei singoli locali.

Mediamente circa il 75% del calore prodotto dal sistema di generazione del calore viene emesso dai corpi scaldanti (per convezione e irraggiamento) mentre circa il 25% viene disperso dal sistema di distribuzione. Inoltre, circa il 18% di queste perdite sono recuperate e concorrono alla climatizzazione invernale degli ambienti, mentre il 7% circa rappresenta la perdita passiva non recuperata.

2.1.6.2 Impianti centralizzati a distribuzione orizzontale

Gli impianti termici centralizzati a distribuzione orizzontale rappresentano la tipologia più recente (diffusi in generale dal 1980) che, negli ultimi decenni, ha soppiantato in pratica la distribuzione verticale grazie alla disponibilità di pompe di circolazione molto silenziose. L'utilizzo di pompe di circolazione ha reso possibile il considerevole incremento della portata del fluido termovettore, potendo operare con minori diametri delle tubazioni della rete di distribuzione (rete più "snella").

Molteplici i vantaggi derivanti dall'adozione della distribuzione orizzontale:

- lo schema si presta a realizzare un unico tronco di ingresso ed uscita per ogni unità immobiliare;
- l'inserimento di un contatore di calore sul tronco consente un'agevole contabilizzazione del calore;
- l'intera rete di distribuzione è generalmente interna all'involucro riscaldato, con conseguente riduzione delle dispersioni di calore delle tubazioni che vengono in gran parte recuperate.

Lo schema tipico di un impianto termico centralizzato a distribuzione orizzontale è quello con collettori di distribuzione e con moduli di derivazione di zona ispezionabili.

Esistono anche ulteriori versioni:

- impianti termici a distribuzione orizzontale a due tubi
- impianti termici a distribuzione orizzontale monotubo
 - in rame con valvole a quattro vie

- in ferro con eiettori Venturi
- Impianti termici a distribuzione orizzontale a pannelli radianti
 - con cassetta di distribuzione ispezionabile
 - senza cassetta di distribuzione ispezionabile

Gli impianti realizzati sono sottoposti a continui miglioramenti e perfezionamenti anche mediante l'utilizzo di dispositivi di regolazione automatici della temperatura ambiente. La realizzazione di edifici a minori dispersioni di energia termica, in conformità con le leggi vigenti, contribuisce anche a migliorare il benessere ambientale.

Considerazioni generali a livello delle prestazioni termiche, negli impianti a collettori complanari, circa l'80% del calore utile prodotto dal generatore di calore è emesso dai corpi scaldanti, mentre il 20% circa è disperso dal sistema di distribuzione. Di queste perdite circa il 15% viene recuperato e concorre alla climatizzazione invernale degli ambienti, mentre il 5% rappresenta la perdita non recuperata.

Analogo ragionamento può essere fatto per gli impianti monotubo per i quali mediamente l'87% del calore utile prodotto dal generatore è emesso dai corpi scaldanti, mentre il 13% è disperso dal sistema di distribuzione. Circa l'8% di queste perdite sono recuperate e concorrono alla climatizzazione invernale degli ambienti, mentre il 5% rappresenta la perdita non recuperabile.

All'interno di ogni unità immobiliare si è dapprima preferito lo schema monotubo, per la maggiore rapidità di installazione. In seguito si è diffusa la distribuzione del tipo a collettori, in grado di assicurare una migliore resa dei corpi scaldanti e di una migliore regolazione della temperatura dei singoli ambienti.

Le perdite delle tubazioni interne poste sottopavimento sono quasi completamente recuperate, in massima parte dall'unità immobiliare servita ed in parte minore dall'unità immobiliare sottostante. Solo per l'unità immobiliare posta su spazi non riscaldati, la perdita termica verso i vani non riscaldati risulta non recuperabile e di ciò si può tener conto nel calcolo della perdita, in particolare se il pavimento corrispondente non è convenientemente isolato verso l'ambiente esterno o comunque non riscaldato.

2.1.7 Cenni metodologici allo studio delle tipologie impiantistiche degli edifici residenziali

In anni recenti sono stati sviluppati alcuni interessanti progetti europei³ allo scopo di armonizzare le varie tipologie edilizie rintracciabili in Europa. Essi hanno permesso di sviluppare anche per l'Italia una cosiddetta "tipologia edilizia nazionale", ovvero un set di edifici residenziali modello aventi caratteristiche energetiche tipiche ("edifici-tipo"), rappresentativi di una classe di epoca di costruzione e di una determinata classe dimensionale. Ogni edificio-tipo viene definito mediante caratteristiche geometriche, sistemi costruttivi e impianti tecnici tipici del periodo di costruzione.

Sulla base dei caratteri costruttivi e degli impianti termici tipici del parco edilizio residenziale nazionale è stata sviluppata una struttura comune per le tipologie edilizie. La tipologia edilizia è stata classificata per regione e zona climatica, classe di epoca di costruzione (8 classi) e classe di dimensione edilizia (4 tipologie dimensionali: edifici monofamiliari, a schiera, plurifamiliari, blocchi di appartamenti).

Ogni classe di epoca di costruzione intende essere rappresentativa di un determinato periodo storico (tipologie dimensionali e costruttive). Ogni classe di epoca di costruzione è rappresentata da classi di dimensione edilizia, che si riferiscono a specifiche tipologie dimensionali, costruzioni con determinata estensione e geometria.

³ In particolare i progetti europei TABULA (*Typology Approach for BUilding stock energy Assessment, 2009-2012*) ed EPISCOPE (*Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks, 2013-2016*).

Inoltre, per ogni zona climatica è possibile individuare una matrice le cui righe indicano classi di epoca di costruzione e le colonne indicano classi di dimensione edilizia: pertanto a ogni elemento della matrice è associato un edificio-tipo corrispondente alla terna di valori area climatica-epoca di costruzione-dimensione. L'insieme degli edifici-tipo formano la matrice della tipologia edilizia nazionale per la zona climatica media (considerata *area climatica media*) che interessa numericamente più della metà dei Comuni italiani (Figura 2).

		CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA			
		CASE INDIFAMILIARI	CASE A SCHIERA	BIPPEI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	Fine al 1900				
	1901-1920				
	1921-1940				
	1941-1960				
	1961-1975				
	1976-1990				
	1991-2005				
	Dopo il 2005				

Figura 2. Matrice tipologia edilizia nazionale italiana [fonte: TABULA]

In riferimento alle tipologie impiantistiche nell'analisi sono considerati gli impianti di climatizzazione invernale suddivisi nei vari sottosistemi componenti.

2.1.8 Descrizione delle tipologie impiantistiche

Le tipologie impiantistiche possono essere definite secondo l'esperienza con il supporto della letteratura e della normativa tecnica e riguardano le tecnologie di impianto di riscaldamento considerate come tipiche di un determinato periodo storico.

Lo scopo di questa analisi è quello di identificare un *sistema impiantistico ricorrente* comprendente l'impianto di riscaldamento considerato.

A tal fine gli impianti di riscaldamento vengono esaminati caratterizzando singolarmente i differenti sottosistemi impiantistici: generazione, distribuzione, emissione, accumulo, ausiliari elettrici.

Al fine di rendere lo studio completo e fornire una informazione rappresentativa degli impianti installati negli edifici residenziali in Italia si riportano, per ogni sottosistema componente l'impianto, una sintetica descrizione del sottosistema, l'indicazione dell'epoca storica di costruzione e/o installazione e i valori orientativi dei parametri di prestazione di riferimento (efficienza, perdita di energia termica, ecc.), nonché la classe dimensionale (ad esempio "edifici plurifamiliari").

L'insieme dei tipi di sottosistemi impiantistici non intende essere esaustivo del panorama di tutti i sottosistemi disponibili installati, ma ha l'ambizione di rappresentare le tecnologie più diffuse in ambito nazionale.

2.1.8.1 Sottosistema di generazione

A partire dalla classificazione delle differenti tipologie di sottosistema di generazione (Tabella 3) si considerano differenti categorie di informazioni: la tipologia dimensionale dell'edificio, il tipo di impianto di riscaldamento (autonomo/centralizzato), il tipo di generatore di energia termica, il periodo di installazione, l'ubicazione del generatore e il vettore energetico utilizzato.

Il parametro di prestazione è il valore medio stagionale del *rendimento di generazione* ($\eta_{H,gn}$) come dedotto dal prospetto 23⁴ della UNI/TS 11300-2:2008 (generatori di calore a gas e gasolio), e dalla UNI/TS 11300-4 per generatori di calore a biomassa. Per le finalità del presente studio si tralascia di indicare i tipi di generatore di energia termica utilizzati negli edifici di nuova costruzione (dopo il 2005).

Tabella 3. Sottosistemi di generazione

Tipologia dimensionale	Tipo di generatore	Ubicazione			Vettore energetico	Periodo	Rendimento
		Ambiente climatizzato	Ambiente non climatizzato	Centrale termica			
Edificio monofamiliare A schiera	caldaia standard, bruciatore atmosferico, camino < 10 m		X		gas	Fino al 1995	0,73
		X				Fino al 1995	0,82
Edificio plurifamiliare Blocchi appartamenti	caldaia standard, bruciatore atmosferico, camino > 10 m		X		gas	Fino al 1995	0,71
		X				Fino al 1995	0,80
Generale	caldaia standard, bruciatore ad aria soffiata			X	gas	Fino al 1995	0,85
					gasolio	Fino al 1995	0,85
Edificio plurifamiliare Blocchi appartamenti	caldaia standard per impianti di riscaldamento autonomi (per appartamento)		X		gas	-	0,88
		X				-	0,92
Generale	termostufa (o termocamino)	-	-	-	legna tradizionale	Fino al 1977	0,50
						1978-1994	0,60
Generale	caldaia a combustione di legna (pellet)		X		pellet	-	0,87
		X				-	0,89
Generale	caldaia a condensazione			X	gas	-	0,98

2.1.8.2 Sottosistema di distribuzione

I sistemi di distribuzione dell'acqua negli impianti di riscaldamento sono costituiti dai circuiti idrici e dalle apparecchiature necessarie per la circolazione dell'acqua e per le necessarie tarature e regolazioni. Si può effettuare una sintetica e generale classificazione dei circuiti nel modo seguente:

- a) Circuiti a circolazione naturale
- b) Circuiti a circolazione forzata o meccanica
 - b.1) Circuiti di sola mandata
 - b.2) Circuiti di mandata e ritorno
 - b2.1) Circuiti di mandata/ritorno con ritorno diretto
 - b2.2) Circuiti di mandata/ritorno con ritorno inverso
 - b2.3) Circuiti di mandata/ritorno con ritorno misto
- c) Circuiti monotubo
- d) Circuiti primario e secondario (impianti a zone)

⁴ Prospetto 23c: "Generatori di calore a gas o gasolio, bruciatore ad aria soffiata o premiscelati, modulanti, classificati ** (2 stelle)"; Prospetto 23d: "Generatori di calore a gas a condensazione **** (4 stelle)"

a) Circuiti a circolazione naturale

L'impianto di circolazione naturale a due tubi è caduto generalmente in disuso e resta un'opzione valida solo per impianti a piccola potenzialità, in zone montane o non continuità dell'erogazione di energia elettrica dalla rete. Si possono realizzare impianti "a pioggia" (l'acqua raggiunge i corpi scaldanti dall'alto) o impianti "a sorgente" (l'acqua raggiunge i corpi scaldanti dal basso).

b) Circuiti a circolazione forzata o meccanica

La circolazione dell'acqua nelle tubazioni avviene mediante elettropompa con i vantaggi di una più rapida messa a regime, migliore facilità di regolazione ed equilibratura anche su impianti esistenti non del tutto correttamente progettati. Con questi circuiti si realizzano "impianti a pioggia" (Figura 3) e impianti sorgente (Figura 4), con distribuzione orizzontale.

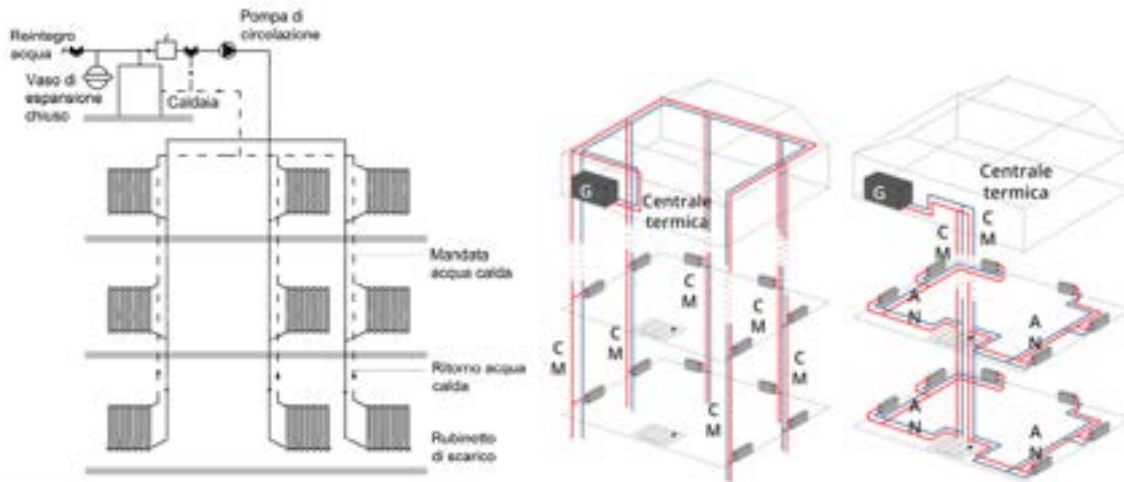


Figura 3. Schema di impianto centralizzato a colonne montanti con distribuzione "a cascata" (o "a pioggia")

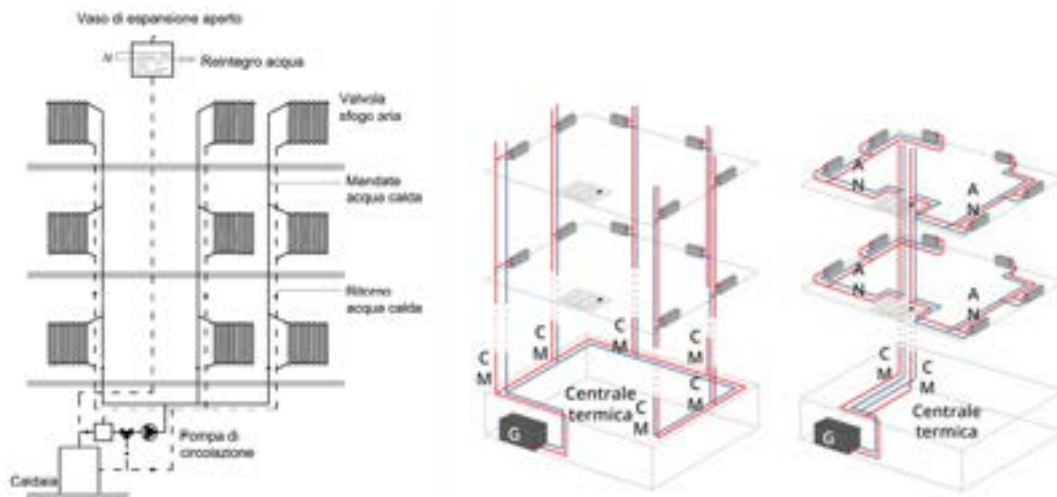


Figura 4. Schema di impianto centralizzato a colonne montanti con distribuzione "a sorgente" o "dal basso"

I circuiti a circolazione forzata si possono distinguere in due ulteriori categorie:

- b.1) *Circuiti di sola mandata*: circuiti in cui il fluido vettore viene inviato da un serbatoio in un altro senza possibilità di ritorno;
- b.2) *Circuiti di mandata e ritorno*: il fluido vettore percorre in maniera ripetuta il circuito ritornando al serbatoio di partenza. Possono essere di tipo aperto o chiuso (nei circuiti di mandata e ritorno a circuito chiuso l'acqua di circolazione non entra mai in contatto con l'atmosfera o la superficie di contatto è

trascurabile – caso di vaso di espansione aperto). I circuiti odierni sono realizzati nella quasi totalità dei casi a circolazione forzata a due tubi con vaso di espansione chiuso (come nell'esempio di Figura 4).

Gli impianti con ricircolo possono esser costituiti diversamente a seconda di come viene realizzato il ritorno (tipologia di allaccio dei vari terminali al ritorno):

b.2.1) *Circuiti di mandata/ritorno con ritorno diretto* (Figura 5): si tratta del metodo di ritorno del fluido vettore in cui il fluido in uscita dai terminali segue un percorso parallelo e inverso al percorso di mandata. Di conseguenza si generano perdite di carico molto differenti a causa della differente geometria dei tratti di mandata e ritorno, e differenze di pressione tali da equilibrare tali da garantire le portate richieste da ogni unità di scambio. Questo sistema di ritorno viene adottato quando le varie unità presentano perdite di carico molto diverse tali da richiedere valvole di bilanciamento delle pressioni già in fase progettuale. Si tratta di un sistema economico con basso costo di investimento iniziale. In fase di gestione dell'impianto però richiede valvole ausiliare o flange tarate per la regolazione della portata.

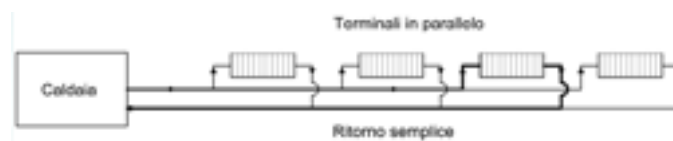


Figura 5. Schema di circuito con ritorno diretto

b.2.2) *Circuiti di mandata/ritorno con ritorno inverso* (Figura 6): in questo tipo di circuiti la lunghezza della linea di mandata e della linea di ritorno del fluido termovettore risulta la stessa per ogni unità di scambio termico, per cui il circuito risulta autobilanciato o con scarse necessità di bilanciamento se risulta ben progettato. Il sistema è però più costoso per le maggiori tubazioni impiegate

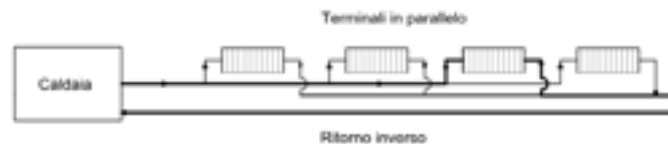


Figura 6. Schema di circuito con ritorno inverso

b.2.3) *Circuiti di mandata/ritorno con ritorno misto* (collettori di ritorno inversi e tratti verticali dritti): sistema che si adotta nel caso di particolare struttura del fabbricato, ubicazione particolare dei terminali o differenti perdite di pressione dei terminali, tali per cui i due sistemi - a ritorno diretto e a ritorno inverso - sono usati per diverse zone dell'edificio. In alternativa si opta per l'utilizzo di collettori di ritorno inversi e montanti diretti, con i singoli terminali che risultano non bilanciati e la conseguente necessità di ricorrere a valvole ausiliare o flange di taratura sui terminali.

c) Circuiti monotubo

Si tratta di circuiti realizzati con tubazione principale unica (o "anello") il cui schema è riportato in Figura 7.

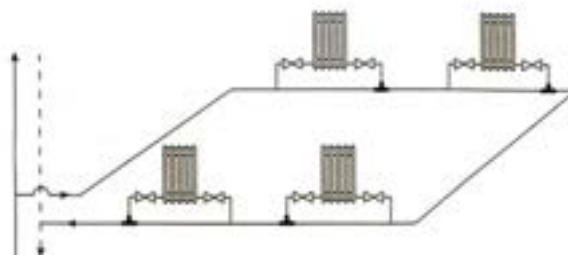


Figura 7. Distribuzione monotubo

Il sistema è applicabile a tutti gli impianti di riscaldamento ad acqua calda a circolazione forzata. Si possono avere più anelli, con percorso orizzontale o verticale: l'acqua attraversa in successione le unità di scambio termico per reimmettersi nell'anello, ognuno dei quali rappresenta un impianto a sé stante, con determinate caratteristiche e potenzialità, portata d'acqua e salto termico.

Di solito l'impianto monotubo è realizzato con distribuzione ad anelli orizzontali ma è possibile utilizzarlo anche per circuiti con distribuzione a pioggia con ritorno diretto (Figura 8) o inverso (Figura 9).

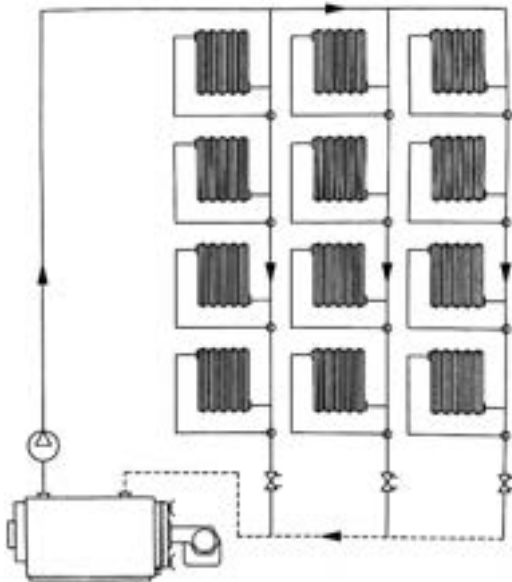


Figura 8. Circuito monotubo a sviluppo verticale, con distribuzione a pioggia e ritorno diretto

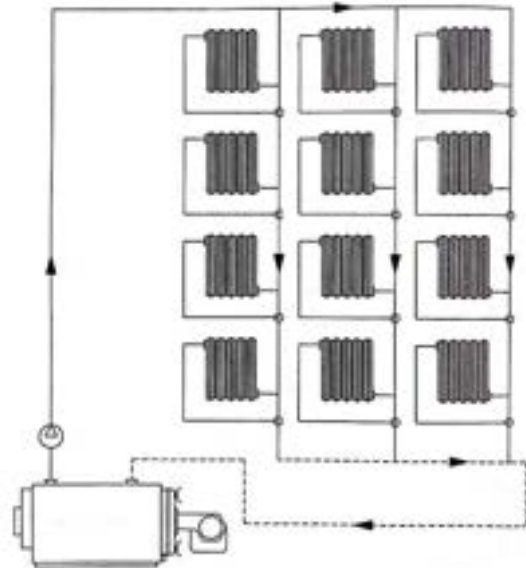


Figura 9. Circuito monotubo a sviluppo verticale, con distribuzione a pioggia e ritorno inverso

I vantaggi dell'impianto monotubo possono essere così sintetizzate: dimensionamento semplificato; anello principale con tubo unico di diametro costante; opere murarie ridotte; rapida messa a regime; inerzia ridotta al minimo; possibilità di realizzazione in ambienti abitati con riduzione del disagio per gli occupanti.

La rete di distribuzione orizzontale a due tubi o monotubo ai corpi scaldanti può assumere diverse tipologie:

- distribuzione orizzontale con collettori distributori (*collettori complanari*) da cui partono due tubi (andata e ritorno) per ogni unità di cambio termico (Figura 10);
- distribuzione monotubo con eiettori che sfruttano l'effetto Venturi per attivare la circolazione attraverso le unità di cambio termico;
- distribuzione monotubo con valvole a 3 o 4 vie con e senza detentore;
- distribuzione monotubo in serie: l'acqua attraversa successivamente i corpi scaldanti.

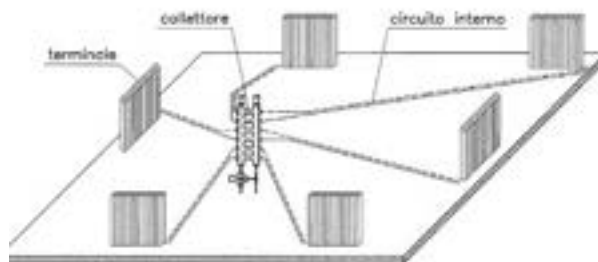


Figura 10. Rete di distribuzione orizzontale a collettore complanare

d) Circuito primario e secondario (impianti a zone)

Si tratta di circuiti in cui il flusso indotto dal circuito primario nel circuito secondario attraverso il tratto comune è tanto più elevato quanto maggiore è la perdita di pressione nel tratto in comune (al limite se la perdita di pressione è nulla ossia quando il tratto comune è molto breve, occorre applicare una pompa nel circuito secondario per attivare la circolazione del fluido).

Il circuito primario può essere: monotubo, a due tubi a ritorno diretto oppure a due tubi a ritorno inverso.

I circuiti secondari possono essere realizzati con sistema tradizionale a due tubi o monotubo, realizzando su uno stesso circuito primario zone con tipologie impiantistiche differenti.

La rete di distribuzione del primario viene dimensionata come un circuito idraulico normale in funzione di portata e sviluppo della tubazione, con dimensionamento della pompa sulla caduta di pressione nel circuito primario, trascurando i circuiti secondari. Ogni zona è calcolata come impianto autonomo in funzione di: portata d'acqua; caratteristiche del circuito (monotubo, ritorno diretto, ritorno inverso).

2.1.8.3 Rendimenti di distribuzione

Per la classificazione delle differenti tipologie di sottosistema di distribuzione (Tabella 4) si considerano: la tipologia dimensionale, la lunghezza della rete (numero di piani), il tipo di impianto di riscaldamento (autonomo/centralizzato), l'affaccio prevalente della rete di distribuzione (interno/parzialmente esterno), il tipo di distribuzione (prevalentemente verticale/prevalentemente orizzontale) e infine l'indicazione del livello di isolamento termico della rete (correlato al periodo di costruzione).

Il valore del *rendimento di distribuzione* ($\eta_{H,d}$) per i vari tipi di sottosistema di distribuzione è ricavato dalla UNI/TS 11300-2:2008 (prospetto 21).

Tabella 4. Rendimenti di distribuzione per vari tipi di sottosistema

Tipologia edificio	Descrizione	Periodo		Rendimento di distribuzione				
				Numero di piani				
				1	2	3	4	≥5
Edificio plurifamiliare Blocchi appartamenti	Distribuzione centralizzata a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (es. cantina o terreno)	-	1960	-	0,876	0,889	0,901	0,913
		1961	1976	-	0,901	0,913	0,913	0,925
		1977	1993	-	0,913	0,927	0,938	0,943
Edificio plurifamiliare Blocchi di appartamenti	Distribuzione separata per appartamento	-	1960	0,958				
		1961	1976	0,969				
		1977	1993	0,980				
Edificio monofamiliare Edificio a schiera	Distribuzione centralizzata orizzontale in ambienti riscaldati	-	1960	0,947	0,947	-	-	-
		1961	1976	0,958	0,958	-	-	-
		1977	1993	0,969	0,969	-	-	-
Edificio monofamiliare Edificio a schiera	Distribuzione centralizzata a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (es. cantina o terreno)	-	1960	0,824	0,876	-	-	-
		1961	1976	0,851	0,901	-	-	-
		1977	1993	0,880	0,913	-	-	-

La versione della norma tecnica UNI TS 11300-2 riporta il rendimento di distribuzione non in riferimento all'epoca di costruzione ma in funzione del livello di isolamento della rete di distribuzione orizzontale:

- Livello A: isolamento con spessori conformi alle prescrizioni del DPR 412/93;
- Livello B: isolamento discreto, di spessore non necessariamente conforme alle prescrizioni del DPR 412/93, ma eseguito con cura e protetto da uno strato di gesso, plastica o alluminio;
- Livello C: isolamento medio, con materiali vari non fissati stabilmente da uno strato protettivo;
- Livello D: isolamento insufficiente, gravemente deteriorato o inesistente;
- Livello E: isolamento scadente o inesistente in impianti realizzati prima dell'entrata in vigore del DPR 412/93.

In Tabella 5, Tabella 6, Tabella 7 sono riportate le casistiche per impianti autonomi e impianti centralizzati. Il rendimento di distribuzione è riferito al livello di isolamento (livelli da A a E), secondo quanto specificato.

Tabella 5. Impianti di riscaldamento autonomi [UNI TS 11300-2:2014]

1. Impianti autonomi con generatore unifamiliare in edificio condominiale (escluso il caso su esterno o pilotis)	Rendimento di distribuzione			
	A	E		
Impianto autonomo a piano intermedio	0,99	0,99		
Impianto autonomo a piano terreno su ambienti non riscaldati e terreno con distribuzione monotubo	0,96	0,95		
Impianto autonomo al piano terreno su ambienti non riscaldati e terreno con distribuzione a collettori	0,94	0,93		
2. Impianti autonomi in edificio singolo (1° piano)	Rendimento di distribuzione			
	A	B	C	D
Tubazioni correnti nel cantinato a vista	0,964	0,95	0,92	0,873
Tubazioni incassate a pavimento con distribuzione monotubo	0,975	0,965	0,955	0,935
Tubazioni incassate a pavimento con distribuzione a collettori	0,97	0,96	0,94	0,92

Tabella 6. Impianti autonomi a zone, distribuzione orizzontale, montanti verticali* [UNI TS 11300-2:2014]

Impianto unifamiliari a zone in edificio condominiale	Rendimento di distribuzione	
	A	E
Impianti a zone al pian intermedio	0,99	0,99
Impianto a zone al piano terreno su locali non riscaldati e terreno con distribuzione monotubo	0,96	0,95
Impianto a zone al piano terreno su locali non riscaldati e terreno con distribuzione a collettori	0,94	0,93

* correnti solitamente nel vano scale

Tabella 7. Impianti centralizzati tradizionali a montanti (comuni a più unità immobiliari), distribuzione orizzontale* [UNI TS 11300-2:2014]

Distribuzione orizzontale nel cantinato		Rendimento di distribuzione			
		A	B	C	D
Montanti non isolati correnti nell'intercapedine dei muri esterni	1 piano	0,964	0,950	0,920	0,873
	2 piani	0,933	0,924	0,901	0,866
	3 piani	0,929	0,923	0,906	0,879
	4 piani e > 4 piani	0,928	0,923	0,910	0,890
Montanti non isolati correnti in traccia nel lato interno delle pareti esterne	1 piano	0,966	0,952	0,922	0,875
	2 piani	0,938	0,929	0,906	0,871
	3 piani	0,937	0,931	0,914	0,887
	4 piani e > 4 piani	0,938	0,933	0,920	0,900
Montanti non isolati correnti in traccia nel lato interno delle pareti interne (anche nel caso di isolamento a cappotto)	1 piano	0,970	0,958	0,932	0,889
	2 piani	0,985	0,979	0,966	0,944
	3 piani	0,990	0,986	0,977	0,963
	4 piani e > 4 piani	0,990	0,990	0,983	0,972

* correnti a soffitto del piano cantinato

2.1.8.4 Sottosistema di emissione

Per il sottosistema di emissione di riferimento i valori dei rendimenti di emissione sono tratti dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-2 del 2008 (prospetto 17) e sono riportati in Tabella 8.

Tabella 8. Sottosistemi di emissione

Classe di epoca di costruzione	Tipo di sottosistema di emissione	Specifiche	Rendimento di emissione
fino al 1900	Radiatori	Parzialmente su parete esterna non isolata (carico termico medio annuo $4 \div 10 \text{ W/m}^2$)	0,925
1901-1920			
1921-1945			
1946-1960			
1961-1975			
1976-1990	Radiatori	parzialmente su parete esterna isolata (carico termico medio annuo $4 \div 10 \text{ W/m}^2$)	0,945

2.1.8.5 Sottosistema di accumulo

La classificazione delle differenti tipologie di sottosistema di accumulo è effettuata in base alla tipologia dimensionale, al livello (indicativo) di isolamento del serbatoio di accumulo (basso, medio, alto) e al tipo di impianto di riscaldamento (autonomo/centralizzato).

Il parametro che descrive le prestazioni energetiche del sottosistema di accumulo è rappresentato dalle *perdite di energia termica* ($Q_{l,H,s}$), determinate secondo la UNI/TS 11300-2:2008 (Tabella 9).

Tabella 9. Valori di riferimento per il calcolo delle perdite di energia termica del sistema di accumulo

Grandezza	Valori di riferimento
Capacità	60 ÷ 200 litri per unità immobiliare
$\Delta T_{\text{media}} = T_{\text{acqua}} - T_{\text{ambiente}}$	40 °C (impianti a bassa temperatura) 70 °C (impianti ad alta temperatura)
Livello isolamento	2 cm (fino al 1975) / 2 ÷ 6 cm (1976 ÷ 2005)
Conduttività isolante	0,04 W/km

Per ciascuna tipologia di sottosistema di accumulo il valore numerico di $Q_{l,H,s}$ rappresenta un valore medio di riferimento ricavato considerando dei valori orientativi di riferimento (Tabella 10).

Le perdite $Q_{l,H,s}$ vengono riferite alla superficie utile di pavimento, permettono di esprimere un indice di prestazione. Per superficie utile di pavimento (caratteristico di una tipologia dimensionale) va inteso il valore medio delle superfici utili degli edifici-tipo appartenenti a ciascuna delle tipologie di edificio secondo il numero dei piani.

Tabella 10. Sottosistema di accumulo

Tipologia edificio	Descrizione		$Q_{l,H,s}$ [kWh/m ²]
	Tipo di accumulo	Livello di isolamento	
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	Serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento centralizzato	basso	4,4
		medio	2,2
		alto	0,8
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	Serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento autonomo	basso	6,6
		medio	3,3
		alto	1,3
Edificio monofamiliare Edificio a schiera	Serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento	basso	7,5
		medio	3,8
		alto	1,4

2.1.8.6 Sottosistema ausiliari elettrici

La classificazione delle differenti tipologie di sottosistema “ausiliari elettrici” è fatta in base alla tipologia dimensionale, alla presenza o assenza di pompa di circolazione del fluido termovettore, alla tipologia di generatore che determina il tipo di ausiliario elettrico installato.

L'energia elettrica richiesta per il funzionamento degli ausiliari dell'impianto di riscaldamento ($Q_{aux,H}$) rappresenta un valore medio annuo. Il calcolo si effettua mediante la procedura descritta al par. 6.7 ("Fabbisogno di energia elettrica dei sottosistemi degli impianti di riscaldamento") della UNI/TS 11300-2:2008 (sono esclusi i generatori a biomassa) e UNI/TS 11300-4 (par. 8.4.3) limitatamente ai generatori a biomassa.

Per ciascuna tipologia di sottosistema ausiliari elettrici il valore numerico di $Q_{aux,H}$ rappresenta un valore medio di riferimento ricavato considerando dei valori orientativi di riferimento in relazione a: portata d'acqua del circuito, prevalenza della pompa (valore medio di riferimento), potenza elettrica degli ausiliari dei generatori di calore (in base a tipo e taglia del generatore), fattore di carico medio stagionale del generatore di calore (assunto pari a 0,7), periodo di riferimento (collegato ai sottosistemi di generazione e distribuzione cui gli ausiliari si riferiscono) (Tabella 11).

Tabella 11. Tipi di sottosistema ausiliari elettrici

Tipologia edificio	Descrizione	$Q_{aux,H}$ [kWh/m ²]
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	pompa di circolazione per impianto centralizzato ausiliario elettrico per caldaia standard con bruciatore atmosferico	1,7
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	pompa di circolazione per impianto centralizzato ausiliario elettrico per caldaia con bruciatore ad aria soffiata	2,6
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	pompa di circolazione per impianto centralizzato ausiliario elettrico per caldaia a condensazione	2,6
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	pompa di circolazione per impianto centralizzato ausiliario elettrico per caldaia a biomassa	1,7
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	pompa di circolazione per impianto centralizzato	1,6
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	ausiliario elettrico per caldaia standard (impianto di riscaldamento autonomo)	1,6
Edificio plurifamiliare blocchi appartamenti	ausiliario elettrico per caldaia a condensazione (impianto di riscaldamento autonomo)	4,9
Edificio monofamiliare Edificio a schiera	pompa di circolazione per impianto centralizzato ausiliario elettrico per caldaia standard con bruciatore atmosferico	3,7
Edificio monofamiliare Edificio a schiera	pompa di circolazione per impianto centralizzato ausiliario elettrico per caldaia con bruciatore ad aria soffiata	4,4
Edificio monofamiliare Edificio a schiera	pompa di circolazione per impianto centralizzato ausiliario elettrico per caldaia a condensazione	4,4
Edificio monofamiliare Edificio a schiera	pompa di circolazione per impianto centralizzato ausiliario elettrico per caldaia a biomassa	3,7
Edificio monofamiliare Edificio a schiera	pompa di circolazione per impianto centralizzato	2,7

2.1.9 Definizione di "impianto ricorrente"

Considerate le condizioni poste alla base dello studio ed eseguita la trattazione sistematica delle tipologie impiantistiche si può a questo punto definire l'analogo dell'edificio ricorrente a livello di impianti di riscaldamento al fine di fornire una caratterizzazione completa dei modelli di riferimento per il sistema edificio-impianti nel suo complesso (che può essere indicato come sistema edificio-impianti "ricorrente").

Nel corso della linea di attività LA2.1, che ha riguardato la simulazione in regime dinamico di edifici rappresentativi del parco edilizio italiano, si è definito l'"edificio ricorrente" in relazione ai principali parametri termo-fisici (trasmittanza termica, capacità termica areica, trasmittanza termica periodica) dei componenti opachi dell'involucro maggiormente utilizzati negli edifici esistenti. L'ipotesi di base è che il fabbricato sia stato costruito negli anni Settanta prima dell'emanazione della Legge n.373 del 1976 e che in

seguito sia stato sottoposto esclusivamente a interventi di manutenzione ordinaria e non ad interventi di riqualificazione energetica.

In Tabella 12 si riportano le principali caratteristiche del cosiddetto “edificio ricorrente” già descritto nella linea di attività LA 2.1.

Tabella 12. Caratteristiche principali dell’“edificio ricorrente”

Dati tipologico-dimensionali	
Numero di piani	6
Unità immobiliari per piano	3
Larghezza	30 m
Profondità	12 m
Altezza netta di piano	2,70 m
Superficie utile di piano	300 m ²
Superficie lorda di piano	360 m ²
Superficie utile unità immobiliare	90 m ²
Volume lordo riscaldato	6.480 m ³
Rapporto di forma (S/V)	0,38
Numero vani scala ascensore	1
Area sedime vano scala	30 m ²
Area di sedime disimpegno accesso unità immobiliare	30 m ²
Dati tipologici specifici	
Superficie disperdente complessiva	2.450 m ²
Superficie totale infissi	≥ 1/8 S _{pavimento}
Altre caratteristiche costruttive	
Spessore tamponatura esterna	29 cm
Spessore partizioni interne	20 cm
Spessore solai	30 cm
Spessore solai interpiano	20 cm
Tipologia copertura	Piana
Chiusura opaca orizzontale inferiore	Soletta cls armato su vespaio di pietrame

Per le motivazioni esposte all’interno della linea di attività LA 2.1 si è descritto come il modello edilizio da sottoporre a simulazione sia più specificatamente rappresentativo degli agglomerati urbani con una forte urbanizzazione.

Da questo punto di vista si osserva che gli impianti di riscaldamento centralizzati a uso di più abitazioni sono molto diffusi nelle maggiori città italiane essendo le altre tipologie di impianti di riscaldamento poco presenti in ognuna delle cinque macroregioni (Nord-Ovest, Nord-Est, Centro, Sud, Isole), e di conseguenza a livello nazionale.

Per quanto riguarda l’individuazione di una tipologia impiantistica ricorrente (“impianto ricorrente”), sono stati scelti impianti di riscaldamento centralizzati in linea con le ipotesi di edificio standard costruito negli anni Settanta.

In Tabella 13 si riportano le caratteristiche principali della tipologia impiantistica ricorrente per il periodo di riferimento (1961 -1980).

La scheda contiene le seguenti informazioni:

- tipologia impiantistica in riferimento all’impianto di riscaldamento con l’indicazione dei sottosistemi impiantistici (generazione, distribuzione, accumulo e ausiliari elettrici);
- caratteristiche e parametri prestazionali (efficienze, perdite di energia termica, consumi elettrici, etc.);
- Valori numerici e descrizione delle caratteristiche.

Tabella 13. Definizione di una tipologia impiantistica ricorrente

Sottosistema	Caratteristica	Valore/descrizione
Generazione	Tipo generatore	Es. caldaia standard a gas naturale
	Ubicazione	Ambiente climatizzato/non climatizzato/Centrale Termica
	Fattore di carico medio stagionale	≈ 0,7
Accumulo	Ubicazione	Ambiente climatizzato/non climatizzato
	Capacità	60 ÷ 200 litri per unità immobiliare
	$\Delta T = T_{\text{accumulo}} - T_{\text{ambiente}}$	40 °C (impianti a bassa temperatura) 70 °C (impianti ad alta temperatura)
	Livello isolamento	2 cm (fino al 1975) – 2 ÷ 6 cm (1976 ÷ 2005) [valori di riferimento]
	Conducibilità isolante	0,04 W/mK [valore di riferimento]
	Perdite $Q_{l,H,S}$	kWh/m ² *
Distribuzione	Tipologia impianto	Autonomo/centralizzato
	Lunghezza rete	Numero piani edificio
	Affaccio prevalente della rete	Interno/parzialmente interno
	Tipo prevalente distribuzione	Verticale/orizzontale
	Livello isolamento rete	Alto/medio/basso
Emissione	Tipologia	Es. radiatori
	Disposizione	parzialmente su parete esterna non isolata
	Carico termico medio	4 ÷ 10 W/m ³ (annuo)
Ausiliari	Pompa di circolazione	Presente/assente
	Perdite $Q_{l,H,H}$	kWh/m ² *

*= valori riferiti alla superficie utile di pavimento

2.1.9.1 Individuazione di configurazioni impiantistiche ricorrenti

Secondo quanto specificato nei paragrafi precedenti per i periodi 1961-1975 e 1976-1980 si possono individuare delle configurazioni impiantistiche che si possono qualificare come “ricorrenti”. Per le finalità dello studio ne sono state selezionate due: una prima configurazione, descritta in Tabella 14 e una seconda configurazione in Tabella 15 per quanto attiene al solo impianto di riscaldamento, fornendo i valori di riferimento delle caratteristiche tecniche e dei parametri prestazionali desumibili dall’analisi effettuata.

Le ipotesi prese in considerazione sono le seguenti:

- Sottosistema di generazione: per la classe di epoca di costruzione considerata (1961-1980) il sistema di generazione è rappresentato dal generatore di calore alimentato a gas naturale. Di conseguenza il rendimento medio stagionale ($\eta_{H,gn}$) risulta pari a 0,71 (Tabella 3). Si è ipotizzato che l’efficienza termica di design della caldaia pari a 0,81 si riduca fino a 0,68 in condizioni di carico parziale;
- Sottosistema di distribuzione: centralizzato a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (ad es. cantina o terreno);
- Sottosistema di emissione: i terminali per la climatizzazione invernale sono comuni radiatori;
- Sottosistema di accumulo: è possibile specificare se sia presente o meno un sistema di accumulo.

Tabella 14. Impianto ricorrente – prima configurazione (periodo 1961-1975)

Sottosistema	Caratteristica	Valore/descrizione
Generazione	Tipo generatore	Caldaia standard (gas), bruciatore atmosferico, camino > 10 m, antecedente al 1996
	Ubicazione	Ambiente non climatizzato
	Fattore di carico medio stagionale	0,7
	Rendimento $\eta_{H,gn}$	0,71
Accumulo	Tipologia	-
	Ubicazione	-
	Capacità	60 ÷ 200 litri per unità immobiliare
	$\Delta T = T_{accumulo} - T_{ambiente}$	40 °C (impianti a bassa temperatura) 70 °C (impianti ad alta temperatura)
	Livello isolamento	2 cm (fino al 1975) [valori di riferimento]
	Conduktività isolante	0,04 W/mK [valore di riferimento]
	Perdite $Q_{I,H,S}$ [kWh/m ²]*	0,0
Distribuzione	Tipologia	Distribuzione centralizzata a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (ad es. cantina o terreno) / fino al 1961-1976
	Lunghezza rete (n. piani)	≥ 5 piani
	Affaccio prevalente della rete	Interno/parzialmente interno
	Tipo prevalente distribuzione	Verticale
	Livello isolamento rete	Alto/medio/basso
	Rendimento $\eta_{H,d}$	0,925 (periodo 1961-1975, numero di piani ≥ 5)
Emissione	Tipologia	Radiatori
	Disposizione	parzialmente su parete esterna non isolata
	Carico termico medio	4 ÷ 10 W/m ³ (annuo)
	Rendimento $\eta_{H,e}$	0,925 (periodo 1961-1975)
Ausiliari	Tipologia	Pompa di circolazione per impianto centralizzato - ausiliario elettrico per caldaia standard con bruciatore atmosferico
	Pompa di circolazione	Presente
	Tipologia generatore	Caldaia standard con bruciatore atmosferico
	Perdite $Q_{aux,H}$ [kWh/m ²]*	1,7

Tabella 15. Impianto ricorrente – seconda configurazione (periodo 1976-1980)

Sottosistema	Caratteristica	Valore/descrizione
Generazione	Tipo generatore	Caldaia standard a gas, bruciatore ad aria soffiata, installata in centrale termica, antecedente al 1996
	Ubicazione	Centrale termica
	Fattore di carico medio stagionale	0,7
	Rendimento $\eta_{H,gn}$	0,85
Accumulo	Tipologia	Serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento centralizzato – livello medio di isolamento
	Ubicazione	-
	Capacità	60 ÷ 200 litri per u.i.
	$\Delta T = T_{\text{accumulo}} - T_{\text{ambiente}}$	40 °C (impianti a bassa temperatura) 70 °C (impianti ad alta temperatura)
	Livello isolamento	2 ÷ 6 cm (1976 ÷ 2005) [valori di riferimento]
	Conduttività isolante	0,04 W/mK [valore di riferimento]
	Perdite $Q_{LH,S}$ [kWh/m ²]*	2,2
Distribuzione	Tipologia	Distribuzione centralizzata a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (es. cantina o terreno) / fino al 1977-1993
	Lunghezza rete (n. piani)	≥5 piani
	Affaccio prevalente della rete	Interno/parzialmente interno
	Tipo prevalente distribuzione	Verticale
	Livello isolamento rete	medio
	Rendimento $\eta_{H,d}$	0,943 (periodo 1976-1980, numero di piani ≥5)
Emissione	Tipologia	Radiatori
	Disposizione	parzialmente su parete esterna non isolata
	Carico termico medio	4 ÷ 10 W/m ³ (annuo)
	Rendimento $\eta_{H,e}$	0,945 (periodo 1976-1990)
Ausiliari	Tipologia	Pompa di circolazione per impianto centralizzato - ausiliario elettrico per caldaia standard ad aria soffiata
	Pompa di circolazione	Presente
	Tipologia generatore	Caldaia standard con bruciatore atmosferico
	Perdite $Q_{aux,H}$ [kWh/m ²]*	2,6

2.2 *Analisi di letteratura su integrazione impianti in sistemi di isolamento modulare prefabbricati*

2.2.1 *Scopo e obiettivi*

Il documento illustra caratteristiche, aspetti e problematiche di integrazione impiantistica nella *deep renovation* delle facciate a seguito dell'esame della letteratura scientifica relativa a selezionate tendenze di ricerca innovativa e dalla ricognizione di progetti di involucri edilizi avanzati finanziati a livello europeo.

L'attenzione è stata posta al tema del retrofit modulare di facciata – che riveste un ruolo chiave per garantire l'efficienza energetica e il comfort interno degli edifici – descrivendo soluzioni di integrazione impiantistica relative a pacchetti modulari prefabbricati proposti al fine di migliorare le prestazioni energetiche e ridurre i tempi di posa in opera e la complessità degli interventi. Tali pacchetti prefabbricati prevedono l'integrazione di involucri ad alta efficienza energetica con elevate caratteristiche di isolamento, elevata tenuta all'aria, controllo solare, gestione dell'umidità, ventilazione meccanica controllata e attrezzature, sistemi HVAC con ventilazione a recupero di calore dimensionati e integrati all'interno dell'involucro opaco e delle pareti, e componenti energetici attivi che incorporano sistemi a fonti rinnovabili e sistemi di accumulo.

Vengono presentate alcune delle più interessanti soluzioni di integrazione impiantistica nella struttura modulare dei pannelli proposte in recenti progetti di ricerca finanziati dalla Commissione Europea selezionate per l'elevato livello di integrazione impiantistica, alcune delle quali hanno l'obiettivo di rendere il modulo prefabbricato una naturale evoluzione di prodotti reperibili sul mercato.

Le soluzioni presentate consentono l'alloggiamento delle tubazioni e dei condotti degli impianti HVAC consentendo semplici e rapide connessioni con la rete di distribuzione degli impianti esistenti all'interno dell'edificio senza necessità di rifacimento ma si prestano perfettamente anche in edifici privi di impianti. L'incremento dell'efficienza energetica del nuovo sistema edificio-impianti viene garantito dai pannelli modulari prefabbricati che integrano al loro interno la nuova rete di distribuzione bene isolata.

Per una delle soluzioni si riporta anche una breve valutazione di fattibilità tecnica dei moduli che integrano impianti HVAC in edifici pilota.

Si fa inoltre cenno ad alcune soluzioni commerciali di retrofit modulare di facciata con elevato livello di integrazione impiantistica.

Si presenta anche una interessante ricerca su una innovativa soluzione di retrofit integrato energetico e sismico basata sull'utilizzo di pannelli prefabbricati in CLT (Cross Laminated Timber, o anche X-LAM).

2.2.2 *Analisi del contesto di riferimento europeo*

L'Europa mira a ridurre drasticamente le emissioni di gas serra nel settore dell'edilizia, ovvero dell'80% rispetto al 1990 entro il 2050. Tuttavia, una parte consistente del parco edilizio europeo (edifici costruiti nel decennio 1960-1970) presenta scarso isolamento termico dell'involucro opaco e trasparente, scarsa qualità dell'ambiente indoor, scarse prestazioni in termini di sicurezza sismica e strutturale, bassa efficienza degli impianti e scarsa integrazione di sistemi a fonti rinnovabili, a causa del fatto che la ristrutturazione degli edifici è guidata spesso più da esigenze locali che esulano dal contenimento dei consumi energetici, come nei casi di lavori di ristrutturazione che coincidono con le riparazioni strutturali.

Nonostante gli obiettivi di efficienza energetica nZEB (Nearly Zero Energy Building, edifici a energia quasi zero) fissati dall'Unione europea e il miglioramento della qualità degli edifici dovuto alla ristrutturazione dimostrato da diverse iniziative, il settore europeo dell'edilizia non è stato in grado di adottare processi di retrofitting su larga scala, con un tasso di ristrutturazione insufficiente che interessa solo l'1% degli edifici esistenti.

Le tecnologie e le pratiche di ristrutturazione più comuni includono l'installazione di isolamenti esterni/interni e il miglioramento della tenuta all'aria dell'involucro edilizio trasparente e opaco, il retrofitting

delle coperture, l'installazione di pannelli solari fotovoltaici e termici, l'installazione di sistemi di recupero del calore e di efficienti sistemi HVAC, ecc.

I retrofit energetici convenzionali più all'avanguardia si concentrano sull'ammodernamento di sistemi isolati (ad es. facciata, illuminazione e apparecchiature HVAC), di solito facendo ricorso a soluzioni tecnologiche tradizionali (che non utilizzano soluzioni industrializzate e prefabbricate) e prive di un approccio di ristrutturazione integrato. Questi modelli di retrofit sono per lo più efficaci nei loro obiettivi previsti, semplici e veloci da implementare ma spesso non permettono di cogliere l'opportunità di risparmiare più energia in modo efficiente in termini di costi. Inoltre, le tecniche di ristrutturazione tradizionali implicano ampia manodopera in loco e rischi maggiori a causa di errori umani e danni dovuti all'esposizione a condizioni diverse (forzanti esterne, condizioni atmosferiche, ecc.).

Diversi studi hanno evidenziato che il costo intrinseco dei guasti in fase di costruzione in un cantiere tradizionale ha un impatto stimato del 20% del costo globale di costruzione. Il costo dei guasti è legato all'errore umano (54% dei guasti), difetti dei materiali (12%), ed errori in fase di costruzione (34%). In tal senso l'approccio della prefabbricazione offre innumerevoli vantaggi: diminuisce i rischi di montaggio in cantiere e l'impatto dell'errore umano, poiché la maggior parte del lavoro è fatto nell'ambiente controllato della fabbrica; migliora il livello delle prestazioni delle tecnologie installate (rispetto a quanto previsto) poiché il controllo di qualità dei componenti viene eseguito in fabbrica; riduce al minimo i difetti di progettazione e di processo di produzione grazie a prodotti standardizzati (per forma e dimensioni) e produzione ottimizzata e automatizzata.

Finora, la *deep renovation* è stata spesso affrontata come una sfida tecnologica ma sono state trascurate le barriere sociali e finanziarie, e su queste questioni è necessaria un'attenzione specifica per sbloccare il mercato. Alcune iniziative sono già in atto, e alcune misure specifiche possono favorire il mercato; tuttavia, di solito non si tratta di approcci integrati né di schemi replicabili.

Per quanto riguarda il sostegno finanziario vi è assenza di opzioni per sostenere gli investimenti a lungo termine nel mercato residenziale.

Per quanto riguarda gli aspetti sociali, i tradizionali approcci di ristrutturazione non tengono solitamente conto delle esigenze individuali o delle aspettative degli utenti in modo partecipativo. Vengono invece applicati regolamenti e metodologie comuni.

I nuovi approcci dovranno probabilmente integrare aspetti tecnici, finanziari e sociali fin dalla fase di pianificazione per tenere conto delle specificità dei singoli casi risolvendo il problema anche facendo leva sulla creatività.

2.2.3 La deep renovation nei progetti finanziati dall'UE: stato dell'arte

Diversi lavori si occupano della valutazione delle prestazioni energetiche ed economiche delle ristrutturazioni profonde che identificano *benchmark* comuni in termini di costi-benefici o mettono a confronto differenti scenari e forniscono approcci di ottimizzazione. Rispetto alle soluzioni tradizionali, l'adozione di sistemi di prefabbricazione per le ristrutturazioni profonde presenta diversi vantaggi. Questi vantaggi includono i risultati in termini di efficienza energetica e comfort degli appartamenti esistenti paragonabili ai nuovi edifici avanzati a basso consumo energetico (ad es., 30÷50 kWh/m²anno), costruzioni ottimizzate di alta qualità e basso costo, offrendo l'opportunità di creare nuovi e attraenti spazi abitativi.

Poiché l'obiettivo centrale è di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici attraverso pratiche di *deep renovation* la Commissione Europea ha promosso e promuove attivamente diversi programmi di finanziamento (Programma Horizon 2020, Life, ecc.) volti a individuare soluzioni efficaci e ha fissato, come valore di riferimento, un obiettivo minimo di risparmio di energia primaria del 60% rispetto allo stato di fatto. In questo contesto si è inserito un innovativo tema di ricerca dedicato alla definizione e all'analisi di pacchetti di *deep renovation*.

Molteplici sono i progetti finanziati dall'UE nell'ambito dei Programmi FP7 (Seventh Framework Programme) e Horizon 2020 nel periodo 2008-2020 che si occupano di soluzioni all'avanguardia in tema di *deep renovation* e sistemi prefabbricati, comprese le tecnologie avanzate e le strategie di rinnovamento sistematico e i servizi intelligenti utilizzati durante le fasi di progettazione, esecuzione e manutenzione del processo di retrofit.

L'analisi svolta si focalizza sulle metodologie avanzate inerenti agli aspetti di integrazione impiantistica.

Le fattibilità tecnica degli interventi di *deep renovation* è di grande importanza per il raggiungimento di risultati di elevata qualità. La revisione sulla fattibilità tecnica è spesso però limitata a casi specifici. Diversi lavori della letteratura recente si sono concentrati sullo studio di soluzioni tecnologiche di *deep renovation* e l'attenzione verte su pacchetti integrati per il miglioramento delle prestazioni e la riduzione di tempi e complessità degli interventi, combinando una serie di misure di rinnovamento per il pacchetto e il sistema HVAC. Tali pacchetti comprendono l'integrazione di involucri ad alta efficienza energetica con isolamento migliorato, elevata tenuta all'aria, controllo solare, gestione dell'umidità, ventilazione meccanica controllata e attrezzature, sistemi HVAC con ventilazione a recupero di calore dimensionati e integrati all'interno dell'involucro opaco e delle pareti, e componenti energetici attivi che incorporano le fonti rinnovabili.

Uno dei principali ostacoli all'adozione di misure di *deep renovation* è la garanzia di ottenere elevate prestazioni a fronte dell'elevato costo di investimento e della complessità operativa, e quindi il sistema prefabbricato è spesso integrato da sistemi di gestione degli edifici intelligenti (*Building Management System*, BMS) e ICT (*Information and Communication Technology*). Le tecnologie innovative coinvolte in questi progetti riguardano le facciate prefabbricate plug and play (PnP), il supporto alle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) per il sistema di gestione intelligente degli edifici (BMS), l'integrazione di sistemi di energia rinnovabile (*Renewable Energy Systems*, RES), il modello informativo dell'edificio (*Building Information Modeling*, BIM) e i modelli di simulazione delle prestazioni dell'edificio (*Building Performance Simulation Models*, BPSM), il riscaldamento, la ventilazione e il condizionamento dell'aria avanzati (HVAC), la geomatica avanzata, la stampa 3D e i connettori intelligenti (Tabella 16).

Tabella 16. Principali tecnologie innovative dei progetti UE in sistemi prefabbricati per *deep renovation*

Project	Pre-Fab	BMS-ICT	RES	BIM BPSM	Multi-Benefit	HVAC	Advanced Geomatics	3D Print	Smart Connector
A2PBEER		✓							
ABRACADABRA	✓		✓		✓				
ADAPTIVALL	✓								
BERTIM	✓			✓			✓		
BRESAER	✓	✓	✓						
BuildHEAT	✓	✓	✓		✓	✓			
CETIEB		✓							
E2ReBuild	✓								
E2EVENT	✓	✓	✓			✓			
EASIE	✓			✓			✓		
Eensulate	✓								
HERB	✓		✓			✓			
IMPRESS	✓							✓	✓
INSITER							✓		
INSPIRe	✓		✓						
MoeFS	✓	✓	✓						
MORE-CONNECT	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NewTRENDS				✓					
NoZeR					✓				
P2ENDURE	✓			✓		✓	✓	✓	
OptEimal	✓	✓		✓	✓		✓		
REFURB		✓	✓		✓	✓			
REinnovates	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
RetroKit	✓	✓	✓			✓			
RE4	✓	✓		✓			✓		
smarTES	✓		✓			✓			
TES	✓		✓			✓			
TransitionZero				✓	✓		✓	✓	✓
VEEP	✓						✓		✓
ZEBRA 2020					✓				
4RinEU	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

Come si può osservare, diversi progetti si concentrano su innovativi pacchetti HVAC ottimizzati ed integrati con pacchetti di retrofit prefabbricati per il rinnovamento più facile, meno invasivo e più efficiente delle installazioni HVAC esistenti.

La natura modulare dei sistemi prefabbricati consente la perfetta integrazione con i sistemi attivi per la produzione da fonti di energia rinnovabile (RES) come i pannelli solari termici (ST) e i sistemi fotovoltaici (PV).

Il BIM e lo scambio di informazioni con i modelli di simulazione delle prestazioni degli edifici (BPSM) sono emerse importanti come tecnologie abilitanti in soluzioni all'avanguardia per retrofit profondi verso nZEB, spesso in combinazione con la geomatica avanzata (scansione 3D) e tecniche di stampa 3D.

Tra questi progetti di ricerca MORE-CONNECT è quello che più si avvicina alla piena integrazione delle più avanzate tecnologie e approcci all'avanguardia combinati con sistemi modulari prefabbricati per la *deep renovation*.

2.2.4 Retrofit modulare di facciata

L'approccio ricercato nel retrofit delle facciate è spesso un approccio di tipo modulare. Per *Modular Façade Retrofit* (MFR) si intende l'insieme delle attività che prevedono il rinforzo, la riqualificazione e/o il montaggio di apparecchiature aggiuntive all'esterno di un involucro edilizio esistente mediante l'utilizzo di moduli prefabbricati con funzioni differenti.

Per le loro caratteristiche di realizzazione *off-site* e prefabbricazione, gli edifici modulari garantiscono migliore performance in termini di strutturali, tempi di costruzione ed efficienza energetica. Il retrofit modulare delle facciate con elementi prefabbricati è oggetto di molti studi di ricerca.

Nei progetti di ricerca e innovazione si rintraccia infatti una chiara tendenza all'introduzione di approcci modulari nel retrofit di facciata. La Figura 11 riporta lo schema di un modello modulare di struttura dell'involucro edilizio: ad ogni strato si attribuiscono materiali e spessori, permettendo di individuare molteplici soluzioni di modularizzazione.

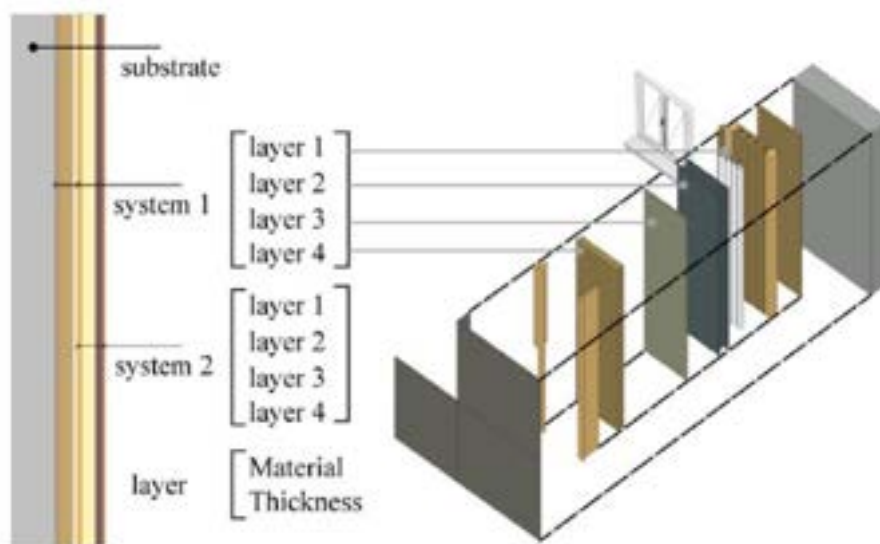


Figura 11. Modello di struttura dell'involucro edilizio

La *Retrofit Module Design Guide*, il manuale di progetto dell'IEA ECBCS Annex 50 sui "sistemi prefabbricati per il rinnovo di edifici a basso consumo energetico e ad elevato comfort", rappresenta un riferimento esemplare con quattro diversi approcci di progettazione e produzione di moduli prefabbricati per il retrofit di facciata con strategie e casi studio.

Sulla base delle indicazioni della guida sono stati condotti studi e ricerche che hanno permesso di catalogare all'interno di un database un consistente numero di casi studio di modelli di retrofit modulare di edifici esistenti residenziali e non svolti nell'ambito dei progetti di ricerca, in funzione di specifici criteri (struttura di facciata, caratteristiche costruttive, ubicazione geografica, applicazione, ecc.). Dai risultati dell'analisi delle informazioni (circa 300 progetti internazionali) emerge che la maggior parte dei progetti di retrofit dell'involucro edilizio in Europa si concentra sull'edilizia residenziale. I modelli di retrofit sfruttano diverse strategie, tra cui il ricorso a materiali isolanti, specialmente per l'edilizia residenziale, in più del 90% degli edifici residenziali mentre per le tipologie di architettura non residenziale i metodi di retrofit ad alta efficienza energetica si concentrano spesso sulle finestre o sulla struttura portante anziché sull'integrazione di materiali isolanti. La Figura 12 identifica due modelli di strutture ricorrenti.

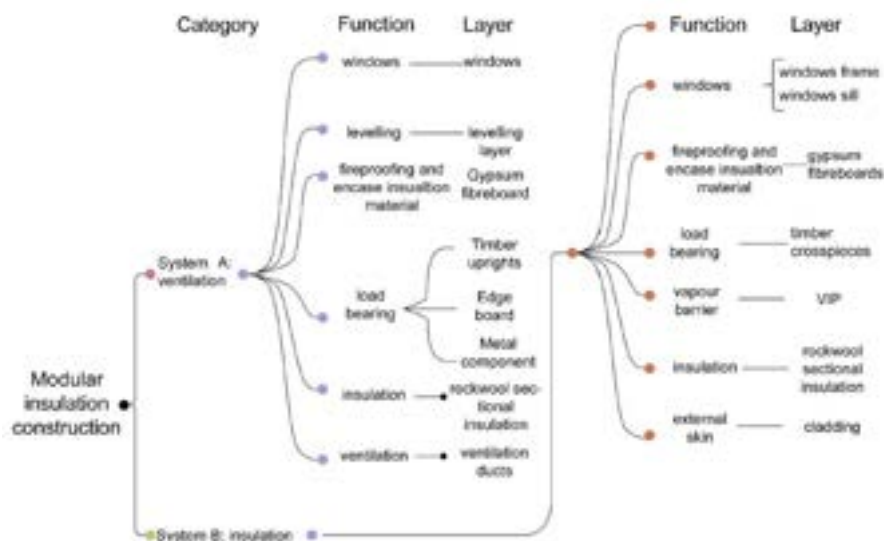


Figura 12. Modello funzionale di retrofit modulare di facciata

La Figura 13 presenta un prototipo di struttura di facciata per la ristrutturazione dell'involucro edilizio sulla base delle indicazioni della *Retrofit Module, Design Guide*. La struttura risulta suddivisa in più layer (caratterizzati univocamente da materiale, spessore e/o trasmittanza termica) sulla base delle rispettive funzioni: mentre le funzioni fondamentali e quindi i relativi layer (finestre, strati portanti, isolamento, pelle esterna) sono sempre presenti, un numero crescente di layer possono essere progressivamente integrati nell'involucro con l'obiettivo principale di migliorare l'efficienza dell'isolamento.

Nel caso di *deep renovation* i moduli retrofit includono spesso strutture come i condotti di ventilazione degli impianti HVAC.

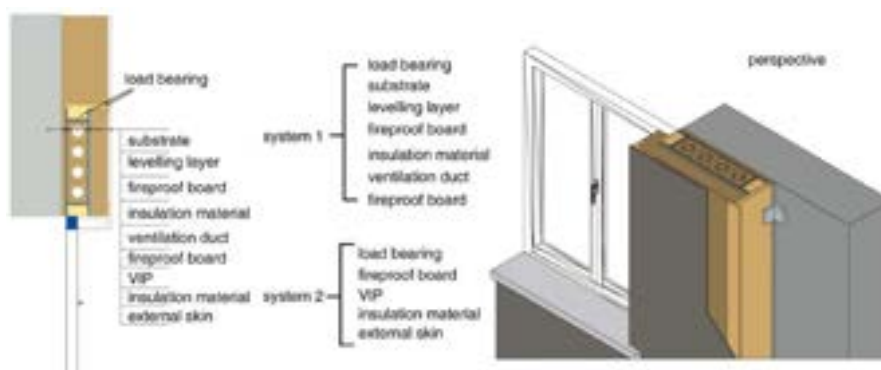


Figura 13. Prototipo di struttura modulare per il retrofit di facciata

Dal punto di vista della capacità di isolamento termico un condotto di ventilazione racchiuso dal materiale isolante contribuisce a diminuire in modo significativo l'intera capacità di isolamento della costruzione, indipendentemente dal tipo di sistema.

Dal punto di vista dei costi di retrofit la ricerca IEA ECBCS Annex 50: Prefab Systems for Low Energy/High Comfort Building Renewal del 2010 quantificava un costo di retrofit di circa 1.000 €/m² di facciata (IEA, 2012). Per casi di studio relativi ad alcuni dei più recenti progetti europei citati il costo medio del retrofit è stimabile in 400÷900 €/m² di facciata ristrutturata tenendo conto delle differenze nel mercato edilizio locale che possono influenzare il costo totale dei lavori fino al 20% (Andaloro et al., 2019) a testimoniare che il crescente interesse e lo sforzo progettuale in direzione dei sistemi prefabbricati per il retrofit di facciata vanno a favore di una riduzione dei costi.

Recentemente si è assistito all'evoluzione del retrofit modulare di facciata che integra tecnologie a fonti rinnovabili (*Modular Façade Retrofit with Renewable energy technologies*, MFRRn) approccio che integra in facciata tecnologie di isolamento termico e utilizzo di energia solare (termico, fotovoltaico, eolico). Sebbene lo scopo principale sia di migliorare l'efficienza energetica dell'edificio e ridurre le emissioni, il retrofit può integrare anche funzioni di isolamento acustico, miglioramento estetico e adeguamento sismico (ad es. l'isolamento acustico e la resistenza al fuoco possono essere ottenuti applicando materiali termoisolanti che soddisfino i relativi requisiti).

Le soluzioni tecnologiche di tipo MFRRn sono state notevolmente sviluppate nell'ultimo decennio grazie al sostegno della Commissione Europea (con almeno 14 progetti di ricerca e innovazione finanziati dalla Commissione) e agli investimenti delle aziende. La maggior parte di questi progetti hanno intrapreso sette fasi di sviluppo: progettazione concettuale e supporto alle decisioni, struttura modulare di facciata e sistema di fissaggio, isolamento termico e relativo fissaggio, integrazione di moduli rinnovabili, test di sicurezza e conformità alle normative, sistema di gestione dell'energia e interfaccia utente, dimostrazione e valutazione. Non tutti i progetti hanno però completato tutte e sette le fasi, a causa di vincoli temporali e di risorse.

I primi progetti hanno fatto notevoli progressi nel processo decisionale mediante l'utilizzo del software di simulazione dinamica EnergyPlus per esplorare le prestazioni dell'intero sistema. Nel periodo 2013-2017 sono stati esplorati i diversi materiali del telaio, i metodi di fissaggio, la progettazione architettonica e la selezione di moduli a fonti rinnovabili. All'interno di questi progetti sono stati effettuati anche test di sicurezza e di conformità alle normative. Le dimostrazioni sono iniziate in ambiente di laboratorio e gradualmente applicate a una parte di un edificio pilota, a un edificio completo e a più edifici.

Nei progetti più recenti invece il focus si è spostato sui modelli di business e le prospettive dell'economia circolare (ad es. nei progetti 4RinEU, PLUG-N-HARVEST). Sono stati proposti modelli per l'ottenimento di marchi, licenze, modelli di leasing e peer-to-peer trading. Le relative piattaforme ICT, che consentono l'analisi del trading e dell'economia circolare, sono la parte centrale dello sviluppo in corso nel settore.

2.2.5 Tipologie di sistemi modulari

I criteri di progettazione rintracciabili nei progetti di retrofit modulare di facciata afferiscono a tre tipologie:

- sistemi modulari a strati (*layer-based modular system*)
- sistemi modulari a telaio (*frame-based modular system*)
- sistema modulare misto, combinazione tra le due tipologie di sistemi precedenti

La differenza principale tra sistema a strati e sistema a telaio è il modo in cui il materiale isolante e i componenti rinnovabili sono fissati alla facciata esistente.

2.2.5.1 Sistema modulare *layer-based*

Il sistema modulare a strati (*layer-based*) consiste nel fissare la struttura portante, il materiale isolante e i componenti rinnovabili uno strato alla volta.

Tale sistema permette di limitare i ponti termici ma a causa delle limitazioni di peso non si adatta al retrofit di edifici di grande altezza. A titolo di esempio il progetto ADAPTIWALL adotta un sistema modulare *layer-based* che utilizza uno strato di calcestruzzo per sopportare il carico strutturale (Figura 14).



Figura 14. Progetto ADAPTIWALL – Pannello multifunzionale

2.2.5.2 Sistema modulare *frame-based*

Nel sistema modulare a telaio (*frame-based*) il materiale isolante e i componenti che sfruttano le fonti rinnovabili sono entrambi circondati da telai a griglia fissati direttamente alla facciata esistente o sullo strato di calcestruzzo livellante che aiuta ad affrontare le superfici irregolari degli edifici esistenti.

Il sistema modulare *frame-based*, contrariamente al sistema a strati, permette una notevole riduzione di peso e di spessore della parete, ma a causa del materiale utilizzato il telaio costituisce un potenziale ponte termico che riduce le performance energetiche della struttura.

Nel progetto PLUG-N-HARVEST, ad esempio, è utilizzato un innovativo sistema a telaio in alluminio per l'interruzione del ponte termico). I progetti MEEFS RETROFITTING, 4RinEU e PLUG-N-HARVEST adottano un sistema a telaio in alluminio, polimero rinforzato o legno per contenere i moduli multifunzionali per il riscaldamento e generazione di energia (Figura 15).

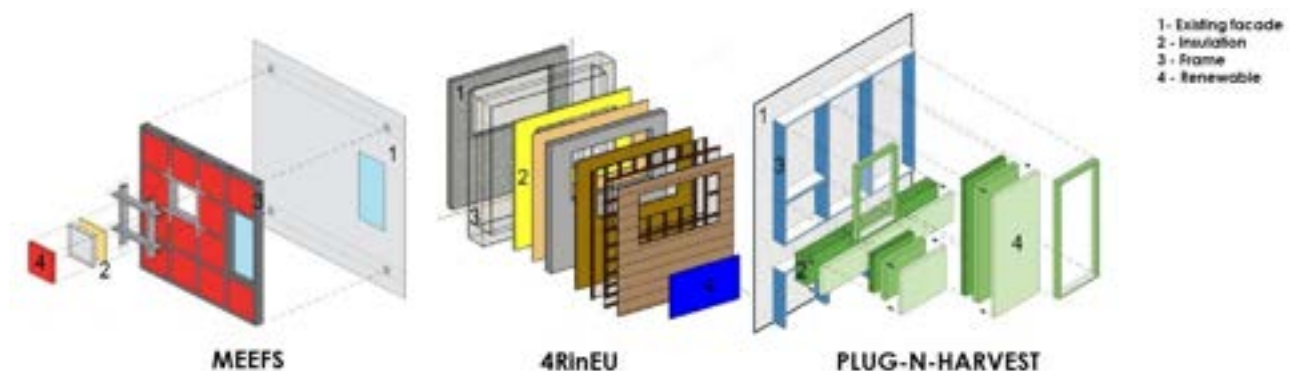


Figura 15. Design concept dei pannelli prefabbricati a telaio

2.2.5.3 Sistema modulare misto

L'approccio combinato dei due sistemi consente di posizionare uno strato continuo di isolamento tra il telaio portante e la facciata esistente permettendo di ridurre significativamente l'area di contatto tra facciata esistente e telaio metallico, ma non consente di eliminare il ponte termico a causa delle staffe metalliche necessarie al fissaggio del telaio che porta lo strato isolante (Figura 16).

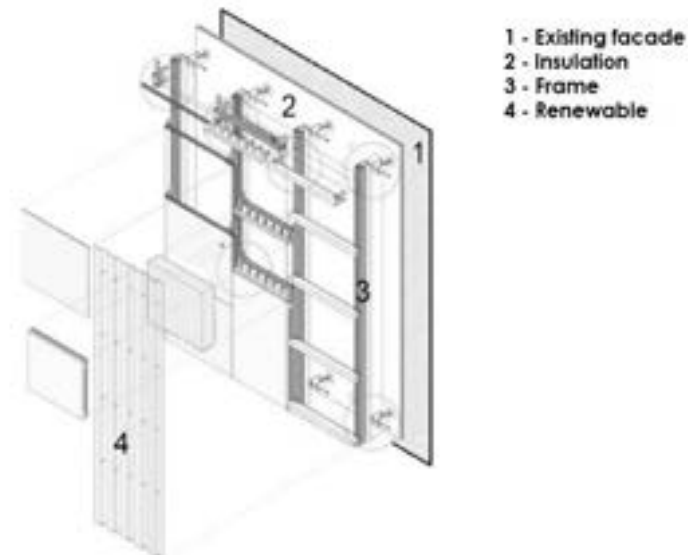


Figura 16. Progetto BRESAER – Schema di pannello prefabbricato modulare con sistema misto

2.2.6 Pannelli a parete prefabbricati: classificazione e aspetti funzionali

I sistemi di pannelli a parete prefabbricati (*Prefabricated Enclosure Wall Panel Systems, PEWPS*) vengono spesso utilizzati per ragioni economiche e/o estetiche. Tuttavia, la tecnologia coinvolta in questi sistemi ha il potenziale per massimizzarne i vantaggi funzionali, contribuendo a strategie sostenibili basate su involucri edilizi ad alte prestazioni.

Gli edifici sono i maggiori utilizzatori di energia nella nostra società, e l'involucro edilizio contribuisce in modo significativo al fabbisogno energetico e al comfort interno con un notevole potenziale per le facciate di aumentare l'efficienza energetica e ridurre la *carbon footprint* dell'edificio durante il funzionamento.

Per raggiungere questi obiettivi notevoli sono le ricerche in ambito recente su diversi aspetti, in particolare circa la selezione e sviluppo dei materiali, come gli eco-materiali, i materiali a cambiamento di fase (*phase change material, PCM*), i rifiuti da costruzione e demolizione (*construction and demolition waste, CDW*), e tecnologie innovative emergenti nella progettazione di facciate (pareti verdi, biomimetismo, tecnologie solari, ecc.).

Inoltre, sono state pubblicate numerose linee guida, codici e standard per supportare i progettisti nella selezione dei materiali, dei sistemi costruttivi e delle corrispondenti metodologie di prova al fine di soddisfare i requisiti prestazionali adeguati alle diverse condizioni climatiche.

Le caratteristiche applicabili e i principi di progettazione ingegneristica per le strutture di facciata, indipendentemente dall'origine dei materiali utilizzati, tengono conto di quattro caratteristiche interdipendenti applicabili all'involucro, organizzate in ordine decrescente di importanza in termini di percezione del comfort:

- Funzionali: *building skin*, comfort indoor, protezione, vista;
- Costruttive: scelta di elementi/componenti, materiali e metodi di montaggio;
- Formali: valore estetico, risposta culturale e contestuale, adattamento alle facciate esistenti;

- Sostenibilità ambientale: consumo di energia e di materiali in fase di costruzione, uso e demolizione (*life cycle*).

È stato proposto un interessante sistema di classificazione dei PEWPS opachi utile in fase di progettazione nella comprensione dei parametri costruttivi e funzionali.

La Figura 17 riassume in forma grafica gli aspetti da considerare nel piano o in direzione ortogonale al piano di facciata (Lopes et al., 2018).

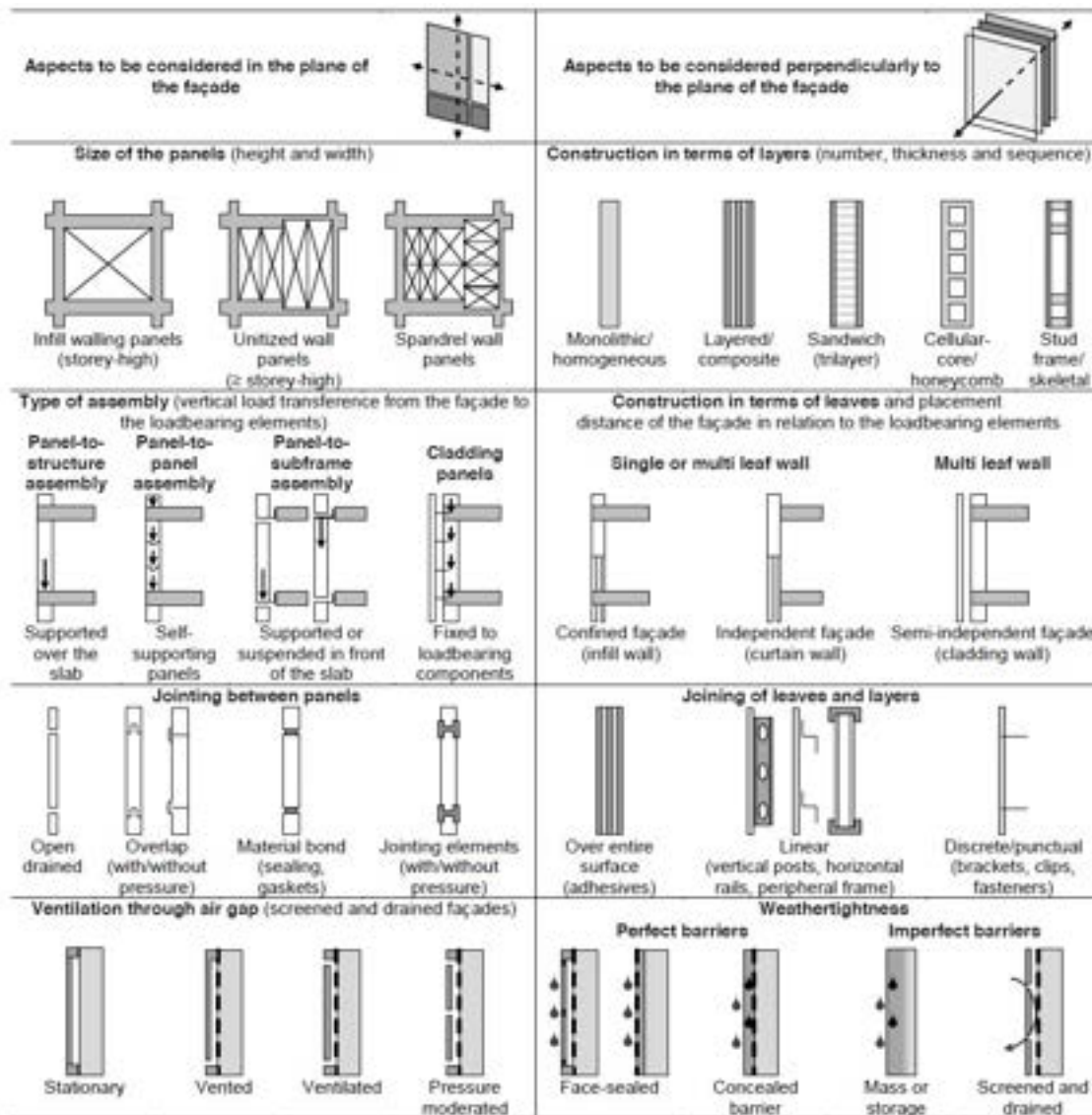


Figura 17. Tavola sinottica di classificazione dei PEWPS [fonte: Lopes et al., 2018]

La Figura 18 illustra un interessante e utile sistema di classificazione completo dei PEWPS opachi secondo molteplici criteri costruttivi e funzionali (Lopes et al.). Sebbene sul mercato siano disponibili innumerevoli soluzioni commerciali, a scopo di confronto sono considerate sei tipologie di PEWPS più rappresentative e comuni in ordine di peso decrescente:

- pannelli prefabbricati in cemento armato
- pannelli isolanti strutturali (SIP)
- pannelli leggeri compositi autoportanti

- pannelli per facciate continue
- pannelli a struttura leggera
- pannelli di rivestimento/antipioggia (facciata ventilata)

Common PEWPS (organized by decreasing order of weightiness)

Pre-cast concrete wall panels
Structurally insulated panels (SIPs)
Self-supporting composite lightweight panels
Curtain wall panels
Light-frame wall panels
Rainscreen/cladding panels (ventilated façades)

Correspondence:
● usual (or binding)
○ possible (or optional)

Classification criteria	Classification methods	Classification results								
Constructional	Structural role	Non-loadbearing		●	●	●	●	○	○	
		Loadbearing		●				●	●	
	Size of the panels (and degree of prefabrication of the system)	Infill walling panels			●				●	●
		Unitized wall panels			○	●	○	●	●	
		Spandrel wall panels		●		●	●			
		Stick-built wall panels			●	●				
	Weight	Heavyweight							○	●
		Lightweight		●	●	●	●			
	Type of assembly	Panel-to-structure assembly			●				○	●
		Panel-to-panel assembly			●	○	●	●	●	
		Panel-to-subframe assembly				●				
		Cladding panels		●						
	Construction in leaves	Single leaf			●	●	●	●		
		Multiple leaves		●	○		●			
Construction in layers	Single layer		●		●	●			●	
	Multiple layers	Layered (or composite)		○				●		
		Sandwich (or trilayer)						●	●	○
		Cellular-core (or honeycomb-core)		○				○	○	
	Stud frame (or skeletal)			●						
Functional	Ventilation	Without air cavity			●	●	●	●		
		With air cavity	Stationary		○	○	○			
			Ventfed		○					
			Ventilated			●				
	Pressure-moderated (or equalized)			●		○				
	Weathertightness	Perfect barriers (barrier walls)	Face-sealed		○	●	●	●	○	○
			Concealed barrier							○
		Imperfect barriers	Mass or storage systems							○
			Screened and drained walls		●					
	Insulation layer/core	None		●		○	○		●	
Yes, but not specific to the panel			○			○				
Yes, specific to the panel			●	○	●	●				

Figura 18. Classificazione dei PEWPS secondo criteri funzionali e costruttivi [Lopes et al., 2018]

2.2.7 Sistemi modulari multifunzionali prefabbricati PnP per il retrofit di facciata: mercato di riferimento

Nonostante la mancanza di dati coerenti e precisi sui tassi di ristrutturazione degli edifici in tutta Europa, si stima che il mercato delle ristrutturazioni rappresenti il 57% di tutte le attività di costruzione. All'interno di questo valore circa il 65% è rappresentato da edifici residenziali.

In questo scenario, considerando che gli edifici esistenti sono quelli che consumano più energia, la ristrutturazione rappresenta la strategia chiave per raggiungere gli obiettivi energetici dell'UE, con una delle seguenti strategie edilizie:

- *Ristrutturazioni leggere* (riqualificazione): coprono circa l'85% del mercato con attuazione di 1 o 2 misure (ad es. installazione di nuovo generatore di calore) con conseguente riduzione dei consumi energetici stimato tra 0÷30% (costo medio 60 €/m²);
- *Ristrutturazioni "moderate"*: coprono circa il 10% del mercato e prevedono l'attuazione da 3 a 5 interventi di miglioramento (ad es. isolamento di parti rilevanti più nuova caldaia) con conseguente riduzione dei consumi energetici nell'ordine del 30÷60% (costo medio 140 €/m²);

- *Ristrutturazioni profonde (deep renovation)*: coprono circa il 5% del mercato e riguarda un pacchetto di misure sinergiche che portano ad una riduzione energetica del 60÷90% (costo medio 330 €/m²);
- *Ristrutturazioni nZEB*: comportano la sostituzione o l'aggiornamento di tutti gli elementi con impatto sull'uso dell'energia, così come l'installazione di tecnologie a fonti rinnovabili al fine di ridurre i consumi energetici e i livelli di emissione di carbonio a livelli prossimi allo zero (costo medio 580 €/m²).

I moduli prefabbricati sono studiati per offrire diversi livelli di ristrutturazione con una quota stimata del 20÷40% nell'intera ristrutturazione dell'edificio esistente.

La progettazione e la produzione di moduli prefabbricati e personalizzabili offrono l'opportunità di controllare i costi e i risultati di efficienza energetica per rispondere alle specifiche on-demand.

All'interno del mercato del retrofit energetico dell'Unione europea – valutato in circa 109 miliardi di euro nel 2015 – si stima che l'investimento annuale possa crescere dai 12 miliardi di euro del 2014 a 60 miliardi di euro per raggiungere i target di miglioramento dell'efficienza energetica fissati dall'UE al 2030. Tuttavia, il raggiungimento di questo obiettivo richiederebbe che i tassi di ristrutturazione salgano a quasi il 3% dall'attuale 1%; le soluzioni prefabbricate giocano pertanto un ruolo chiave in questo processo (Artola et al.).

Nonostante questo scenario di mercato favorevole molte sono le barriere all'ingresso nel mercato, tipiche delle caratteristiche del mercato delle ristrutturazioni. Molteplici sono le sfide tecniche, finanziarie e sociali che influenzano soprattutto lo sviluppo e la diffusione dei sistemi MFRRn. I costi, gli aspetti tecnici, normativi, culturali sono elementi da considerare che influenzano l'introduzione di soluzioni prefabbricate in un mercato locale così come l'applicazione dei moduli in uno specifico edificio. La progettazione e la fabbricazione dei moduli prefabbricati, le loro caratteristiche e il loro potenziale di installazione, sono influenzati dalle seguenti barriere:

- Barriere tecniche: caratteristiche degli edifici diverse (materiali, dimensioni, prestazioni); edifici con involucri "complessi" (ad es. grande superficie vetrata, ombreggiamenti a sbalzo, pluviali, grondaie, superfici murarie irregolari, balconi e prese di ventilazione); mancanza ed elevato costo delle soluzioni tecniche; complessità dell'integrazione dei componenti e il collegamento sicuro di cavi, condotti e tubazioni; tecnologie rinnovabili in rapida evoluzione e le loro vite limitate rispetto a quella degli edifici; disponibilità di software "collaborativo" utilizzato dagli attori coinvolti (architetti, produttori e appaltatori); mancanza di conoscenza da parte dei professionisti delle costruzioni;
- Barriere di processo: frammentazione della *supply chain*; sviluppo di modelli di business innovativi o adattamento di quelli esistenti;
- Barriere finanziarie: costi più elevati di ristrutturazione (in caso di utilizzo delle fonti rinnovabili e dei sistemi di storage); accesso ai finanziamenti; basso prezzo dell'energia;
- Vincoli normativi: norme edilizie e loro aggiornamenti; requisiti di prestazione; molteplici definizioni per la ristrutturazione; quadro regolatorio diverso per i vari Stati Membri; regimi di sostegno;
- Barriere sociali e di conoscenza: scarsa *awareness* sui benefici; carenza di informazioni sul comportamento degli utenti, sulle migliori pratiche; resistenza al cambiamento di parte dell'industria edile, imprese e utenti finali; conflitto tra bisogni collettivi e individuali.

Tali barriere devono essere considerate dall'industria delle costruzioni per definire le specificità del mercato locale di riferimento al fine di creare strutture commerciali e tecniche per affrontare ogni specifica questione.

La ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente è attualmente una delle questioni principali solo nell'Unione Europea e non è un tema centrale di interesse nell'agenda edilizia americana o asiatica. I mercati extra-europei sono carenti di strategie di ristrutturazione e l'Europa potrebbe anticiparne le esigenze future.

L'identificazione dei principali attori di mercato è difficile da stabilire. Infatti, il mercato delle costruzioni per le opere di ristrutturazione è composto principalmente da PMI e microimprese che operano in aree specifiche, rispondendo a progetti *on-demand*. Il mercato delle costruzioni è tradizionalmente composto da

numerose micro/piccole imprese con soluzioni tecnologiche specifiche per il mercato di riferimento, la tipologia e la dimensione dell'edificio, il modello di proprietà, i sistemi tecnologici adottati, basati principalmente su soluzioni personalizzate in cantiere. Queste piccole imprese attive come forza lavoro in cantiere dovrebbero riposizionarsi per cogliere un segmento di mercato completamente nuovo basato sulla prefabbricazione *off-site* con costi di investimento iniziali elevati.

I principali operatori leader del settore sono quelli attivi su soluzioni prefabbricate e con capacità economica per competere nell'ambito di questo mercato grazie alla propria struttura commerciale in grado di operare su grandi progetti, all'esperienza tecnica maturata nella produzione di sistemi prefabbricati e alle attività di produzione *off-site*. Si citano a livello europeo a titolo di esempio: Felix Constructions, Gartner, GIG, Lindner, Seele, Pichler, Freiner & Reifer, Riko, Waagner Bio, Webo, Welement (*off-site timber construction*, OSC), Yuanda. A livello italiano si segnala Permasteelisa Group.

Il confronto tra questi *market player* è difficile perché operano in paesi diversi. Anche la descrizione dei prodotti e del relativo costo non è fattibile a causa della natura dei progetti *custom-tailored* che utilizzano materiali e prodotti *on-demand* rispondendo a specifiche richieste architettoniche e tecniche.

Il progetto di Ricerca di Sistema mira a individuare una combinazione di moduli con l'utilizzo di prodotti disponibili sul mercato e il loro consolidamento per essere parte di un sistema di unico. Le soluzioni verranno selezionate con analisi multicriteriale e rappresenteranno un unicum in fatto di deep renovation.

2.2.8 Retrofit modulari con pannelli prefabbricati per isolamento termico senza integrazione impiantistica

Il progetto EASEE (*Envelope Approach to improve Sustainability and Energy Efficiency in existing multi-storey multi-proowner residential buildings*), finanziato nell'ambito del FP7, ha rappresentato un primo esempio di retrofit modulare di facciata che però non coinvolge l'integrazione dei servizi tecnici dell'edificio.

Il pannello isolante prefabbricato è stato sviluppato per ridurre i tempi di retrofit e garantire un adeguato risparmio energetico riducendo la trasmittanza termica dell'involucro.

Il pannello ha forma rettangolare di grande superficie ($L=0,5 \div 1,5\text{m}$; $H=1,5 \div 3,0\text{m}$), è composto da due strati esterni in calcestruzzo tessile (*textile reinforced concrete*, TRC) di spessore 1,4 cm ciascuno e da uno strato isolante interno in EPS (spessore 10 cm) per uno spessore totale dei pannelli di 12,8 cm (aumentabile se necessario). I pesi sono relativamente contenuti (circa 54 kg/m^2) con vantaggio sulla velocità di montaggio, poiché l'installazione non necessita di ponteggi, ma solo l'uso di gru a ruote.

Il pannello può essere applicato su lastre di calcestruzzo o blocchi di mattoni/calcestruzzo cellulare, migliorando notevolmente le loro proprietà termiche (trasmittanza finale inferiore a $0,23\text{W/m}^2\text{K}$). I dati e le termografie eseguite nelle attività di ricerca hanno dimostrato che il pannello attenua il flusso termico riducendo dispersioni e attenuando i ponti termici. In particolare, la campagna di monitoraggio effettuata ha mostrato una diminuzione del valore di trasmittanza del 65%. Il sistema di ancoraggio permette una rapida installazione (50% più rapida rispetto al retrofit tradizionale), flessibilità e adattabilità a diverse configurazioni architettoniche e tipologie costruttive.

Il tempo medio di posa di 1 m^2 di pannelli EASEE da $0,5 \times 1,5\text{m}$ per l'edificio dimostrativo presso il sito di Danzica è stato di circa 25 minuti ($1\text{h} = 2,5\text{m}^2$) valido per parete dell'edificio privo di finestre, senza considerare neanche le finiture ad angolo. In confronto, l'installazione di 1m^2 dei sistemi basato a cappotto (*External Thermal Insulation Composite System*, ETICS) con applicazione manuale del materiale isolante EPS, rete e intonaco, richiede circa 120 minuti ($1\text{h} = 0,5 \text{ m}^2$) con l'obiettivo di mantenere il tempo di installazione per il pannello di 1m^2 inferiore a 1 ora per parete con finestre (ossia il 50% rispetto a installazione di sistemi ETICS). Alcuni miglioramenti hanno riguardato l'economicità e rapidità di produzione (prezzo del pannello finito inferiore a 150 €/m^2), l'incremento delle prestazioni termiche per soddisfacimento nuovi requisiti ($U < 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$), la disponibilità di forme diverse da quella rettangolare per una migliore resa estetica e riduzione del tempo di installazione. I sistemi di ancoraggio sono di tipo meccanico o chimico a seconda delle condizioni dell'edificio da sottoporre a retrofit (ancoraggi Halfen, partner tecnico di progetto).

Il caso studio di retrofit in Italia ha riguardato un edificio della Agenzia Lombarda per l'Edilizia Residenziale (ALER) risalente agli anni '70 con valore di trasmittanza prima del retrofit pari a circa $0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$ che con l'installazione di 186 pannelli EASEE ha raggiunto a seguito del retrofit $U=0,238 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Figura 19).



Figura 19. Progetto EASEE – Retrofit di edificio dimostrativo ALER a Milano

Riguardo all'importante aspetto del dimensionamento e della scelta dei supporti, i carichi verticali sono rappresentati principalmente dal peso del pannello: più piccolo è il pannello, minore il peso e il relativo carico verticale che deve essere sostenuto dagli ancoraggi.

Nel caso della facciata di prova di Milano ($H=3,2\text{m}$; $L\leq 1,5\text{m}$) è stato effettuato un calcolo a campione, considerando la larghezza massima ($1,5\text{m}$) e quindi la situazione peggiore. Il peso specifico di un pannello (strati di TRM, *textile reinforced mortar* più EPS) è pari a 54 kg/m^2 . Tenendo conto dell'area di carico degli ancoraggi, il peso totale del pannello da sostenere con gli ancoraggi è di 260 kg/pannello . Poiché, in generale, devono essere considerati due diversi ancoraggi per i carichi verticali, sono stati previsti due ancoraggi nella parte inferiore del pannello, in grado di sostenere 130kg/ancoraggio .

I carichi orizzontali per la progettazione degli ancoraggi sono principalmente di due tipologie:

- Per i carichi del vento nel caso della facciata di prova sono state considerate due diverse situazioni, tenendo conto di valori e formule riportate al DM 01/08 "Norme tecniche per le costruzioni": nel sito di Milano la pressione del vento è di circa 80kg/m^2 per cui il carico è pari a 384 kg/pannello . La forza di aspirazione del vento è di 154 kg/pannello . Nella situazione peggiore (pressione del vento di 150 kg/m^2) la pressione è di 288 kg/pannello ;
- I carichi sismici sono considerati rilevanti in particolari regioni considerando le relative combinazioni di carichi che massimizzano il loro effetto.

Le modalità di ancoraggio dei pannelli sono evidenziate in Figura 20.



Figura 20. Progetto EASEE – Ancoraggio dei pannelli in facciata [fonte: Halfen]

2.2.9 Retrofit modulari di facciata con pannelli prefabbricati ad elevata integrazione impiantistica

La preinstallazione all'interno dei pannelli dei dispositivi di ventilazione, cavi e condotti contribuisce a processi di ristrutturazione rapidi ed efficienti, poiché non è necessario demolire le pareti interne, le travi o altri elementi edilizi. Infatti, l'applicazione di pannelli multifunzionali permette di mantenere l'edificio nello stato di fatto e di trasferire i sistemi di alimentazione (aria, acqua, energia elettrica, ecc.) all'esterno, alloggiati nello strato edilizio isolato.

Alcuni progetti hanno sviluppato dei sistemi che nel pacchetto prevedono l'alloggiamento dei componenti HVAC.

Uno dei vantaggi principali, ma anche una sfida tecnica nelle ristrutturazioni modulari, è legata alla all'integrazione impiantistica soprattutto a livello degli impianti di ventilazione. Poiché l'edificio, a seguito della ristrutturazione, necessita spesso di un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC), è importante individuare la migliore soluzione per il posizionamento dei condotti di ventilazione.

Nelle ristrutturazioni profonde (*deep renovation*) spesso solo il sistema di ventilazione meccanica centralizzata può garantire un uso razionale del calore di scarico e fornisce risultati di minor consumo energetico. Pertanto, il problema nasce nel posizionamento dei condotti di ventilazione.

2.2.9.1 Aspetti di integrazione impiantistica in sistemi modulari multifunzionali prefabbricati

Nel caso di retrofit energetico e sismico che interessi edifici multipiano, il requisito della leggerezza dei moduli è molto importante.

Si riportano alcune interessanti esperienze di ricerca nella progettazione di sistemi prefabbricati modulari nelle due versioni:

- Sistemi a telaio in legno (*timber-frame*)
- Sistemi a telaio metallico (*aluminium-frame*)

I sistemi a telaio in legno contribuiscono inoltre all'ulteriore vantaggio di immagazzinare minore energia per la realizzazione (valore di *embodied energy* per il legno molto basso se rapportato ad altri comuni materiali impiegati nelle costruzioni).

2.2.9.1.1 Pannello modulare MORE-CONNECT

Il progetto europeo MORE-CONNECT (*Development and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for Modular Retrofitting and CONNECTIONs*) ha sviluppato un sistema di moduli prefabbricati con telaio in legno (*timber-frame*) per il retrofitting di facciate e tetti e procedure standard applicabili per il retrofit completo o parziale, con l'obiettivo dichiarato di:

- ridurre fino all'80% il consumo di energia primaria di un tipico edificio residenziale
- ridurre i tempi di installazione in loco a meno di due settimane
- migliorare la qualità dell'ambiente indoor

I requisiti per le dispersioni termiche dell'involucro edilizio variano a seconda delle esigenze di clima interno e delle prestazioni energetiche nel Paese specifico (e i relativi calcoli sono effettuati sulla base di metodologie di calcolo energetico nazionali), del clima esterno, della disponibilità di energia rinnovabile e della tipologia dell'edificio.

I Paesi coinvolti nel progetto sono: la Danimarca, Estonia, Lettonia, Repubblica Ceca, Portogallo e Paesi Bassi; il progetto ha infatti come obiettivo quello di sviluppare una serie di soluzioni adatte a differenti tipi di abitazioni site in differenti zone climatiche.

MORE-CONNECT si concentra su miglioramenti significativi dei processi di pre-produzione e di produzione delle soluzioni sviluppate per migliorare l'efficienza produttiva complessiva e ridurre i costi di produzione. Gli strumenti principali includono la scansione 3D automatizzata degli edifici, il processo di pre-produzione

completamente digitalizzato e la creazione di dati di fabbricazione automatizzata dei moduli. Allo stesso tempo, il progetto implementa un sistema di controllo di qualità sull'intero processo di progettazione, pre-produzione, produzione e installazione. In tale contesto il ricorso al BIM grazie alla modellazione parametrica, permette di valutare i risultati delle analisi preliminari delle prestazioni energetiche degli edifici e, successivamente, di coordinare processi complessi e dispendiosi in termini di tempo in modo più semplice, rapido ed economico. Uno dei componenti chiave nella soluzione di questo problema è la rapida e precisa acquisizione della geometria dell'edificio con ricostruzione di modelli geometrici 3D per l'analisi energetica e la progettazione strutturale dei sistemi di isolamento. I dati di scansione laser grezzi acquisiti in cantiere vengono post-processati con software dedicato per poter essere importati dal software BIM.

L'elevato livello d'integrazione impiantistica sviluppato nell'ambito del progetto si può osservare nella interessante soluzione sviluppata nel caso studio realizzato in Repubblica Ceca. In Figura 21 si riporta uno schema degli elementi di base dei moduli: il modulo standard a parete nella parte superiore e il modulo base nella parte inferiore.



Figura 21. Progetto MORE-CONNECT – Schema del modulo standard prefabbricato

Per quanto riguarda l'alloggiamento dei condotti di ventilazione, come si osserva in Figura 22, la soluzione consiste nel collocare i condotti all'interno del pannello modulare prefabbricati che garantiscono un'installazione accurata con dispendio di tempo minimo.

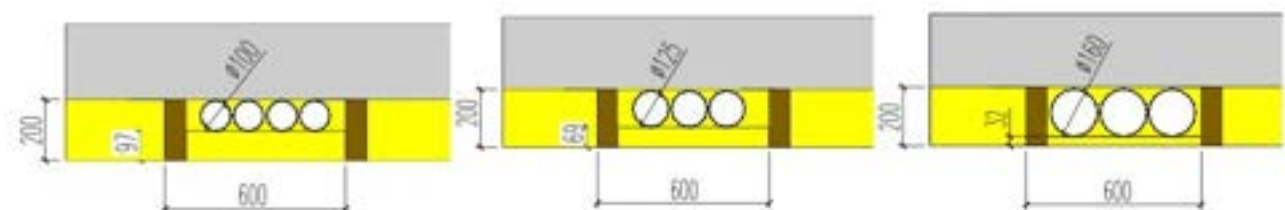


Figura 22. Progetto MORE-CONNECT – Integrazione di condotti di ventilazione nei pannelli

Una problematica riguarda la riduzione del valore di trasmittanza termica nella collocazione dei condotti all'interno della parte isolante dell'involucro esterno: i condotti non devono essere troppo grandi e/o lo strato coibente deve essere sufficiente.

Al tempo stesso, poiché che i condotti di ventilazione sono posizionati all'esterno dell'involucro dell'edificio, la velocità dell'aria in essi consentita potrebbe essere aumentata rispetto alla situazione in cui siano posizionati all'interno dei locali. Anche l'aria che attraversa i condotti viene preriscaldata dall'unità di trattamento aria (UTA) e quindi il calore teorico che si perde attraverso l'involucro dell'edificio è in pratica nullo in quanto non esiste gradiente di temperatura tra l'interno e l'esterno. I condotti possono essere facilmente integrati in pannelli prefabbricati con spessore di 200 mm. Tale spessore di isolamento termico assicura un valore U approssimativo di $0,18\text{W/m}^2\text{K}$ (Figura 23).



Figura 23. Progetto MORE-CONNECT – Unità dimostrative di soluzioni integrate di condotti di ventilazione

Nell'ambito del progetto MORE-CONNECT sono stati sviluppati connettori intelligenti (*smart connector*) allo scopo di limitare i tempi effettivi di ristrutturazione in loco. Si ritiene che adottando un alto livello di prefabbricazione e l'uso di connettori intelligenti (meccanici, idraulici, ad aria, termici, elettrici, ICT), il tempo effettivo di ristrutturazione in cantiere possa essere ridotto ad un massimo di cinque giorni con l'obiettivo di una media di due giorni, compresa la rimozione completa o parziale delle facciate e delle coperture esistenti o di altri elementi. Tali connettori intelligenti dovrebbero dare agli elementi modulari un carattere "plug and play". L'obiettivo principale per i connettori dell'aria e i connettori idraulici è quello di consentire la canalizzazione integrata dell'aria e il collegamento dei sistemi integrati di riscaldamento/raffreddamento delle emissioni al motore HVAC (un particolare sistema sviluppato nel corso del progetto).

L'ermeticità dei moduli prefabbricati è garantita da giunti prefabbricati a tenuta d'aria del telaio per i collegamenti tra gli elementi mediante sistemi a incastro a tenuta d'aria. Lo scopo principale dei connettori meccanici è il fissaggio del pannello alla sottostruttura. I connettori (Figura 24, Figura 25, Figura 26) garantiscono un collegamento a tenuta stagna per resistere al carico previsto e devono consentire un montaggio rapido e flessibile sulle costruzioni esistenti.

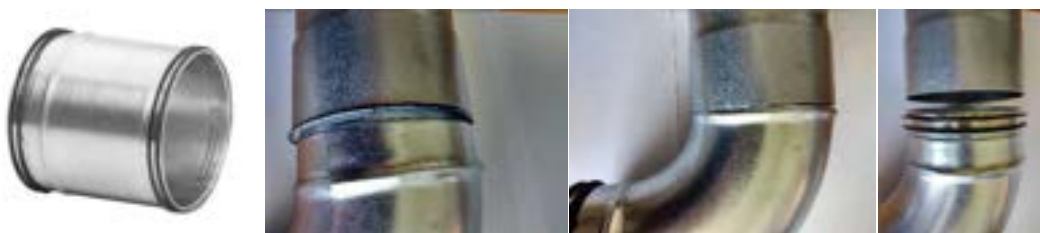


Figura 24. Progetto MORE-CONNECT – Connettori a bussola con elemento di tenuta



Figura 25. Progetto MORE-CONNECT – Connettori a pressione per il collegamento tra pannelli



Figura 26. Progetto MORE-CONNECT – Connettori pressati per il collegamento dentro i pannelli

Sono stati eseguiti test di installazione all'interno di stand da laboratorio che simulano la struttura portante muniti di ancoraggi. È stato prodotto il modulo standard completo di finestra standard e porta-finestra e parte superiore del modulo che va sotto il pannello completo (Figura 21). La parte superiore del modulo è stata fissata agli stand utilizzando i tipici ancoraggi e sono stati preparati i connettori dei tubi HVAC e i connettori dei tubi del sistema di distribuzione del calore nelle posizioni appropriate (Figura 27). Si esegue la preparazione dei connettori dei tubi HVAC nelle posizioni corrette (a sinistra) e la preparazione dei connettori a scatto sui tubi del sistema di distribuzione del calore (al centro). Lo spostamento dei tubi per consentire il collegamento viene effettuato mediante curve sui tubi (a destra).



Figura 27. Progetto MORE-CONNECT – Test di installazione del pannello standard in laboratorio

È stato dimostrato che la fabbricazione in fabbrica è più precisa, più veloce e più sicura che la fabbricazione in loco. Nel progetto MORE-CONNECT, i moduli prefabbricati sono prodotti con alta precisione per una precisione di circa 1 mm. Si stima che la prefabbricazione in fabbrica può portare circa un tempo di costruzione ridotto in media del 18% rispetto ai lavori di ristrutturazione profonda all'avanguardia pratiche. La riduzione è stata calcolata attraverso un confronto con le attuali pratiche di costruzione industrializzate nel settore residenziale, incluso l'impatto della produzione off-site e del montaggio in loco sul tempo complessivo richiesto per i nuovi edifici e il retrofitting profondo.

Dall'esame della Tabella 17 si nota che la prefabbricazione apporta notevoli progressi diretti tra cui: la riduzione degli operai e del tempo di installazione (circa pari a un elemento prefabbricato di 20 m²/ora con 3 addetti all'installazione impiegati in cantiere); tempi di consegna più brevi: il tempo totale di installazione è ridotto a 1 giorno per il retrofit profondo della facciata dell'edificio dimostrativo (200 m²) e a circa un mese per l'intervento su un intero condominio; uso del BIM nel processo di costruzione che riduce gli errori e le interferenze; utilizzo di sistemi HVAC di tipo PnP e componenti ICT integrati nei moduli prefabbricati.

Tabella 17. Progetto MORE-CONNECT – Stima di riduzione dei tempi di costruzione della soluzione prefabbricata rispetto alle più moderne pratiche di *deep renovation*

	Time (h/sqm)			Construction Time (days)			
	Off-Site Manufacturing	On-Site Assembly	Total Assembly	Off-Site Manufacturing	On-Site Assembly	Total Construction	
DEEP RETROFIT							
Traditional Glass Facade system	0	0.6	0.60	0	15	15	
Plug and Play Transparent Module	0.06	0.09	0.15	2	2	4	-25%
Traditional prefabricated facade panel	0.05	0.05	0.10	31	31	63	-18%
Plug and Play solution	0.05	0.04	0.09	31	25	56	-11%

2.2.9.1.2 Pannello modulare BERTIM

Il progetto BERTIM ha sviluppato una interessante proposta di moduli prefabbricati in legno per il rinnovamento di edifici con una metodologia olistica sviluppando due tipologie di moduli.

Al fine di definire le impostazioni dei prodotti da sviluppare, è stata effettuata un'analisi delle aziende produttrici di pannelli che partecipano al progetto: Egoïn (Spagna), Pobi (Francia) and Setra (Svezia). Ciò ha permesso di individuare i prodotti più adatti.

L'obiettivo principale è quello di rendere il modulo prefabbricato una naturale evoluzione dei prodotti esistenti. Nel progetto vengono sviluppati quattro diversi prodotti per il rinnovamento energetico delle tipologie di edifici target definite. Il concetto di ristrutturazione del progetto BERTIM non comprende solo la ristrutturazione dell'involucro dell'edificio, ma anche i servizi obsoleti esistenti: la ristrutturazione degli impianti esistenti è un punto rilevante nelle attività di ristrutturazione dell'edificio in termini di efficienza energetica, con conseguente notevole risparmio energetico.

Nel progetto BERTIM vengono sviluppati quattro diversi prodotti per il rinnovamento energetico delle tipologie target di edifici definite: modulo 2D con isolamento, modulo 2D con isolamento + installazioni (o servizi), modulo 3D residenziale e modulo 3D installazioni.

Non solo l'involucro, ma anche le installazioni dell'edificio possono essere rinnovate con diverse combinazioni dei quattro moduli. Possono essere quindi realizzate otto diverse strategie con diverse combinazioni dei quattro prodotti.

Due le tipologie di moduli che sono state sviluppate.

- 1) *Modulo standard*: modulo con telaio in legno con isolamento per il risanamento delle facciate.

Gli strati dei moduli e gli spessori di isolamento dipendono dal produttore del legno e dalla zona climatica. La finitura può variare da listelli di legno, pannelli di fibrocemento, intonaco, ecc. Il modulo potrà includere le

finestre quando necessario. I moduli prefabbricati sono costituiti da un telaio in legno (*timber-frame*) con lamelle interne, un OSB (*Oriented Strand Board*) sul retro, viene riempito di isolante e protetto da un telo impermeabilizzante. Tuttavia, questa proposta è incompleta in quanto non considera la riabilitazione degli obsoleti HVAC (riscaldamento, raffreddamento e ventilazione) dell'edificio (Figura 28).

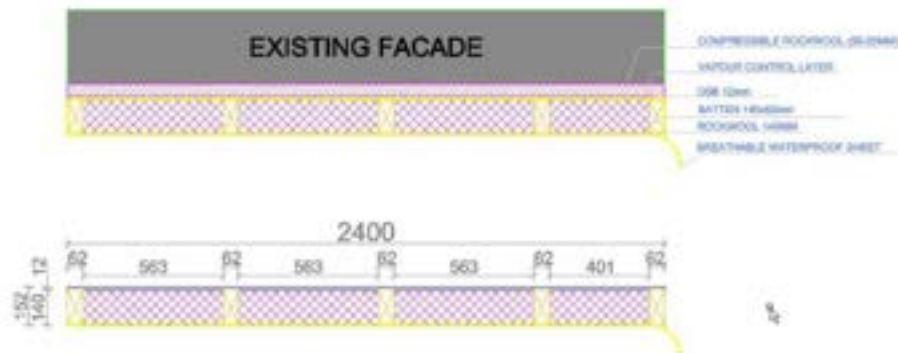


Figura 28. Progetto BERTIM – Schema del modulo standard

- 2) *Modulo con installazioni ad incasso*: modulo che integrano le installazioni per il risanamento dei sistemi edilizi.

Nei moduli sono integrati sistemi centralizzati di ventilazione, riscaldamento, raffreddamento e distribuzione dell'ACS. Le apparecchiature vengono poste in copertura in un apposito modulo che alloggia la caldaia a condensazione e pompa di calore, il serbatoio dell'acqua calda sanitaria (ACS), unità di recupero termico, collettori, pompe, accessori (Figura 29).

Nel progetto si è lavorato alla progettazione dei moduli che ospitano le reti di distribuzione (condotti e tubazioni) degli impianti HVAC e consentono il ripristino degli impianti di condizionamento senza necessità di intervento all'interno dell'abitazione. A questo scopo, i moduli con telaio in legno non sono una soluzione adatta, poiché i telai in legno impediscono ai tubi e ai condotti dell'aria di avere continuità. Per superare questo problema, sono stati progettati appositi moduli di installazione con moduli autoportanti in CLT (*cross-laminated timber* o X-LAM).

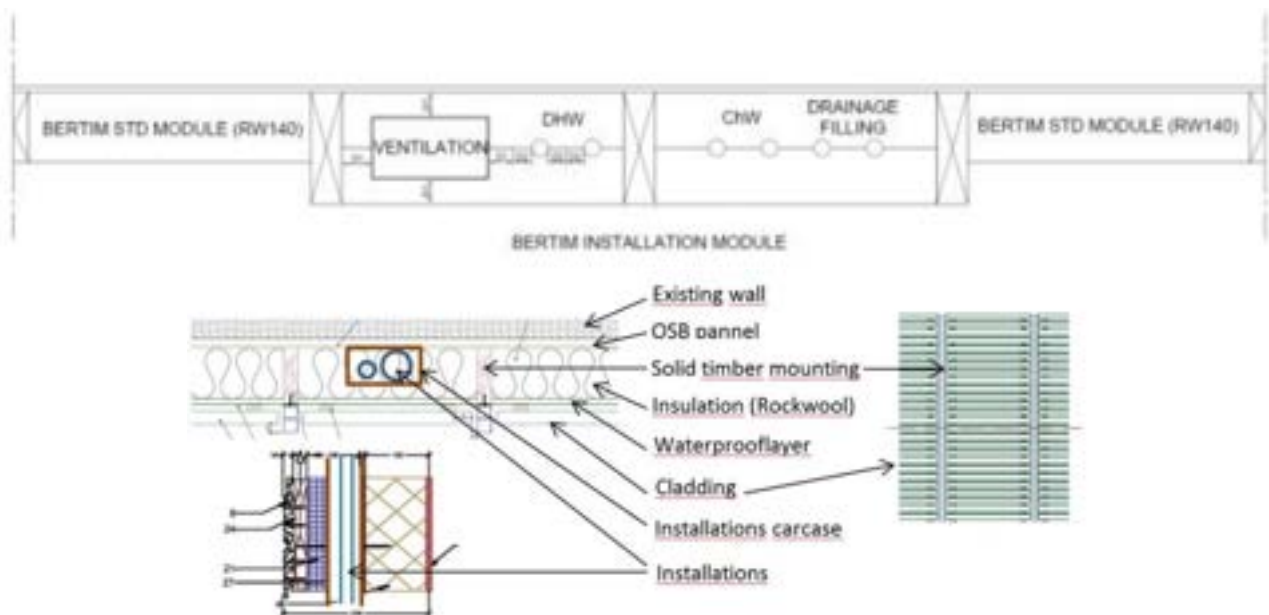


Figura 29. Progetto BERTIM – Schema dei moduli con installazioni ad incasso

I tubi e i condotti sono collegati tra i moduli, come si può osservare dallo schema di Figura 30. È necessario effettuare alcuni tagli ai montanti per formare il chiusino per eseguire le giunzioni degli impianti e per la sua manutenzione. Tubazioni e condotti vanno isolati per ridurre le dispersioni termiche la cui valutazione deve essere effettuata tenendo conto dei valori minimi di temperatura esterna (Figura 31, Figura 32).

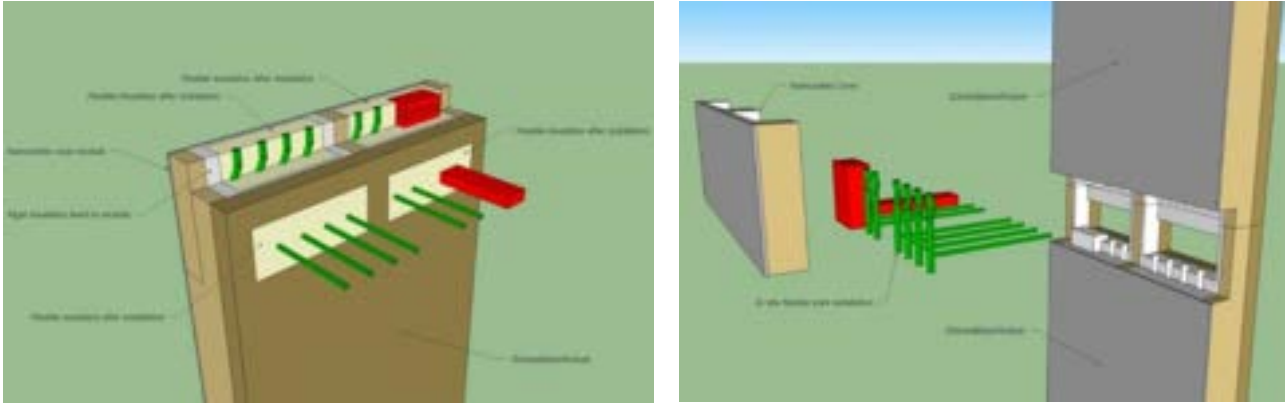


Figura 30. Progetto BERTIM – Render dello schema di connessione tra moduli con installazioni



Figura 31. Progetto BERTIM – Installazione dei moduli in facciata

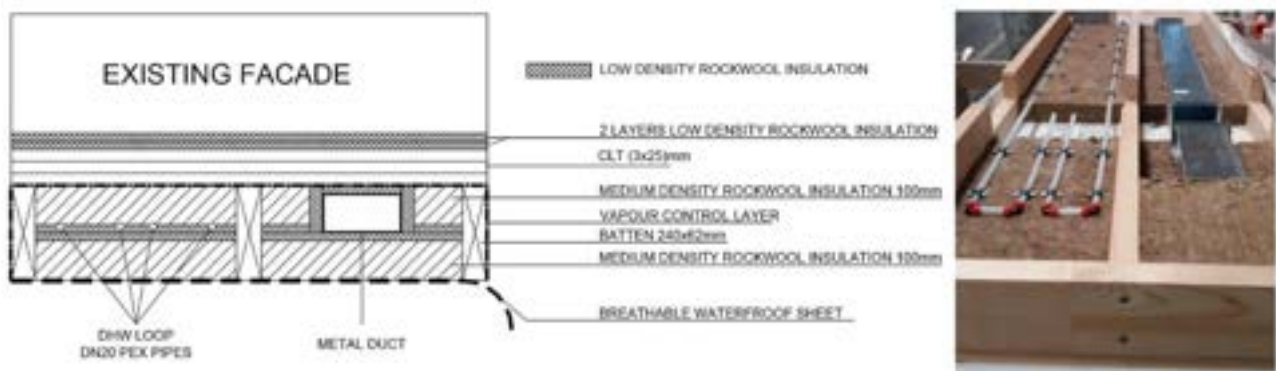


Figura 32. Progetto BERTIM – Integrazione di tubi e condotti nel modulo

L'utilizzo di connettori regolari per fissare il modulo alla facciata esistente produce una certa tolleranza nelle posizioni dei condotti incorporati. A seconda della precisione necessaria, sono utilizzati due diversi accessori di giunzione: uno di questi permette di accoppiare i condotti dove le posizioni degli assi hanno grandi

tolleranze. Questo giunto non è un accessorio regolare per i costruttori di condotti, quindi deve essere usato quando è realmente necessario. Il secondo è utilizzato per esigenze di bassa tolleranza, essendo un giunto comune in una rete di condotti come riportato in Figura 33: si nota a sinistra un tipico giunto con grandi tolleranze mentre a destra è rappresentato un accessorio a T per collegare moduli consecutivi e con la rete di condotti nell'abitazione.

Per quanto riguarda la connessione dei tubi dell'acqua due diversi accessori di giunto sono stati testati: il primo è più rigido e verrebbe usato per accoppiare tubi da moduli consecutivi; il secondo tipo utilizzato è un tipico tubo flessibile, comunemente usato per il collegamento di componenti come toilette, bacini, ecc. Questo tipo è stato usato nell'edificio dimostrativo KUBIK di Bilbao in Spagna per collegare i tubi incorporati al sistema posto nella cella.



Figura 33. Progetto BERTIM – Giunto di accoppiamento di condotti di distribuzione

È stata effettuata una valutazione di fattibilità dei moduli che integrano impianti HVAC nel pilota realizzato a Madrid. Una barriera di tipo tecnico è rappresentata dallo spessore dei moduli di installazione verso l'esterno della facciata, sia per le dimensioni dei condotti di distribuzione HVAC, sia per l'isolamento necessario per contenere le dispersioni termiche.

Al fine di valutare le dimensioni dei condotti di distribuzione è stato preso come caso di studio un edificio residenziale sito a Madrid con orientamento N-S. Sulla facciata Nord si trovano la cucina e i bagni e sulla facciata sud le camere da letto e il soggiorno. L'edificio dispone di impianti di riscaldamento autonomi con caldaia a gas e radiatori come terminali.

L'intervento proposto è consistito nel centralizzare l'impianto di generazione sfruttando gli emettitori esistenti e dotando l'abitazione di VMC e un sistema di condizionamento dell'aria con generatori collocati sul tetto e distribuzione in facciata, integrando tubi e condotti nei moduli di installazione.

Sono stati analizzati 2 scenari: edificio con piano terra più 4 piani dotati di 2 appartamenti per piano e un secondo in cui l'edificio avrebbe avuto 11 piani, con 2 appartamenti per piano.

Per analizzare lo spessore di isolamento richiesto, è stato utilizzato lo stesso edificio residenziale. Il modulo di installazione è stato sviluppato dal produttore Egoïn con isolamento in lana di roccia (spessore 140 mm). La conducibilità di riferimento dell'isolamento è 0,038 W/mK. In Spagna gli spessori minimi dei condotti sono stabiliti dal Regolamento sugli Impianti Termici negli Edifici (RITE). Sulla base di questi valori, è stato effettuato un calcolo delle perdite di energia utilizzando un'analisi bidimensionale del flusso di calore eseguita con un software di analisi dinamica. Il RITE prescrive che il valore massimo della perdita istantanea di energia nelle reti di distribuzione sia al massimo del 4% dell'energia generata.

Il prezzo dei moduli installati con finitura in legno impiallacciato è stato di 130 €/m² con periodo di recupero stimato tra i 15 e i 20 anni (secondo i prezzi dell'energia vigenti in Spagna nel corso di svolgimento del progetto).

La fattibilità dei moduli di facciata in CLT per l'alloggiamento dei condotti HVAC dipende dalla loro non eccessiva sporgenza rispetto alla facciata dell'edificio. Dall'analisi effettuata sulla distribuzione dei condotti nei due scenari di 2 edifici a 5 e 11 piani rispettivamente (orientamento N-S) lo schema più conveniente di distribuzione è quello con la facciata Nord contenente l'estrazione della ventilazione, le tubazioni per l'acqua calda e i circuiti di riscaldamento e la facciata Sud con le tubazioni del circuito di ventilazione e di raffreddamento. A livello di geometria sono stati configurati due tipologie di moduli di installazione indipendenti per ogni lato: due moduli simili sulla facciata Nord e altri due simili sulla facciata Sud.

A determinare la dimensione complessiva del modulo è il condotto di ventilazione:

- Per l'edificio a 5 piani è necessario un condotto di ventilazione di sezione minima di 400 cm² per lato;
- Per l'edificio di 11 piani il condotto di ventilazione deve avere sezione minima di 1.100 cm² per lato.

La sezione massima del modulo di installazione BERTIM è 1.100 cm² in quanto se fosse necessario utilizzare condotti di maggior sezione non ci potrebbe essere un unico punto di entrata e di uscita ma dovrebbero esserci diversi punti su ognuno di essi. Ulteriori soluzioni possibili riguardano l'aumento della velocità dell'aria all'interno dei condotti con adeguato isolamento acustico o utilizzare condotti via via più stretti, anche se questo rende l'installazione molto più difficile.

I requisiti di isolamento termico del modulo di installazione sono stati ottenuti dai valori di isolamento stabiliti da RITE (Spagna). Sono stati considerati i seguenti valori iniziali:

- D1 spessore minimo di isolamento per un tubo esterno: 50 mm;
- D2 spessore minimo di isolamento per un tubo esterno con fluidi caldi e acqua calda: 35 mm e 40 mm rispettivamente;
- D3 spessore minimo di isolamento per un tubo esterno con fluidi freddi: 45 mm.

Considerando questi valori, nelle condizioni climatiche di Madrid, la Figura 34 mostra il risultato del calcolo delle dispersioni: le perdite nelle tubazioni dell'acqua calda per il riscaldamento e l'ACS sono quantificate in 7,18 W/m, a fronte di un limite fissato dalla normativa di 3,40 W/m e delle perdite nelle tubazioni dell'acqua di raffreddamento 2,97 W/m, rispetto a un valore standard RITE di 2,01 W/m.

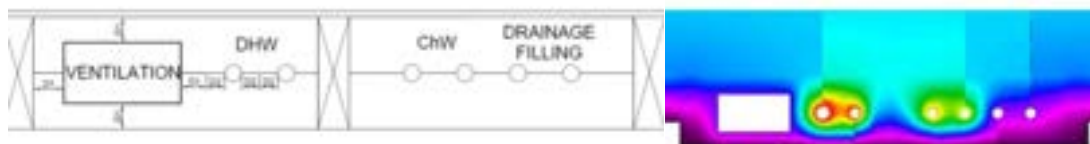


Figura 34. Progetto BERTIM – Flussi termici e perdite termiche del modulo di installazione

Per superare questa difficoltà, è stato installato un isolante con una conducibilità termica di 0,032 W/mK e lo spessore dell'isolamento D1 è stato aumentato da 80 mm a 130 mm. Con queste variazioni le perdite sono state ridotte fino ad un valore di 3,59 W/m in acqua calda e 0,93 W/m in acqua fredda, ordini di grandezza comparabili con i valori di legge.

Considerando l'aumento dell'isolamento all'esterno dei tubi di ventilazione, la sezione del modulo di installazione sarebbe di 303 mm di spessore, più lo spessore del pannello in CLT (75 mm). Cioè, il modulo di installazione avrebbe spessore di circa 40 cm più la finitura. Per siti più freddi le dispersioni termiche maggiori si hanno a livello delle tubazioni dell'acqua calda e sarà necessario uno spessore maggiore di isolante. Pertanto, in climi estremamente freddi, i moduli di installazione per riscaldamento e l'ACS non sarebbero realizzabili.

Per quanto riguarda l'integrazione del modulo con la facciata esistente i brevi tempi di installazione in loco sono il grande vantaggio competitivo della soluzione BERTIM. I risultati ottenuti con i due sistemi di installazione sono stati soddisfacenti in termini di tempo di montaggio, dove è stata richiesta una media di lavoro di circa 0,10 h/m² notevolmente inferiore rispetto ai metodi manuali tradizionali (1,3 ÷ 1,6 h/m²). Per quanto riguarda la precisione, sono state raggiunte deviazioni relative di 2 mm.

Si può concludere che benché il costo approssimativo dell'installazione sia dell'ordine di circa 130 €/m², nell'ordine di grandezza di quelli necessari per la facciata ventilata, ma comunque molto più alto del sistema ETICS, la digitalizzazione del processo di ristrutturazione con moduli prefabbricati ha un impatto principalmente sulla riduzione dei tempi di installazione in loco, nell'ordine del 90%.

La fattibilità della riqualificazione energetica dei sistemi HVAC di un edificio integrando le reti di distribuzione presenta dei limiti:

- negli edifici del Nord Europa gli spessori di isolamento necessari per limitare le perdite di energia nei condotti possono rendere impossibili tali interventi;
- il limite in altezza degli edifici sottoposti a riqualificazione: si stabilisce un massimo di dieci piani, mentre per altezze maggiori lo spessore del modulo ne renderebbe impraticabile l'integrazione nell'edificio.

In caso di non perfetta verticalità delle pareti che potrebbero rendere impraticabile l'uso di moduli piatti sono state dimostrate due tecniche di installazione che permettono di assorbire queste irregolarità e di installare i moduli in tempi molto brevi.

2.2.9.1.3 Pannello modulare iNSPIRE

Nell'ambito del progetto iNSPIRE (*Development of Systemic Packages for Deep Energy Renovation of Residential and Tertiary Buildings including Envelope and Systems*) finanziato dal FP7 l'obiettivo principale del pacchetto retrofit *iNSPiRe Renovation kit package* ha riguardato l'integrazione di diversi componenti (finestre intelligenti, illuminazione intelligente, componenti HVAC) come parte dei moduli prefabbricati.

Si tratta di un pannello *timber-frame* nel quale tubi e condotti per riscaldamento, ventilazione, ACS, cavi elettrici e produzione di energia solare sono integrati agli elementi di facciata durante la fase di prefabbricazione, garantendo elevata qualità e tempi di esecuzione ridotti in cantiere.

L'obiettivo è stato quello di produrre 5÷10 tipologie di pacchetti di involucro standardizzati per sette edifici target principali. Le quattro facciate innovative sviluppate (due in metallo/vetro e due in legno) comprendono l'integrazione di componenti HVAC e l'integrazione di sistemi di accumulo termico ed energetico. All'interno del pannello è inserita una unità di ventilazione meccanica a recupero termico (MVHR) con micropompa di calore integrata (micro HP). Nello schema di sinistra di Figura 35 si osservano le parti del sistema di ventilazione installate nella parete in fase di prefabbricazione (edificio dimostrativo a Ludwigsburg, Germania).

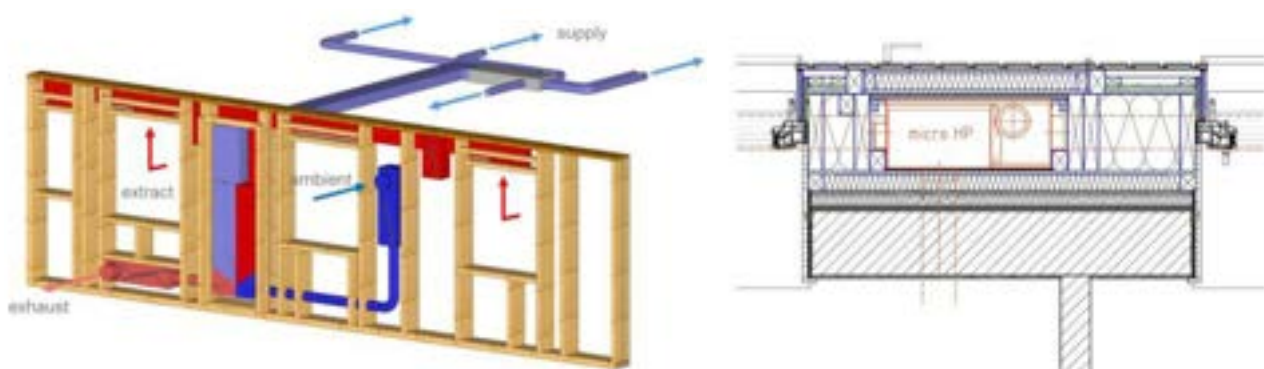


Figura 35. Progetto iNSPIRE – Schema del pannello (a sinistra) e integrazione impiantistica (a destra)

2.2.9.1.4 Pannello modulare 4RinEU

Nell'ambito del progetto 4RinEU (*Robust and Reliable technology concepts and business models for triggering deep Renovation of Residential buildings in EU*) è stato concepito un modulo prefabbricato fornito di rivestimento, finestre, sistemi di schermatura solare, dispositivo di ventilazione decentralizzato con recupero di calore, pannello solare termico già collegato alle tubazioni dell'acqua (pannelli solari termici Panda Super Slim dell'azienda Costruzioni Solari s.r.l.). Esso integra i servizi dell'edificio all'interno dei moduli e permette lo sfruttamento delle cavità tra gli elementi della nuova facciata modulare e la facciata esistente per il passaggio degli impianti.

La progettazione modulare implica un elevato livello di integrazione impiantistica con inserimento nel pannello di condotti e tubazioni per la distribuzione dell'acqua di rete, dell'ACS, il riscaldamento (mandata e ritorno) e le acque di scarico. È previsto l'inserimento di un sistema decentralizzato di ventilazione meccanica con recupero di calore a flusso incrociato integrato al montaggio della finestra (Figura 36).

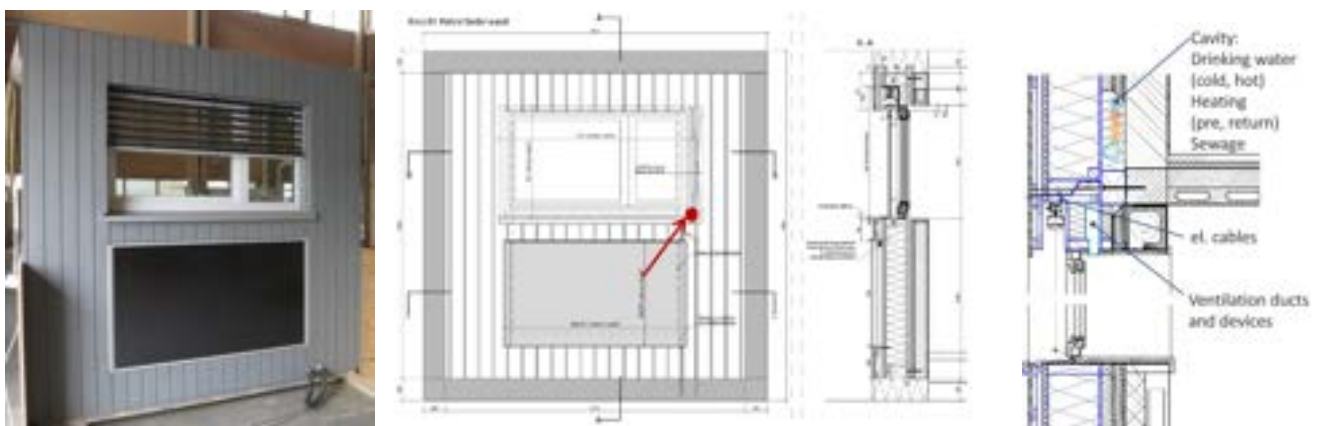


Figura 36. Progetto 4RinEU – Prospetto, rendering e sezione del modulo prefabbricato

Edifici dimostrativi sono stati realizzati (in Figura 37 l'edificio realizzato ad Oslo, con risultati di buona qualità costruttiva dell'involucro, elevato livello di isolamento termico e ventilazione bilanciata).



Figura 37. Progetto 4RinEU – Edificio dimostrativo a Oslo

Il progetto 4RinEU ha stimato, per un archetipo teorico di edificio (cioè una casa unifamiliare con una superficie di facciata da ristrutturare di circa 380 m²), che è possibile ridurre del 52% la durata del cantiere applicando una facciata prefabbricata multifunzionale che integri un impianto fotovoltaico e componenti HVAC con le soluzioni tecnologiche introdotte dal progetto.

2.2.9.1.5 Pannello modulare E2VENT

Il progetto E2VENT (*Energy Efficient Ventilated Facades for Optimal Adaptability in the refurbishment of buildings*) opera nell'ambito delle facciate ventilate ad alta efficienza energetica per un'adattabilità ottimale nella ristrutturazione degli edifici con l'obiettivo di sviluppare, dimostrare e convalidare un approccio sistemico, economico, ad alta efficienza energetica, a basse emissioni di CO₂, replicabile, poco invasivo, per il retrofit di edifici residenziali, in grado di ottenere notevoli risparmi energetici, attraverso l'integrazione di un innovativo sistema di facciata ventilata adattiva.

L'obiettivo principale del sistema E2VENT è il mercato del retrofitting di edifici residenziali multipiano costruiti negli anni '60 e '70. Questi edifici sono diffusi in tutta Europa e sono caratterizzati principalmente dallo scarso livello di isolamento termico e della qualità dell'aria indoor dovuto alla mancanza di un sistema di rinnovo dell'aria e dal basso interesse architettonico.

Dal punto di vista impiantistico il progetto E2VENT si caratterizza per un elevato livello di integrazione impiantistica.

Lo schema realizzativo prevede una soluzione di rinnovamento termico con rivestimento esterno e intercapedine d'aria. La caratteristica distintiva di questo sistema è l'unità di recupero termico modulare intelligente (SMHRU) che permette di recuperare energia dall'aria estratta mentre si effettua il rinnovo dell'aria utilizzando uno scambiatore di calore a doppio flusso nell'intercapedine d'aria. In questo modo il sistema migliora le prestazioni energetiche dell'edificio e il rinnovo dell'aria fresca non le diminuisce. La qualità dell'aria interna è garantita limitando le perdite di energia. Con l'obiettivo di fornire un sistema di accumulo di calore per la riduzione dei picchi di consumo di energia elettrica e/o per il raffrescamento in estate, può essere implementato, se necessario, un accumulo di energia termica latente (LHTES) basato sulle proprietà dei materiali a cambiamento di fase (PCM), pensato per il risparmio con il contenimento dei picchi in riscaldamento e raffreddamento (Figura 38, Figura 39).

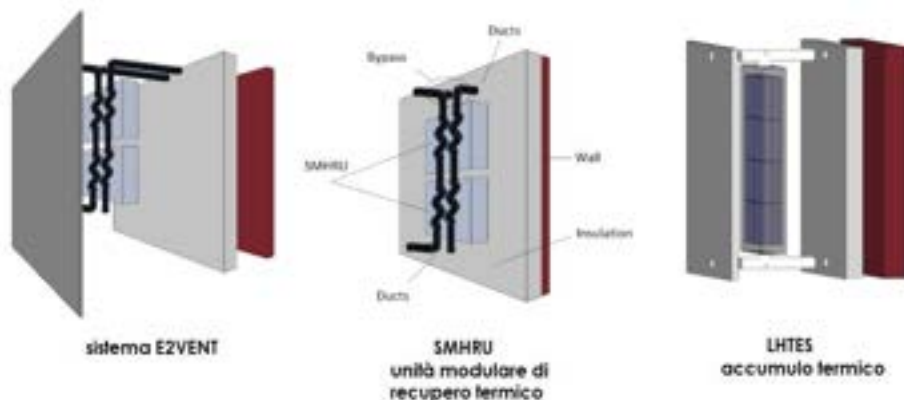


Figura 38. Progetto E2VENT – Schema del sistema e relativi componenti

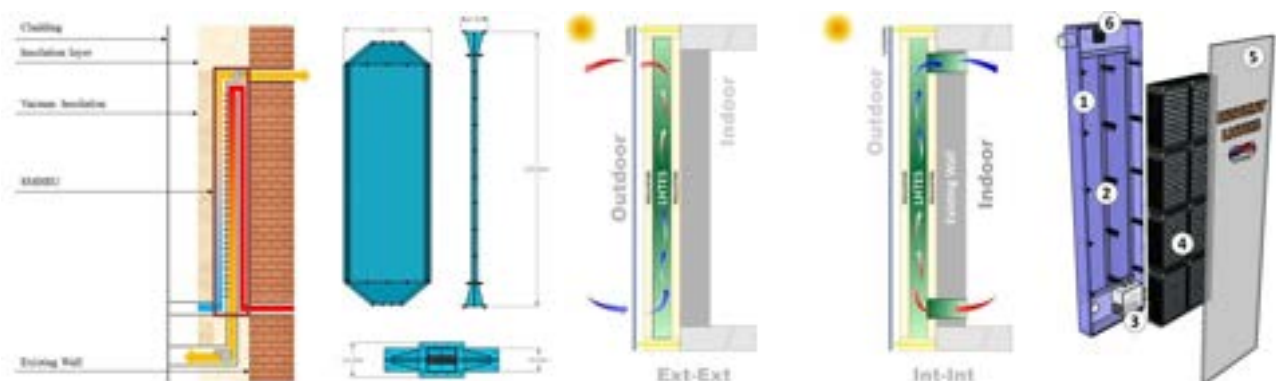


Figura 39. Progetto E2VENT – Schema con unità SMHRU (a sinistra) e sistema di accumulo termico LHTES

L'unità di recupero termico modulare (SMHRU) è innovativa in quanto si tratta di uno scambiatore a doppio flusso molto sottile che può essere integrato in un modulo di ristrutturazione di facciata. L'efficienza misurata è del 70%, il che significa che permette di avere un rinnovamento dell'aria molto efficiente che garantisce la qualità dell'aria interna limitando le perdite termiche. Anche il fatto che sia pilotato con sensori di CO₂ e umidità relativa è innovativo e ne aumenta l'efficienza.

Il sistema di ancoraggio delle unità LHTES e SHMRU, diverso dal sistema di fissaggio degli elementi di rivestimento, è progettato considerando un diverso possibile layout delle strutture portanti e cercando di rendere l'installazione il più semplice possibile. Un tale sistema di ancoraggio è composto da due profilati in alluminio con sezione a L che supportano le casse LHTES e SHMRU su entrambi i lati e possono trasferire il loro peso direttamente sulla parete o solo sulle travi quando la parete non ha la capacità portante richiesta. A causa del peso dell'unità LHTES assemblata (circa 100 kg), i due profili a L sono sagomati in modo da consentire il fissaggio dei moduli in due fasi attraverso un meccanismo di aggancio e blocco: 1) sollevamento e sospensione del modulo; 2) calibrazione e fissaggio finale attraverso il serraggio di un numero limitato di bulloni. Il sistema di montaggio permette anche la dilatazione e altri movimenti di giunzione in tra materiali vecchi e nuovi.



Figura 40. Progetto E2VENT – Sistema di ancoraggio delle unità impiantistiche nel prototipo

L'integrazione architettonica è fortemente legata alle caratteristiche architettoniche esistenti da ristrutturare nell'edificio. I possibili modelli di integrazione architettonica dipendono dalla morfologia della facciata che condizionano la distribuzione dei componenti LHTES e SMHRU (rettangoli rossi in Figura 41), cosicché la strategia di assemblaggio dei moduli di rivestimento dipende dalle tipologie più ricorrenti del parco edilizio. Ne derivano alcuni possibili modelli di assemblaggio per la progettazione delle facciate.



Figura 41. Progetto E2VENT – Distribuzione unità LHTES e SMHRU per due morfologie di facciata

2.2.9.1.6 Sistemi modulari di facciata metal-frame PnP

Nel progetto P2ENDURE (*Plug&Play Building Renovation*) è stato esaminato un interessante caso studio (asilo nido di Varsavia) dotato di una facciata modulare semplice con sottostruttura in calcestruzzo/calcestruzzo leggero, ideale in termini di resistenza meccanica per gli elementi di fissaggio e i supporti.

Il caso studio prevede l'installazione di un dispositivo di ventilazione nell'elemento con un recupero di calore ad alto rendimento (77-81% di recupero di calore) che sostituisce la ventilazione operata dall'apertura delle finestre oppure guidare l'aria attraverso l'elemento di facciata per mezzo di condotti con un'unità di ventilazione centrale. I cavi e i condotti necessari sono installati in un condotto di installazione verticale (se necessario orizzontale) accessibile dall'esterno. Rispetto ad un sistema tradizionale di ristrutturazione – come, ad esempio, i sistemi ETICS installati strato per strato con un'elevata quantità di lavoro manuale – questo sistema prefabbricato permette un'installazione rapida e precisa nei casi in cui è possibile una certa ripetizione di elementi uguali.

La sequenza di installazione – indicata nella numerazione in Figura 42 – prevede l'installazione dei supporti della facciata e delle travi verticali o dei punti di collegamento sulla facciata esistente (1,2); posizionamento degli elementi sui supporti (3); fissaggio dell'elemento tramite tasselli e viti (4). Il passo successivo è l'installazione di condotti e cavi e il collegamento con i dispositivi di ventilazione (5, 6, 7) e la chiusura del pozzetto di installazione tramite coperchio.

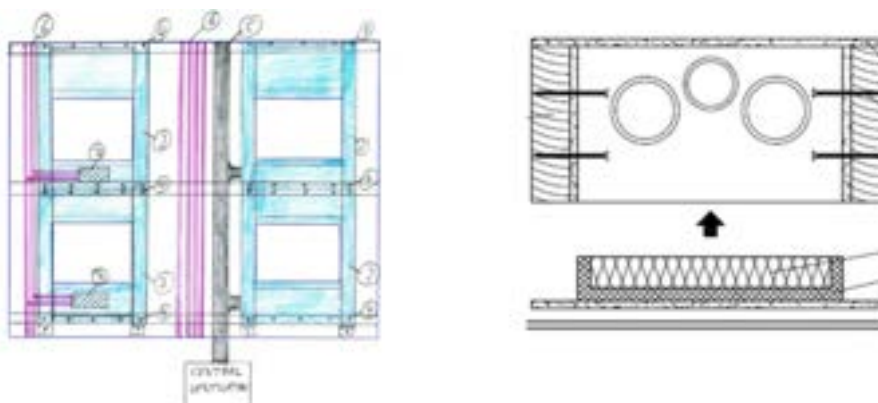


Figura 42. Progetto P2ENDURE – Sequenza di installazione di tubi e cavi e chiusura del vano di installazione

Per l'edificio dimostrativo è stato eseguito un progetto preliminare di ristrutturazione dell'edificio con pannelli di facciata multifunzionali. Il progetto contiene unità di ventilazione che possono essere installate sotto gli elementi delle finestre con la possibilità di utilizzare le unità di ventilazione con sistemi di recupero del calore (Figura 43, pannelli di facciata multifunzionali Fermacell).

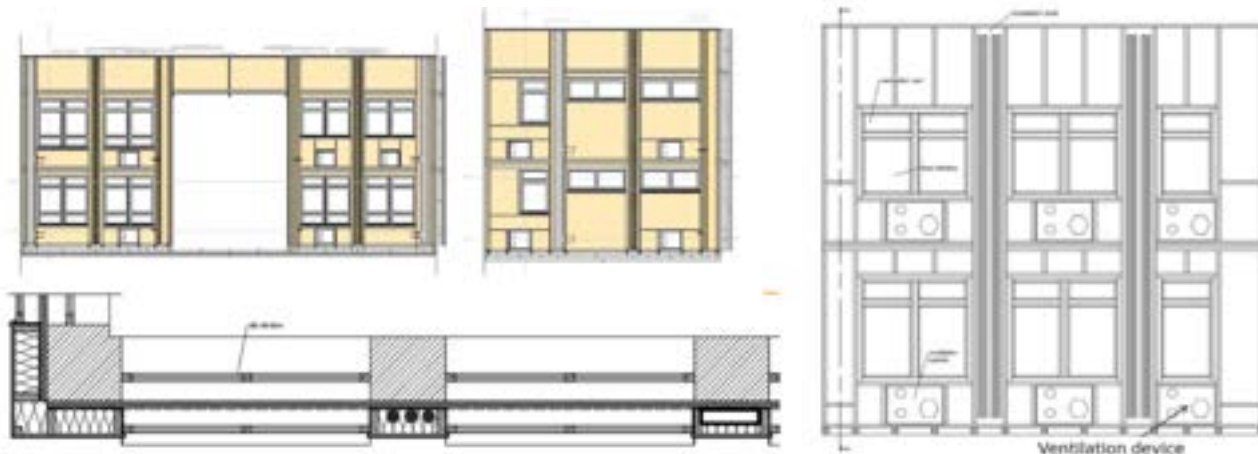


Figura 43. Progetto P2ENDURE – Retrofit con pannelli multifunzionali e canalizzazioni per tubi e condotti

Come accennato, se si considera un retrofit completo dell'edificio, i moduli prefabbricati dell'edificio (pannelli a parete, Figura 44) possono avere tubi e canali di distribuzione integrati che semplificano ulteriormente il processo di retrofit.



Figura 44. Progetto P2ENDURE – Vano per integrato tubi HVAC, condotti e canali di distribuzione nel modulo

I risultati preliminari del progetto P2ENDURE indicano che implementando soluzioni prefabbricate PnP è possibile ottenere un risparmio di almeno il 15% sui costi e del 50% sul tempo di installazione, oltre a ridurre in modo significativo il disturbo agli occupanti durante la costruzione.

Nel progetto PLUG-N-HARVEST (*PLUG-N-play passive and active multi-modal energy HARVESTing systems, circular economy by design, with high replicability for self-sufficient districts near-zero buildings*), il kit di strumenti per facciate modulari è costituito da un telaio in alluminio.

Le dimensioni del telaio si basano sulle tipiche griglie edilizie che si possono trovare in tutta Europa, soprattutto negli edifici non residenziali. Poiché ci sono maggiori variazioni rispetto all'altezza dell'edificio, anche qui è previsto un elemento variabile. I moduli possono essere dotati dei classici elementi di isolamento degli elementi di facciata e delle finestre per ridurre le perdite per trasmissione. È possibile fornire un'adeguata tecnologia di sistema per coprire il restante fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento.

La Figura 45 mostra la struttura di base degli elementi di facciata. Le proprietà di isolamento del modulo sono state studiate variando il design del profilo e ottimizzate per soddisfare le diverse esigenze dei paesi europei.

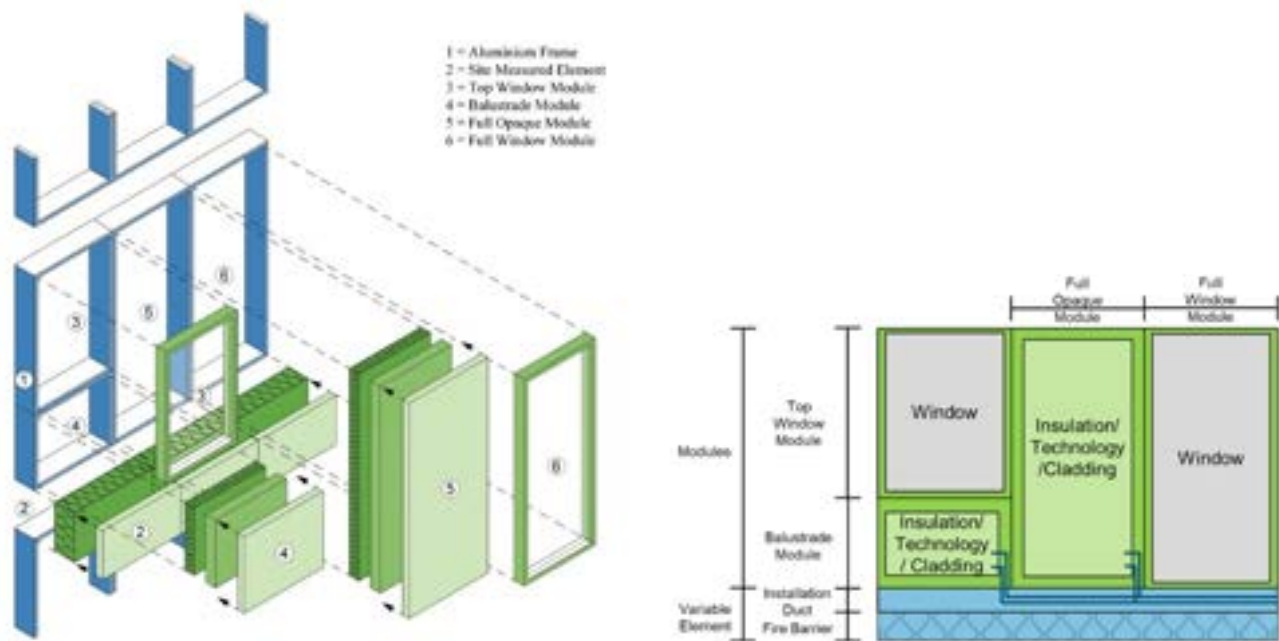


Figura 45. Progetto PLUG-N-HARVEST – Schema del sistema modulare metal-frame

L'integrazione della tecnologia del sistema avviene con il fotovoltaico e i collettori solari come integrazione nel rivestimento della facciata o, come nel caso di un'unità di ventilazione della facciata, ad esempio, inserita nel modulo della facciata. Una configurazione esemplare è rappresentata in Figura 46.

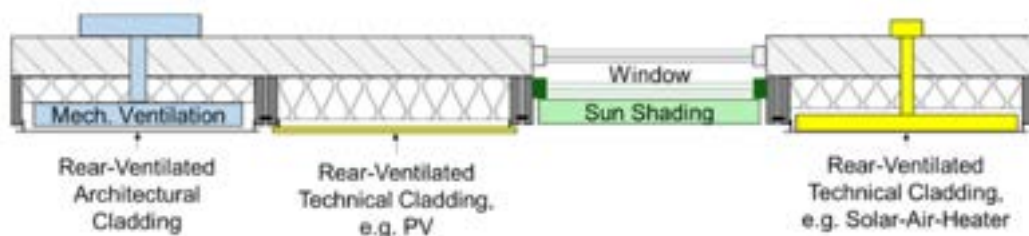


Figura 46. Progetto PLUG-N-HARVEST – Struttura di base degli elementi di facciata

Il sistema integra quanta più energia rinnovabile possibile. Per bilanciare le differenze tra produzione e domanda, è necessario fornire capacità di stoccaggio. Tuttavia, queste devono essere fornite come unità centrali nell'edificio per motivi di peso (per il serbatoio di accumulo dell'acqua calda) e di sicurezza (per le batterie). La costruzione di base del kit di strumenti per facciate modulari combina le normative europee e quelle specifiche del paese. Con la configurazione individuale è possibile realizzare un adeguato adattamento ai diversi edifici. Il toolkit è attualmente in fase di adattamento a cinque edifici dimostrativi in quattro diversi Paesi. L'interazione di tutti i componenti è controllata da un sistema intelligente di gestione dell'energia.

2.2.10 Retrofit per l'adeguamento energetico e sismico

Alcuni studi propongono soluzioni innovative di ristrutturazione energetica, sismica e architettonica.

Nei Paesi europei, molti edifici (circa il 35%) hanno più di 50 anni, il che significa che hanno raggiunto la loro durata di vita nominale, mostrando deficit strutturali sia per carichi verticali che orizzontali e spesso una bassa qualità architettonica a causa della scarsa manutenzione. Pertanto, nei Paesi ad elevato rischio sismico (come l'Italia), le soluzioni di ristrutturazione mirate solo a ridurre la domanda di energia non salvaguardano dalle perdite economiche causate dagli eventuali terremoti evenienza insostenibile, dal punto di vista sociale, economico e ambientale. Infatti, il notevole impatto ambientale in termini di *carbon footprint* associata alla riparazione o alla ricostruzione degli edifici dopo un evento sismico dovrebbe essere preso in considerazione. Belleri e Marini stimano la quantità di CO₂ equivalente annua associata al rischio sismico pari all'87% della CO₂ annua associata a soli interventi di retrofitting energetico. Pertanto, nelle regioni a rischio sismico il rinnovamento energetico e l'adeguamento sismico devono procedere di pari passo. Le opzioni sono: il retrofit dell'edificio o la completa demolizione e ricostruzione. Al retrofit è associato un minor impatto energetico, un minor potenziale di *global warming*, minore impatto economico e minor tempo di esecuzione. La demolizione e ricostruzione è l'opzione solo nel caso in cui edificio risulti compromesso e le valutazioni tecnico-economiche di retrofit siano sconsigliabili.

Le barriere connesse al retrofit energetico e al contemporaneo adeguamento sismico sono: costi eccessivi, lunghi tempi di esecuzione, disturbo degli occupanti. In Italia, il costo per il retrofitting energetico e sismico dei condomini costruiti tra gli anni '50 e '80 varia attualmente tra 100÷230 €/m³ equivalente a circa 300÷700€/m² tali da rendere tali interventi poco accessibili ai proprietari, soprattutto alle famiglie a basso reddito. Inoltre, la maggior parte degli interventi di ristrutturazione combinati richiedono il trasferimento degli occupanti durante i lavori, con conseguenti costi aggiuntivi e disagi per l'alloggio temporaneo.

Sono necessarie tecniche innovative basate su approcci integrati per rendere il rinnovamento combinato energetico e sismico più sostenibile dal punto di vista ambientale, economico e sociale. In particolare, sono necessarie azioni di ristrutturazione più accessibili per garantire anche le esigenze di adeguamento degli edifici delle famiglie a basso reddito.

Una possibile soluzione innovativa di ristrutturazione integrata (energetica + sismica) per edifici a telaio in cemento armato (RC, *reinforced concrete*) è basata sull'uso di pannelli prefabbricati in legno: aggiunta di pannelli CLT (X-LAM) alle pareti esterne, in combinazione con pannelli con struttura in legno. I due pannelli integrano materiali isolanti e di rivestimento per migliorare le prestazioni energetiche e l'immagine architettonica degli edifici ristrutturati. Inoltre, i pannelli in CLT sono collegati al telaio in cemento armato esistente attraverso innovativi dispositivi di dissipazione dell'energia sismica. I risultati di simulazioni termiche dinamiche su un tipico edificio residenziale multipiano degli anni '60 indicano che questa tecnica di retrofitting migliora notevolmente le prestazioni energetiche dell'edificio selezionato con riduzione della domanda globale di energia fino al 60%.

2.2.11 Interventi di ristrutturazione energetica e sismica tradizionali e innovativi

2.2.11.1 Soluzioni tradizionali di riqualificazione sismica

Le soluzioni tradizionali combinano gli interventi di adeguamento energetico e sismico in modo "additivo".

In sintesi, la riqualificazione sismica di edifici con struttura a telaio in cemento armato ha a disposizione diverse strategie:

- Jacketing in acciaio (*steel jacketing*), strategia consistente nel rinforzare una parte degli elementi strutturali (colonne e/o travi) mantenendo il sistema originale a telaio dell'edificio con aumento della sezione trasversale di elementi resistenti ma richiede un lavoro intensivo, accurato dettaglio, e quantità rilevanti di materiali, lunghi tempi di esecuzione e disturbo agli occupanti;
- Jacketing in FRP (*FRP jacketing*): soluzione più recente che prevede il rivestimento in polimero rinforzato con fibre (FRP, *fiber-reinforced polymer*) ossia carbonio, aramide, fibra di vetro, ecc. incorporati in resine organiche, garantisce alla corrosione, riduce i tempi di implementazione e

permette di preservare la geometria degli elementi; tuttavia comporta costi elevati, manodopera specializzata, cattivo comportamento ad alta temperatura e di resistenza al fuoco, e non può essere applicato a bassa temperatura o su superfici bagnate, a causa dell'uso delle resine organiche;

- *TRM jacketing*: la malta rinforzata con fibre tessili combina il rinforzo delle fibre tessili con matrici inorganiche, come le malte a base di cemento. Tuttavia, gli interventi di rivestimento rimangono invasivi e costosi in quanto richiedono l'isolamento dei membri del RC e la ricostruzione di porzioni rilevanti di pareti di tamponamento, strati di rivestimento e, in alcuni casi, sistemi meccanici;
- Sistema antisismico collegato all'edificio esistente: mentre il telaio originale RC ha il compito di resistere ai soli carichi gravitazionali l'installazione di nuove pareti di taglio in RC o di telai rinforzati in acciaio, situati all'interno o all'esterno dell'edificio, migliorano la capacità di redistribuzione globale di solidità, resistenza e deformazione plastica della struttura.

Queste strategie richiedono un rilevante ampliamento e un rafforzamento delle fondamenta, mentre l'aggiunta di strutture esterne non è sempre possibile.

Una strategia alternativa di riqualificazione sismica si basa sulla riduzione della domanda sismica della struttura mediante l'installazione di isolatori sismici tra la sovrastruttura e la fondazione.

L'isolamento sismico di base non è sempre adatto per il retrofitting degli edifici perché richiede limiti minimi di distanza tra gli edifici confinanti, è meno efficace per i grattacieli, e comporta elevati costi di implementazione.

2.2.11.2 Interventi integrati di riqualificazione energetica e sismica

Lo sviluppo di soluzioni che combinino in modo integrato gli interventi di risanamento energetico e sismico è una questione recente. La maggior parte delle ricerche si concentra su innovative tecnologie di retrofitting che richiedono l'installazione dall'esterno degli edifici, evitando il trasferimento degli occupanti e arrecando loro il minor disturbo.

Bournas et al. hanno suggerito di integrare l'innovativa tecnica di rinforzo TRM con l'installazione di materiali isolanti e sistemi di riscaldamento dal lato esterno, sia per elementi strutturali che non strutturali di edifici in muratura incorniciati o non rinforzati in cemento armato.

Una diversa soluzione integrata e poco disgregante è il "Geniale cappotto sismico" introdotto di recente nel mercato italiano dell'edilizia dall'azienda ECOSISM. Questo innovativo sistema consiste nell'aggiungere all'involucro edilizio esistente una nuova pelle antisismica, costituita da una sottile lastra in cemento armato gettata in opera tra due o uno strato di materiali isolanti preassemblati. Tuttavia, l'utilizzo di malta cementizia e calcestruzzo rende entrambi i sistemi meno rispettosi dell'ambiente e non reversibili.

Una recente ricerca ha anche studiato la possibilità di sostituzione dello strato esterno delle pareti di tamponamento a doppia faccia con blocchi in cemento cellulare autoclavato (*autoclaved aerated concrete*, AAC) per sfruttare le prestazioni termiche e meccaniche di questo innovativo materiale da costruzione. Tuttavia, sebbene questa soluzione richieda un importante sforzo economico, un completo miglioramento sismico dell'edificio è improbabile che si possa realizzare in aree ad alta sismicità.

Altri studi hanno proposto soluzioni integrate basate su "esoscheletri antisismici" per migliorare la sicurezza strutturale degli edifici esistenti aumentando la solidità e la resistenza complessiva. Ferrante et al. hanno suggerito l'utilizzo di controventi esterni in acciaio come supporto strutturale per un nuovo involucro performante dal punto di vista energetico costituito da componenti preassemblati, che creano anche nuovi spazi abitativi aggiuntivi e personalizzati, aumentando così il valore globale dell'edificio e il comfort abitativo degli utenti. Marini et al. hanno proposto un approccio "olistico" di ristrutturazione basato su un doppio involucro ingegneristico costituito da esoscheletri strutturali differenti dotati di dispositivi tecnologici per il contemporaneo miglioramento dell'efficienza energetica e della qualità architettonica dell'edificio. La questione estetica è stata sottolineata da altri ricercatori che hanno proposto di combinare l'uso del design parametrico e degli esoscheletri in acciaio per generare molteplici alternative integrate di retrofitting. Una

soluzione a doppia pelle è stata studiata anche nello studio di Manfredi e Masi, dove sono stati aggiunti all'esterno nuovi telai in cemento armato infittiti e collegati alla struttura esistente per soddisfare sia le esigenze termiche che quelle sismiche. L'aumento volumetrico degli edifici esistenti è il principale limite per i sistemi integrati basati sull'esoscheletro: infatti, non sempre è realizzabile a causa della mancanza di spazio perimetrale disponibile e dei vincoli legislativi.

2.2.11.2.1 Pannelli prefabbricati in CLT in sostituzione delle pareti esterne di tamponamento

Un recente approccio integrato alla ristrutturazione degli edifici si basa sull'uso di pannelli prefabbricati in legno lamellare incrociato (CLT). Il CLT è un prodotto in legno ingegnerizzato con elevata resistenza, robustezza e stabilità dimensionale grazie alla costruzione trasversale. È anche un buon materiale isolante grazie alla sua bassa conducibilità termica ($0,10 \div 0,13 \text{ W/mK}$). I pannelli in CLT accoppiati con un ulteriore strato isolante e materiali di finitura sono studiati in sostituzione delle pareti di tamponamento in muratura esistenti degli edifici con telaio in cemento armato, con lo scopo principale di aumentare la solidità laterale complessiva della struttura.

2.2.11.2.2 Pannelli prefabbricati in CLT sovrapposti alle pareti esterne di tamponamento

Un recente progetto di ricerca sta esaminando l'utilizzo di pannelli in CLT sovrapposti alle pareti esterne, collegati alla struttura attraverso speciali dispositivi dissipativi. La disposizione esterna dei sistemi integrati basati sul CLT soddisfa bene le attuali esigenze di ristrutturazione di rapida installazione, efficienza dei costi, bassa interruzione, utilizzo di materiali a basse emissioni di carbonio e reversibilità.

In Figura 47 si mostra un interessante sistema di retrofitting basato sul rivestimento degli edifici esistenti a telaio in cemento armato con una nuova pelle performante fatta di componenti preassemblati e personalizzabili. Il sistema consiste nell'aggiungere pannelli strutturali prefabbricati in CLT alle pareti esterne esistenti collegandoli alle travi in cemento armato attraverso innovativi dispositivi dissipativi. Questi dispositivi dissipativi (*damper*) sono fondamentalmente degli ammortizzatori a frizione che rendono disponibile la rigidità laterale aggiuntiva dei pannelli in CLT e dissipano l'energia sismica in caso di movimenti del terreno moderati e forti, rispettivamente.

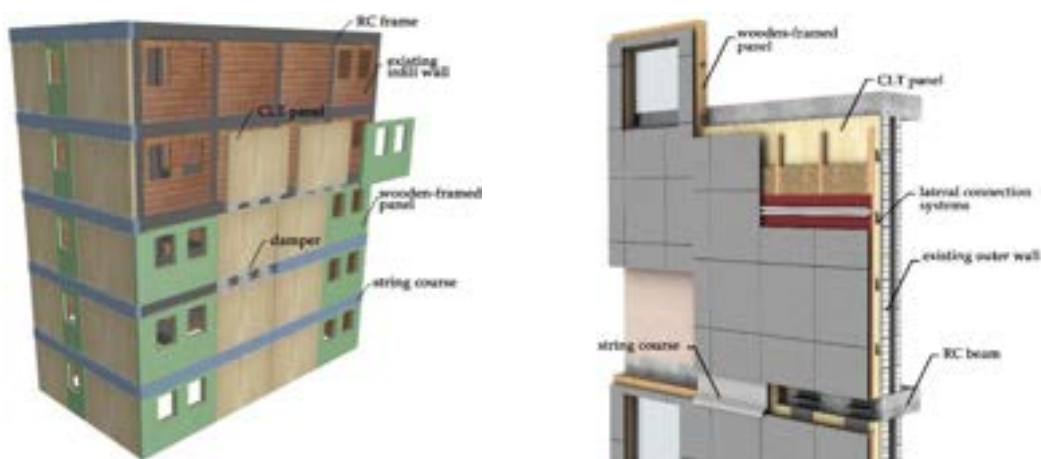


Figura 47. Retrofitting con pannelli CLT, anche in versione con facciata ventilata [fonte: Margani et al., 2020]

Entrambi questi effetti riducono le derivate richieste dai terremoti, riducono i danni ai componenti non strutturali e strutturali e migliorano le prestazioni sismiche del telaio in cemento armato. Inoltre, l'attivazione dello smorzatore definisce un limite superiore alla forza sostenuta dal pannello CLT, impedendo così il suo cedimento anche in presenza di forti movimenti del terreno.

I pannelli strutturali in CLT sono abbinati a pannelli preassemblati non strutturali, dotati di finestre ad alte prestazioni in sostituzione di quelle esistenti. Poiché questi ultimi pannelli non hanno alcun ruolo strutturale, sono realizzati con telai in legno leggero per garantire una più facile fabbricazione, minor costi e minor aggravio di carico sulla struttura. Le comuni staffe a gancio a scomparsa possono essere adottate come

sistemi di collegamento laterale tra i pannelli (Figura 47). Entrambi i pannelli possono integrare materiali isolanti a base biologica (ad es. canapa, sughero, fibra di legno, fibra di cellulosa, ecc.) e lo strato di finitura desiderato (ad es. ceramica, legno, pietra, vetro, metallo, moduli fotovoltaici, ecc.).

Il sistema di ristrutturazione è completato rivestendo le travi in cemento armato con strisce preassemblate per proteggere le serrande e le connessioni e per ridurre i ponti termici. Il risultato è un nuovo involucro performante applicato a quello esistente che migliora contemporaneamente le prestazioni energetiche, sismiche ed estetiche dell'edificio ristrutturato.

In Figura 48, in cui è riportato il solo pannello strutturale in CLT senza materiali isolanti e di rivestimento, la serranda è costituita da due profili in acciaio, che collegano i pannelli in CLT di due piani consecutivi con la trave in cemento armato esistente interposta. Il profilo superiore è collegato alla trave mediante bulloni di ancoraggio. Il profilo inferiore è dotato di fori asolati ed è collegato alla superiore con bulloni ad alta resistenza pretensionati. La forza di taglio viene trasmessa dalla parte superiore al profilo inferiore mediante l'attrito esercitato sulla superficie di contatto. Il numero di bulloni e la forza di pretensionamento controllano la forza di attrito. Durante un terremoto, quando la forza trasmessa dallo smorzatore raggiunge il valore della forza di attrito, il profilo superiore scorre su quello inferiore dissipando energia sismica.

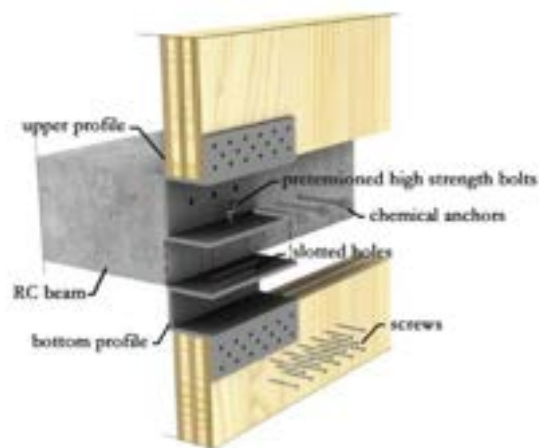


Figura 48. Schema del damper [fonte: Margani et al., 2020]

Il sistema consente rapida e facile installazione esterna, previene danni in caso di terremoti di bassa o media intensità e si adatta bene ai più comuni edifici con telaio in cemento armato. Ad esempio, negli edifici con travi piane e balconi RC esterni, il profilo superiore può essere fissato direttamente allo sbalzo soprastante. I pannelli in CLT sono premontati *off-site* con i profili superiori, mentre i profili inferiori sono fissati in sede durante l'installazione per allineare e collegare correttamente le superfici di attrito dei due profili. Anche l'ispezione e la manutenzione del damper sono facilitate da strisce scorrevoli, che possono essere facilmente rimosse. Queste strisce scorrevoli (*string course*, Figura 47) sono collegate solo ai pannelli superiori, permettendo lo scorrimento in caso di evento sismico.

L'installazione di entrambi i pannelli prefabbricati richiede l'utilizzo di attrezzature di sollevamento (gru), evitando costi e tempi necessari per allestire il ponteggio. L'installazione rapida e semplice riduce il rischio di errori e ritardi imprevisti sul posto, oltre a consentire una facile rimozione e sostituzione di tutti i componenti.

Il sistema di retrofitting rappresenta una soluzione ecologica, grazie all'utilizzo di pannelli prefabbricati a base di legno che integrano materiali e componenti riciclati e/o riciclabili a basso consumo energetico. L'utilizzo di componenti preassemblati, l'installazione a secco esterna e l'innovativa configurazione dello smorzatore possono inoltre ridurre notevolmente i costi e i tempi di realizzazione e i disagi per gli occupanti con il risultato di un sistema sostenibile da un punto di vista sociale, economico e ambientale.

Le simulazioni termiche dinamiche eseguite sul modello parametrico di un tipico condominio italiano a telaio in cemento armato situato nel Sud Italia, sia prima che dopo la ristrutturazione, hanno confermato che la soluzione proposta riduce significativamente la domanda di energia: il fabbisogno energetico complessivo

annuo per il riscaldamento e il raffrescamento è stato ridotto fino al 56%, mentre i maggiori risparmi energetici sono stati osservati durante il riscaldamento invernale nei piani intermedi.

Il confronto tra l'intervento di retrofitting integrato suggerito e una soluzione tradizionale basata su un'applicazione ETICS ha dimostrato che le due soluzioni erano simili in termini di risparmio energetico, mentre le prestazioni termiche dinamiche delle pareti esterne sono migliorate notevolmente con l'aggiunta di pannelli prefabbricati in legno.

2.2.12 Esempi di sistemi commerciali per l'adeguamento energetico e sismico

Una interessante applicazione commerciale viene proposta dalla azienda Wood Beton S.p.A. quale modello industrializzato di adeguamento sismico, energetico e impiantistico degli edifici residenziali e industriali non sottoposti a vincolo. Si tratta di pareti in X-LAM dotate di uno strato di isolante che permette di aumentare le prestazioni termiche della struttura e consente un elevato efficientamento dal punto di vista energetico.

Lo schema realizzativo del sistema costruttivo denominato *Rhinoceros* prevede due possibili configurazioni: *Rhinoceros-Wall*[®] (schema riportato in Figura 49) e *Rhinoceros-Steel*[®] (Figura 50).

Il modello *Steel* si differenzia dal modello *Wall* per la presenza di un telaio in acciaio, fissato al modulo prefabbricato in calcestruzzo, e di un isolante in lana di roccia, fermi restando il cunicolo verticale per il passaggio degli impianti, i mezzi di ancoraggio alla struttura esistente, il giunto tra i moduli prefabbricati e il modulo di tamponamento rimovibile.

- *Rhinoceros-Wall*: sistema costruttivo industrializzato in legno per edifici mono e plurifamiliari fino a 3 piani.



Figura 49. Render del sistema costruttivo Rhinoceros-Wall

- *Rhinoceros-Steel*: sistema costruttivo industrializzato in legno, il secondo in acciaio per edifici industriali e le palazzine residenziali fino a 7-8 piani.



Figura 50. Render del sistema Rhinoceros-Steel

Il sistema messo a punto in fabbrica prevede la realizzazione di un esoscheletro multifunzionale che, con la posa di un solo elemento, permette di adeguare l'edificio dal punto di vista sismico ed energetico, in tempi brevi, con impianti ispezionabili e di realizzare un intervento secondo i principi dell'economia circolare. Le nuove pareti formano l'esoscheletro della vecchia struttura, irrigidendola nei confronti delle azioni sismiche ed assorbendole qualora l'edificio non ne fosse in grado.

Il sistema garantisce rapidi tempi di esecuzione, riduzione dei costi e dei disagi arrecati agli utenti/occupanti, qualità e sicurezza elevata per gli operatori, incremento del numero di interventi, rapido sviluppo del sistema, standardizzazione dei criteri di progettazione e produzione.

In funzione delle esigenze del Cliente le tipologie di intervento sono di due tipi:

- Modalità graduale: mantenimento di fondazioni, copertura e degli impianti; installazione di nuove pareti.
- Modalità "radicale": rifacimento di fondazioni, copertura e degli impianti e posa di nuove pareti.

Le fasi operative del processo prevedono la realizzazione di elementi prefabbricati accostati tali da riprodurre in stabilimento la parete prefabbricata destinata ad essere incastrata in fondazione e collegata puntualmente alla parete perimetrale esistente.

Vengono eseguite una serie di operazioni tipiche dell'edilizia *off-site*: rilievo edificio mediante utilizzo di drone/laser scanner; settorializzazione dei dati e disegno 3D; progetto strutturale ed energetico dell'esoscheletro: modellazione con il software PROSAP per la definizione delle sollecitazioni sismiche e flessionali dei setti; disegni costruttivi di produzione e montaggio; produzione dei moduli in stabilimento; trasporto in cantiere; montaggio dei componenti con ancoraggio ai muri dell'edificio (Figura 51) e in fondazione (Figura 52); rimozione dei balconi e loro sostituzione una volta posizionati i pannelli verticali.

I balconi sono prefabbricati in stabilimento e posizionati in cantiere. Il rifacimento della copertura è opzionale, realizzabile attraverso sistemi costruttivi industrializzati forniti dal produttore (Prepanel® o Preconnect®).

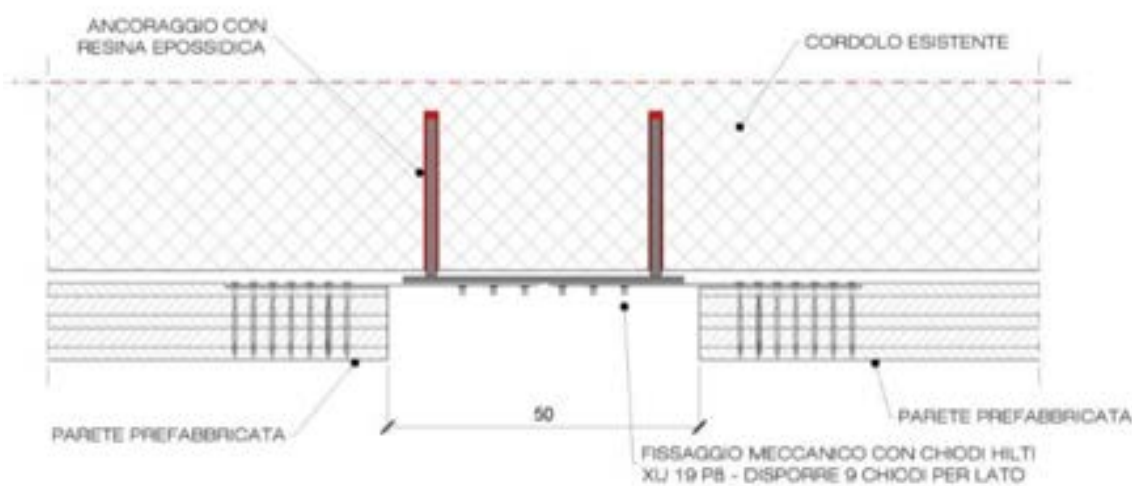


Figura 51. Schema di ancoraggio ai muri in corrispondenza del cordolo (sistema Rhinoceros-Wall)

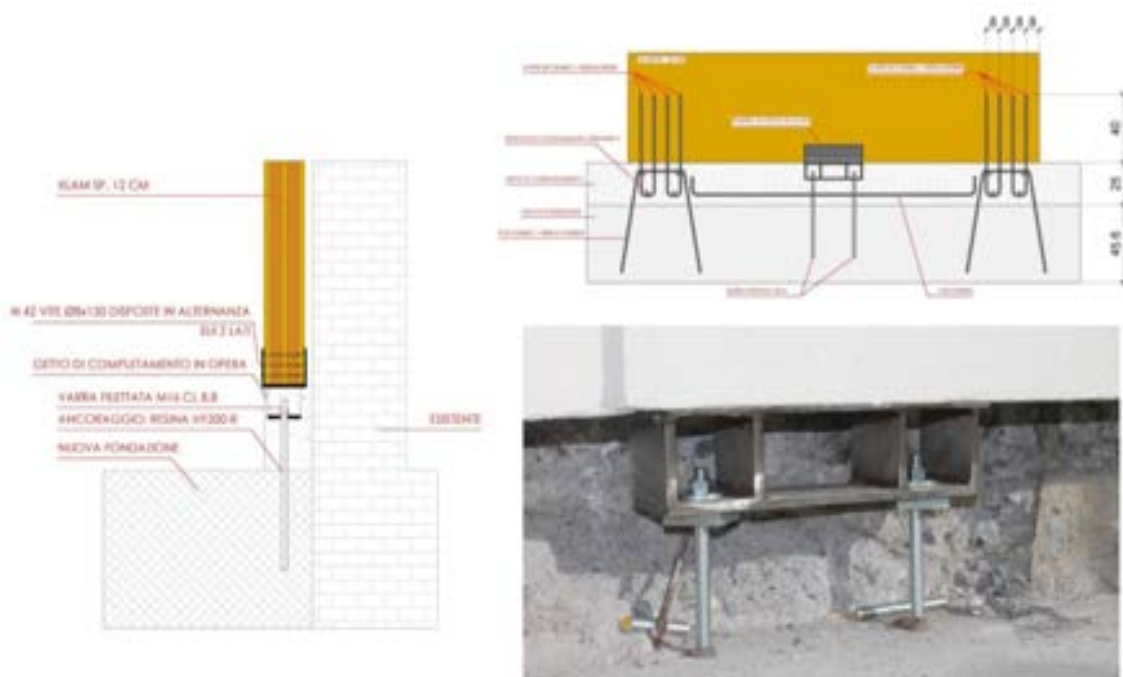


Figura 52. Ancoraggio in fondazione (sistema Rhinoceros-Wall - Wood Beton)

Il livello di integrazione impiantistica offerto è elevato grazie alla possibilità di integrare (o sostituire) all'interno di opportuni cavedi verticali la rete di distribuzione impiantistica verticale (Figura 53).



Figura 53. Cunicolo passaggio impianti e modulo di tamponamento rimovibile (sistema Rhinoceros-Wall)

Entrambe le soluzioni sono compatibili con le detrazioni fiscali per l'adeguamento sismico e riqualificazione energetica.

2.3 Proposte di soluzioni impiantistiche

All'interno della seconda annualità di ricerca, sulla base dei risultati emersi dall'analisi degli impianti esistenti (Sezione 2.1) e dall'analisi dei sistemi prefabbricati che prevedono l'inserimento di tubi e condotti della rete di distribuzione degli impianti (Sezione 2.2), sono state individuate una serie di soluzioni impiantistiche da tenere in considerazione per la riqualificazione degli impianti termici da eseguire contestualmente alla riqualificazione dell'involucro.

La presente sezione introduce le soluzioni impiantistiche adottate nell'analisi, specificandone le principali caratteristiche, i vantaggi e gli eventuali svantaggi, fornendo un'analisi qualitativa delle prestazioni attese in differenti condizioni operative. Vengono fornite le motivazioni delle scelte progettuali e una descrizione generale degli schemi d'impianto, contestualizzati nella valutazione dei potenziali risparmi ottenibili a seguito di interventi di rifacimento e/o sostituzione e/o integrazione di sistemi finalizzati al riscaldamento (e raffrescamento) di unità immobiliari residenziali.

Le soluzioni impiantistiche considerate sono ottenute dalla combinazione dei differenti sistemi di generazione (caldaie a condensazione, pompe di calore, sistemi ibridi), distribuzione (ad aria o acqua), emissione (radiatori o ventilconvettori per i sistemi ad acqua, aria canalizzata o split per sistemi ad aria).

Viene presentata una valutazione qualitativa delle soluzioni impiantistiche effettuata a parità di condizioni climatiche, di tipologia edilizia e di condizioni di fabbisogno termico che ha lo scopo di orientare nella scelta preliminare delle tecnologie che possono essere considerate nel processo di riqualificazione energetica.

2.3.1 Sottosistema di distribuzione: impianti ad aria e ad acqua

2.3.1.1 Impianti ad aria

Parte degli impianti proposti prevedono l'utilizzo di un impianto di distribuzione ad aria. Come illustrato nella Sezione 2.2.9, numerosi progetti di ricerca hanno verificato la fattibilità dell'integrazione di impianti di distribuzione ad aria all'interno di pannelli isolanti prefabbricati in differenti configurazioni. Nel caso delle tipologie dei sistemi considerati in questi progetti, si osserva come la maggior parte dei casi riguardino aree geografiche caratterizzate da climi particolarmente rigidi (Repubblica Ceca, Danimarca, Polonia, Repubbliche baltiche, ecc.). Al di là della maggiore rilevanza di interventi di *deep renovation* in queste zone, gli impianti ad aria presentano l'ulteriore vantaggio di garantire un ricambio d'aria ottimizzato ed efficiente, anche grazie all'installazione di sistemi di recupero termico.

Nel contesto italiano, impianti ad aria possono presentare numerosi vantaggi. Nelle aree più fredde (ad esempio nelle zone climatiche E e F) possono permettere, come nei casi sopracitati, di raggiungere elevati livelli di comfort ambientale e di efficienza energetica. Nelle zone temperate, invece, sistemi di questo tipo possono permettere di soddisfare sia il fabbisogno di riscaldamento invernale che quello di condizionamento estivo, facendo ricorso all'utilizzo di pompe di calore reversibili come generatore di calore, permettendo così di soddisfare il fabbisogno termico per riscaldamento e raffrescamento con un unico sistema, riducendo i costi di installazione e manutenzione, i consumi energetici e l'impatto visivo delle unità esterne.

Nel caso di distribuzione ad aria, le unità di emissione possono essere rappresentate da split o bocchette, a seconda delle esigenze del caso specifico. Gli impianti multi-split permettono con maggiore facilità una regolazione autonoma della temperatura degli ambienti da climatizzare, in quanto consentono di personalizzare le impostazioni di temperatura e flusso dell'aria, a fronte di un maggior costo di installazione e manutenzione e maggiore impatto visivo. Dall'altro lato, gli impianti canalizzati sono sistemi più semplici e meno impattanti dal punto di vista estetico, ma richiedono la realizzazione di canalizzazioni più complesse e non permettono regolazioni locali.

2.3.1.2 Impianti ad acqua

L'integrazione di impianti di distribuzione ad acqua come parte di lavori di riqualificazione spinta di involucri edilizi non è una pratica comune né dal punto di vista di progetti di ricerca né tantomeno industriale. Ciò

nonostante, non paiono esserci ostacoli all'installazione di questo tipo di sistemi: i tubi degli impianti di riscaldamento hanno tipicamente diametri inferiori rispetto a quelli dei condotti di ventilazione forzata, e quindi potrebbero essere utilizzati in maniera analoga. Il diametro inferiore potrebbe, in determinate condizioni, permettere addirittura la possibilità di posizionare le condutture della rete di distribuzione dell'acqua dell'impianto di riscaldamento nell'intercapedine che si viene a creare tra la parete perimetrale e i pannelli isolanti prefabbricati per il retrofit energetico dell'involucro .

Gli impianti di distribuzione ad acqua permettono di adattarsi a tipologie di impianto convenzionali e molto diffuse in ambito residenziale. Questi impianti presentano un livello di complessità inferiore rispetto agli impianti ad aria, e una maggiore facilità di esecuzione degli interventi di manutenzione. Il vantaggio della minore spesa energetica per la circolazione del fluido termovettore è però spesso compensata dalla necessità di ricorrere a temperature del fluido più elevate con aggravio delle prestazioni degli impianti di generazione, principalmente nel caso di utilizzo di sistemi in pompa di calore.

In questo studio sono stati considerati i ventilconvettori (o fan coil) come principale sistema di emissione, in quanto sono alimentati con acqua a bassa temperatura, inferiore alla temperatura di funzionamento dei radiatori, terminali più comunemente utilizzati. Il caso di utilizzo dei radiatori è stato preso in considerazione nell'analisi effettuata sia per la maggior diffusione come terminali di emissione negli impianti di riscaldamento del patrimonio edilizio esistente che per la maggior semplicità del sistema. Il caso dei pannelli radianti non è stato tenuto in conto, nonostante la maggiore efficienza energetica di questi sistemi a causa della temperatura operativa ancora inferiore. L'utilizzo di pannelli radianti a pavimento risulterebbe troppo oneroso dal punto di vista dei lavori da realizzare, quindi venendo meno a uno dei principi di base di questo progetto: quello di minimizzare l'impatto dei lavori sui residenti. L'utilizzo di pannelli a parete, invece, offre una serie di problematiche minori ma che comunque, nel complesso, hanno portato a scartare questa ipotesi: la riduzione della superficie utile degli ambienti, la problematica di gestione delle pareti con finestra, la limitata superficie di scambio (che rischia di richiedere temperature elevate), e alcune difficoltà "pratiche" come l'impossibilità di posizionare mobili di fronte a tali pareti o appendervi quadri o mensole.

2.3.2 Sottosistema di generazione: caldaie a condensazione, pompe di calore e sistemi ibridi

La scelta dell'unità di generazione da abbinare all'impianto dipende principalmente dalla zona climatica. I sistemi di generazione principali che si possono considerare sono i seguenti:

- Caldaia a condensazione
- Pompa di calore
- Sistema ibrido

2.3.2.1 Caldaia a condensazione

Impianti con sistemi di generazione basati su caldaie a condensazione sono più indicati per zone climatiche più fredde, dove l'utilizzo di impianti puramente basati su pompe di calore è sconsigliabile sia a causa della ridotta efficienza che a causa di elevati rischi di formazione di brina sull'unità esterna durante le numerose giornate con temperature prossime a 0°C.

2.3.2.2 Pompa di calore

Nel caso invece di zone termiche dal clima più mite è consigliato l'utilizzo di sistemi puramente basati su pompe di calore reversibili, al fine di ridurre i costi di installazione e semplificare il sistema, pur mantenendo il vantaggio di poter garantire il comfort interno tanto in estate quanto in inverno.

Gli impianti basati (unicamente o in parte) sulle pompe di calore forniscono due ulteriori benefici:

- La possibilità di invertire il funzionamento durante la stagione estiva, assumendo quindi la funzione di condizionatori e permettendo quindi il raffrescamento degli ambienti. Questo è particolarmente vero nel caso di impianti con distribuzione ad aria, mentre nel caso di impianti di distribuzione ad acqua i benefici derivanti dall'utilizzare il sistema per il raffrescamento sono inferiori;

- La maggiore facilità di integrazione con fonti di energia rinnovabili, e in particolare con il solare fotovoltaico.

2.3.2.3 Sistema ibrido

Un sistema ibrido di riscaldamento rappresenta una soluzione innovativa che combina due differenti tecnologie come una caldaia a condensazione e una pompa di calore con notevoli vantaggi economici e ambientali.

I sistemi ibridi sono potenzialmente installabili in tutte le condizioni climatiche, ma la loro maggiore complessità li rende giustificati principalmente in zone climatiche medio-fredde (quali la zona E e la zona D), dove le condizioni preferenziali per il funzionamento della pompa di calore e della caldaia a condensazione si possono verificare con frequenza confrontabile.

2.3.3 Soluzioni impiantistiche individuate

2.3.3.1 Impianto ad acqua con radiatori

La prima soluzione proposta (**impianto 1**, Figura 54) è rappresentata da un impianto ad acqua alimentato da una caldaia a condensazione che utilizza radiatori come sistema di emissione.

La scelta dei radiatori come unità terminali condiziona la scelta del sistema di generazione: i radiatori funzionano con temperature di mandata relativamente alte ($70 \div 80^{\circ}\text{C}$), che sarebbe poco efficiente ottenere utilizzando pompe di calore, il cui rendimento dipende fortemente dalla differenza di temperatura tra la sorgente fredda e il fluido di destinazione.

Questi sistemi sono particolarmente indicati nei casi in cui l'impianto di emissione sia già presente e assoggettabile a un intervento di riqualificazione, e la loro scelta permette di ridurre la dimensione e i costi di intervento. Si tratta, dunque, di una soluzione che consegue come principale vantaggio quello di passare più agevolmente da un impianto autonomo ad uno centralizzato, o la ristrutturazione completa dell'impianto autonomo.

La limitata efficienza di questo tipo di impianti per il riscaldamento li rende adatti a climi temperati, dove non vi sono particolari esigenze di raffrescamento estivo né di riscaldamento invernale.

La valutazione sulla singola caratteristica è espressa tramite l'attribuzione di un numero di pallini pieni corrispondente ai giudizi "molto basso", "basso", "medio", "alto", "molto alto" (Tabella 18)

Tabella 18. Legenda valutazione impianto

Molto basso	● ○ ○ ○ ○
Basso	● ● ○ ○ ○
Medio	● ● ● ○ ○
Alto	● ● ● ● ○
Molto alto	● ● ● ● ●

In Tabella 19 è riportata la caratterizzazione dell'impianto in termini di tecnologie utilizzate per i differenti sottosistemi (generazione, distribuzione, emissione), l'indicazione per la zona climatica per cui il sistema è consigliato, e una valutazione qualitativa effettuata a parità di condizioni (tipologia edilizia, fabbisogno termico per riscaldamento/raffrescamento, zona climatica, ecc.) dei costi di investimento, del rendimento, della complessità di riqualificazione e della integrabilità con le fonti rinnovabili. In Tabella 19e nelle successive tabelle,

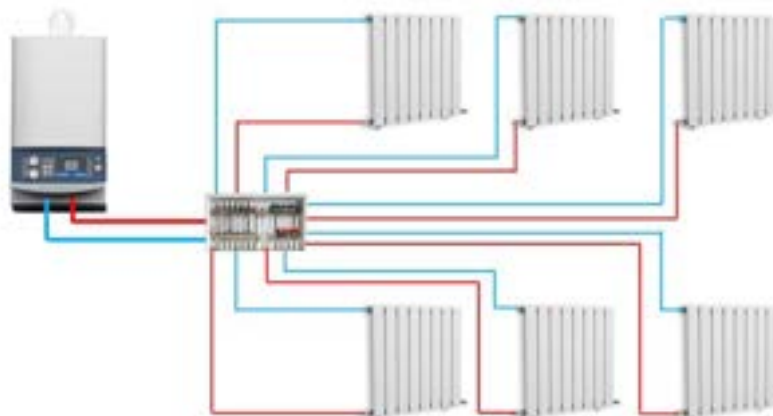


Figura 54. Schema impianto 1

Tabella 19. Descrizione e valutazione impianto 1

Descrizione del sistema	
Generazione	caldaia a condensazione
Distribuzione	acqua
Emissione	radiatori
Valutazione del sistema	
Zone climatiche consigliate	C – D
Costo di investimento	● ○ ○ ○ ○
Efficienza	● ● ● ○ ○
Complessità impianto	● ○ ○ ○ ○
Potenzialità integrazione FER	● ● ● ○ ○

2.3.3.2 Impianto ad acqua con ventilconvettori

L’utilizzo di fan coil come terminali di emissione permette l’utilizzo di acqua a bassa temperatura (45 ÷ 55°C), con possibilità di ricorrere a tipologie diverse di impianto di generazione. In particolare, le tre soluzioni di seguito illustrate hanno in comune i sistemi di distribuzione ed emissione, ma differiscono per il sistema di generazione: caldaia a condensazione, pompa di calore, e sistema ibrido.

L’impianto con caldaia a condensazione (**impianto 2**, Figura 55, Tabella 20) è indicato principalmente per i climi più rigidi (zona climatica F), dove di fatto raramente l’utilizzo della pompa di calore potrebbe apportare vantaggi rilevanti a causa di temperature rigide. Allo stesso tempo, il beneficio della pompa di calore durante il raffrescamento estivo sarebbe di scarsa utilità.

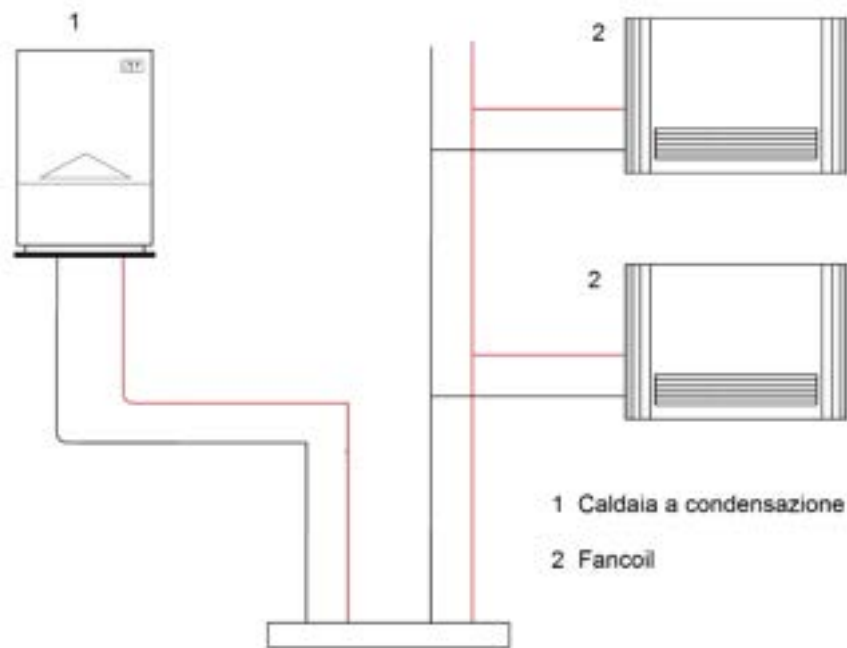


Figura 55. Schema impianto 2

Tabella 20. Descrizione e valutazione impianto 2

Descrizione del sistema	
Generazione	caldaia a condensazione
Distribuzione	acqua
Emissione	fan coil
Valutazione del sistema	
Zone climatiche consigliate	Zona F
Costo di investimento	● ● ○ ○ ○
Efficienza	● ● ● ● ○
Complessità impianto	● ○ ○ ○ ○
Potenzialità integrazione FER	● ● ● ○ ○

L'impianto 3 (Figura 56, Tabella 21), è dotato di pompa di calore "pura" ed è analogamente consigliato per zone climatiche particolarmente miti (zone climatiche A, B e C). In generale la pompa di calore è poco efficiente per temperature esterne al di sotto di 10°C, e non dovrebbe essere utilizzata per temperature inferiori ai 5°C. Queste condizioni si verificano di rado nelle zone climatiche indicate, e di conseguenza è possibile semplificare l'impianto evitando l'installazione di un sistema di generazione ibrido.

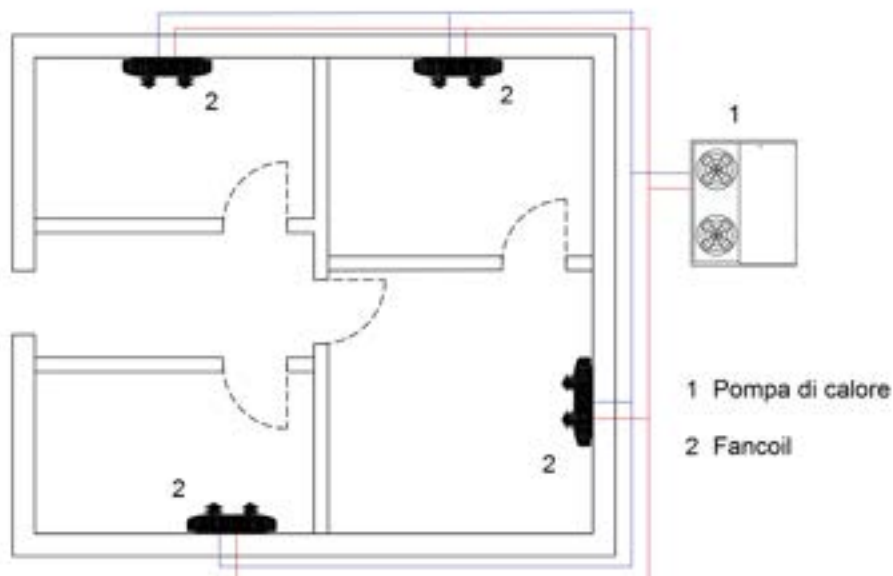


Figura 56. Schema impianto 3

Tabella 21. Descrizione e valutazione impianto 3

Descrizione del sistema	
Generazione	pompa di calore
Distribuzione	acqua
Emissione	fan coil
Valutazione del sistema	
Zone climatiche consigliate	Zona A – Zona B – Zona C
Costo di investimento	●●●○
Efficienza	●●●●●
Complessità impianto	●○○○○
Potenzialità integrazione FER	●●●●●

Infine, l’impianto 4 dotato di sistema di generazione ibrido (Figura 57, Tabella 22) è potenzialmente adatto a qualunque clima, ma particolarmente consigliato per le zone climatiche intermedie (zone D ed E): in queste zone climatiche infatti la frequenza di condizioni per cui l’utilizzo della pompa di calore non è consigliato è sufficiente da sconsigliarne l’installazione in modalità *stand alone*, ma al tempo stesso i periodi dell’anno caratterizzati da un clima fondamentalmente mite sono sufficientemente lunghi da garantire una efficienza del sistema ibrido significativamente superiore a quella del sistema dotato di sola caldaia a condensazione.

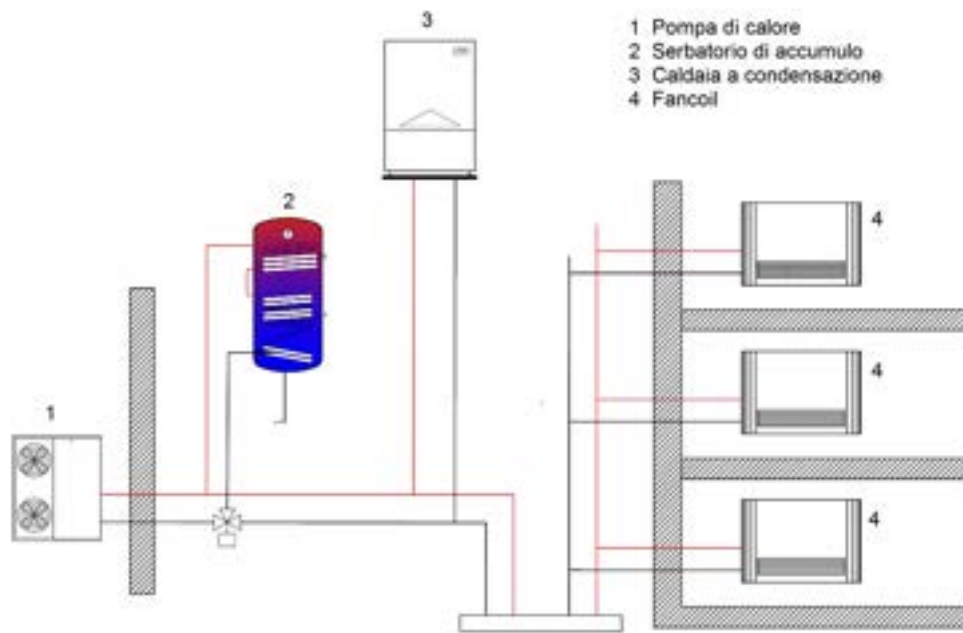


Figura 57. Schema impianto 4

Tabella 22. Descrizione e valutazione impianto 4

Descrizione del sistema	
Generazione	ibrido
Distribuzione	acqua
Emissione	fan coil
Valutazione del sistema	
Zone climatiche consigliate	Zona D – Zona E
Costo di investimento	●●●○
Efficienza	●●●●
Complessità impianto	●●●○
Potenzialità integrazione FER	●●●●

2.3.3.3 Impianti ad aria

I benefici derivanti dall'utilizzo di impianti ad aria sono già stati descritti in Sezione 2.3.1, e derivano principalmente dalle basse temperature operative (che permettono l'utilizzo di sistemi di generazione ad alta efficienza) e dalla maggiore facilità di controllo della qualità dell'aria sia in inverno che in estate.

Nel caso degli impianti ad aria sono considerate solo due opzioni, anche in questo caso basate sulla variazione del sistema di generazione: pompa di calore, sistema ibrido.

L'opzione di un sistema basato su distribuzione ad aria e sull'utilizzo di caldaia a condensazione per il riscaldamento è stata esclusa in quanto tale sistema si presta poco al clima italiano ed è tipicamente suggerito per climi particolarmente rigidi.

L'impianto 5 (Figura 58, Tabella 23) con pompa di calore "pura" è consigliato per zone climatiche particolarmente miti (zone climatiche A, B e C). In generale la pompa di calore è poco efficiente per temperature esterne sotto i 10°C, e non dovrebbe essere utilizzata per temperature inferiori ai 5°C. Queste

condizioni si verificano di rado nelle zone climatiche sopracitate, e di conseguenza è possibile semplificare l'impianto evitando l'installazione di un sistema di generazione ibrido.

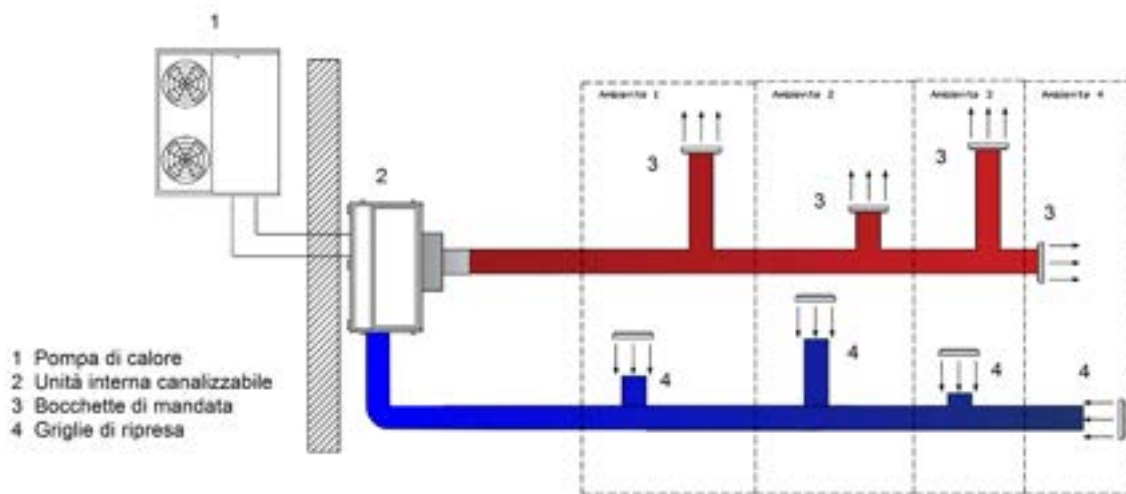


Figura 58. Schema impianto 5

Tabella 23. Descrizione e valutazione impianto 5

Descrizione del sistema	
Generazione	pompa di calore
Distribuzione	aria
Emissione	bocchette o split
Valutazione del sistema	
Zone climatiche consigliate	Zona A – Zona B – Zona C
Costo di investimento	● ● ● ○ ○
Efficienza	● ● ● ● ●
Complessità impianto	● ● ○ ○ ○
Potenzialità integrazione FER	● ● ● ● ●

Infine, l'**impianto 6** (Tabella 24, Figura 59) è rappresentato da un sistema di generazione ibrido potenzialmente adatto a qualunque clima, ma particolarmente consigliato per le zone climatiche intermedie (zone D ed E): in queste zone infatti la frequenza di condizioni per cui l'utilizzo della pompa di calore non è consigliato è sufficiente da sconsigliarne l'installazione in modalità *stand alone*, ma al tempo stesso i periodi dell'anno caratterizzati da un clima fondamentalmente mite sono sufficientemente lunghi da garantire una efficienza del sistema ibrido significativamente superiore a quella del sistema a caldaia a condensazione.

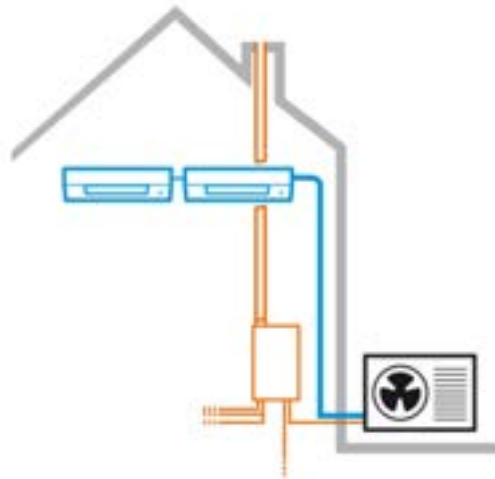


Figura 59. Schematizzazione impianto 6

Tabella 24. Descrizione e valutazione impianto 6

Descrizione del sistema	
Generazione	ibrido
Distribuzione	aria
Emissione	bocchette o split
Valutazione del sistema	
Zone climatiche consigliate	Zona D – Zona E
Costo di investimento	●●●●○
Efficienza	●●●●●
Complessità impianto	●●●●○
Potenzialità integrazione FER	●●●●●

In Tabella 25 si riporta un quadro riassuntivo di confronto delle caratteristiche degli impianti considerati unitamente alla valutazione qualitativa delle prestazioni e di altre macro-aspetti tecnico-economici effettuata a parità di condizioni climatiche, di tipologia edilizia e di condizioni di fabbisogno termico che ha lo scopo di orientare nella individuazione preliminare delle tecnologie da poter considerare in fase di riqualificazione energetica dell'edificio.

Tabella 25. Quadro sinottico delle tipologie impiantistiche individuate

	Impianto 1	Impianto 2	Impianto 3	Impianto 4	Impianto 5	Impianto 6
Generazione	Caldaia condensazione	Caldaia condensazione	Pompa di calore	Sistema ibrido	Pompa di calore	Sistema ibrido
Distribuzione	Acqua	Acqua	Acqua	Acqua	Aria	Aria
Emissione	Radiatori	Fan coil	Fan coil	Fan coil	Bocchette/split	Bocchette/split
Zone climatiche	C - D	F	A - B - C	D - E	A - B - C	D - E
Costo di investimento	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○
Efficienza	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●
Complessità	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○
Integrabilità FER	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●

A partire dall’analisi svolta, possono essere effettuate delle semplici considerazioni preliminari di adottabilità delle soluzioni impiantistiche individuati in base alla zona climatica, a parità di tipologia edilizia e di esigenze termiche:

- Nelle zone climatiche A, B e C gli impianti di tipo 3 e 5 si possono ritenere equivalenti dal punto di vista delle performance, convenienza e flessibilità (possibilità di integrazione con le fonti rinnovabili) rispetto agli impianti di tipo 1;
- In zona climatica D i sistemi ibridi di tipo 4 e 6 sono preferibili rispetto all’impianto tipo 1 classico basato su caldaia a condensazione e radiatori;
- In zona climatica E permane sostanziale equivalenza di scelta tra gli impianti di tipo 4 e 6;
- Per la zona climatica F l’impianto di tipo 2 rappresenta l’unica alternativa percorribile.

3 Conclusioni

La sezione del report dedicata all'integrazione impiantistica è concentrata sulla riqualificazione degli impianti di generazione, distribuzione ed emissione effettuata contestualmente alla riqualificazione dell'involucro dell'edificio.

L'analisi dello stato di fatto (Sezione 2.1 *Analisi degli impianti esistenti*) ha evidenziato la diffusione sul territorio nazionale di soluzioni impiantistiche a bassa efficienza per tutti i sottosistemi componenti (generazione, distribuzione ed emissione), mettendo in evidenza il potenziale di efficientamento che può scaturire da un intervento di riqualificazione combinato che interessi contestualmente l'involucro edilizio e gli impianti termici. Questa sezione dello studio ha permesso inoltre di identificare le caratteristiche impiantistiche dell'edificio ricorrente (già identificato nel dettaglio dal punto di vista d'involucro nel report relativo alla prima annualità di Ricerca di Sistema) necessarie per la definizione di un sistema edificio-impianto di riferimento da utilizzarsi per la valutazione quantitativa della bontà delle soluzioni proposte, prevista nella terza annualità.

L'analisi dello stato dell'arte in materia di soluzioni di integrazione impiantistica negli interventi di riqualificazione profonda dell'involucro edilizio (Sezione 2.2 *Analisi di letteratura su integrazione impianti in sistemi di isolamento modulati prefabbricati*) ha permesso di valutare la fattibilità di soluzioni di rinnovamento impiantistico che includano anche interventi sul sistema di distribuzione. L'attività di ricerca svolta ha permesso di identificare, tra gli innumerevoli progetti europei svolti o in corso sul tema, una serie di progetti che hanno sviluppato innovative soluzioni di integrazione della rete di distribuzione degli impianti nei pannelli prefabbricati, evidenziando una predilezione per le soluzioni basate su impianti di distribuzione a tutt'aria, e una maggiore frequenza di utilizzo nei Paesi dai climi più rigidi. L'analisi ha tuttavia evidenziato come non esista ancora una scelta altrettanto numerosa di soluzioni commerciali: tali tecnologie appaiono dunque ancora più alla fase di studi pilota che in una fase matura di commercializzazione spinta.

Nella sezione 2.3 *Proposta di soluzioni impiantistiche* sono state proposte 6 soluzioni impiantistiche differenti che, in base alle valutazioni effettuate, sono risultate le più appropriate da proporre per la valutazione quantitativa dei potenziali benefici, da svolgersi durante la terza annualità del progetto:

- una soluzione "standard" di riqualificazione d'impianto, basata sulla semplice sostituzione del generatore di calore con una caldaia a condensazione;
- 3 soluzioni con impianto di distribuzione ad acqua, che differiscono per il sistema di generazione (caldaia a condensazione, pompa di calore, sistema ibrido);
- 3 soluzioni con impianto di distribuzione ad aria, che differiscono per il sistema di generazione (pompa di calore e sistema ibrido).

SEZIONE II – ANCORAGGI

4 Introduzione

4.1 Inquadramento dell'attività

Al fine di contribuire alla lotta ai cambiamenti climatici e alle loro conseguenze sull'ecosistema, l'Unione Europea ambisce a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 [1]. Per raggiungere questo obiettivo, l'Unione Europea ha dato vita all'*European Green Deal*, un piano che si propone di trasformare l'Unione Europea in una società dotata di un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse, e competitiva. I principali punti chiave del *Green Deal* europeo sono schematicamente illustrati in Figura 60.

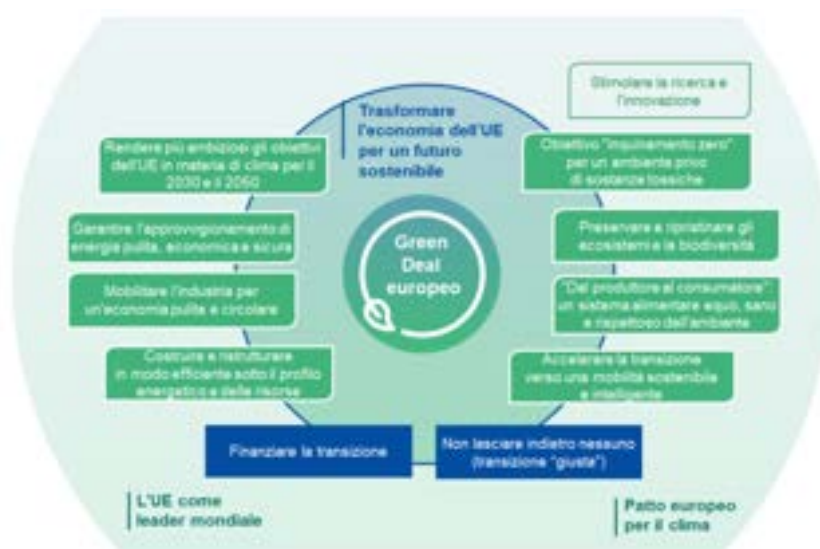


Figura 60. Il *Green Deal* europeo [1]

Al fine di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, l'Unione Europea si pone come primo obiettivo quello di ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 50-55% rispetto ai livelli del 1990 entro l'anno 2030 [1]. Per raggiungere tale obiettivo, risulta di fondamentale importanza intervenire sugli edifici residenziali, che rappresentano il 43% dei consumi finali di energia (Figura 61).

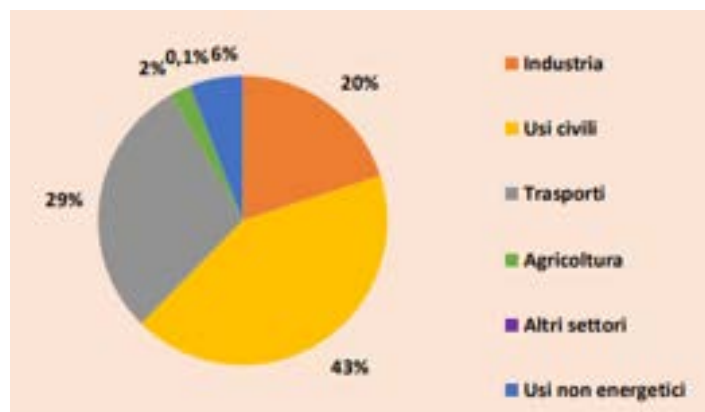


Figura 61. Consumi finali energia per settore per l'anno 2018 (fonte: Eurostat)

Gli edifici residenziali non solo rappresentano una parte rilevante dei consumi finali di energia, ma sono anche caratterizzati da un alto potenziale di efficientamento (oltre il 25% degli edifici registra consumi medi annuali compresi fra 160 e 220 $\frac{kWh}{m^2}$ -anno). Infatti, in Italia circa il 55% delle costruzioni residenziali risale agli anni '60 di cui il 4% a prima del 1919: circa un quarto di questi non ha mai subito interventi di ristrutturazione.

Nell'ambito dello scenario precedentemente descritto, il presente progetto di ricerca si propone di analizzare un intervento di efficientamento energetico idoneo ad essere installato in particolare su edifici esistenti attraverso il ricorso a soluzioni modulari (*Off-Site Construction*). Le soluzioni analizzate dovranno essere in grado di garantire tempi di installazione rapidi, essere poco invasive, avere costi contenuti, garantire una limitata produzione di polveri in cantiere e anche essere sicure nei confronti dell'azione sismica. Il presente progetto si focalizza in particolare su questo ultimo aspetto, analizzando il comportamento nei confronti del sisma di diverse soluzioni di parete. A questi sistemi viene infatti non solo richiesto di svolgere efficacemente la loro funzione isolante, ma di garantire elevati livelli di sicurezza nei confronti dell'azione sismica, per assicurare la salvaguardia della vita umana durante l'evento sismico stesso. Inoltre, al fine di proteggere l'investimento economico necessario per la loro installazione, alle soluzioni di parete viene anche richiesto di mantenere la propria integrità per sismi di bassa intensità, in modo da prevenirne il danneggiamento. Una descrizione più dettagliata delle attività svolte è riportata nel paragrafo seguente.

4.2 Descrizione delle attività svolte

L'attività di ricerca descritta nel presente documento si propone di verificare le prestazioni nei confronti dell'azione sismica di diverse soluzioni di facciata con elevate capacità di isolamento termico.

Tale valutazione è stata eseguita mediante test su tavola vibrante presso la Hall sismica del laboratorio SSPT-MET-DISPREV presso l'edificio F65 del Centro Ricerche ENEA di Casaccia. In particolare, le tipologie di sistema di facciata scelte sono state installate su un manufatto in scala reale in c.a., realizzato *ad hoc*, e sono state sottoposte a test sismici. Pertanto, innanzitutto è stato necessario progettare il manufatto in c.a. (paragrafo 5.1), idoneo ad essere allestito con le diverse soluzioni di facciata); poi, sulla base delle caratteristiche meccaniche e geometriche del provino, sono state progettate le facciate da installare su di esso; quindi, è stato realizzato tutto il sistema da testare ed infine sono state eseguite le prove su tavola vibrante. L'input sismico considerato sia in fase di progettazione, sia in fase di esecuzione delle prove, è quello registrato ad Amatrice il 24 agosto 2016 [2] (paragrafo 5.2). Durante i test è stato utilizzato anche un accelerogramma artificiale. La fase di dimensionamento sia del manufatto in c.a. che dei sistemi di facciata ha compreso anche una serie di analisi numeriche preliminari che hanno consentito l'ottimizzazione delle dimensioni degli elementi progettati (paragrafo 5.3). Sono state eseguite anche analisi numeriche sulla configurazione finale adottata per valutare le effettive condizioni di carico agenti nelle varie fasi di realizzazione del manufatto ed effettuare le verifiche strutturali (paragrafo 0). Si precisa infatti che il manufatto in c.a. è stato realizzato all'esterno della tavola vibrante e poi trasportato su di essa a stagionatura avvenuta, pertanto, è stato necessario anche condurre le verifiche nella fase di sollevamento dello stesso.

La progettazione del sistema di parete da testare è stata eseguita tenendo conto di alcune caratteristiche fondamentali richieste. Infatti, la parete doveva rispettare le seguenti performance:

- essere energeticamente efficiente e sismicamente sicura;
- essere di facile e rapida installazione per tutte le tipologie abitative, con particolare riferimento agli edifici esistenti;
- essere modulare e poter essere prodotta in serie;
- essere durevole e quindi resistente agli agenti atmosferici.

Sulla base delle precedenti considerazioni, sono state progettate diverse tipologie di sottostrutture leggere in metallo (acciaio o alluminio) ed è stata effettuata una campagna di simulazioni numeriche con lo scopo di dimensionare gli elementi di tali sottostrutture nei confronti dell'azione sismica (paragrafo 6). Alla luce dei risultati delle analisi numeriche, è stata fatta una ricerca di mercato per individuare le soluzioni che potessero soddisfare i requisiti stabiliti in fase di progetto e sono state individuate tre soluzioni con cui allestire le pareti del manufatto (paragrafo 7).

Una volta realizzato il provino in c.a. ed allestite tre delle sue pareti con le soluzioni di facciata individuate, sono state eseguite le prove sperimentali su tavola vibrante (vedi paragrafo 8). Le prove sono state effettuate sia considerando il sisma registrato durante il terremoto di Amatrice del 24 agosto 2016 [2], sia considerando due accelerogrammi artificiali. Ogni segnale è stato applicato in maniera incrementale e crescente. Il provino è stato allestito con appositi *markers* in modo da monitorare gli spostamenti in tempo reale in diversi punti della struttura. Al termine di ogni test è stata effettuata anche una ispezione del provino e sono stati rilevati gli eventuali danneggiamenti.

Infine, al termine della campagna sperimentale, i risultati delle prove su tavola vibrante sono stati analizzati per valutare le prestazioni di ogni sistema di facciata testata nei confronti del sisma (paragrafo 6).

5 Progettazione del manufatto in c.a.

5.1 Pre-dimensionamento

Come descritto al paragrafo 4.2, lo scopo della ricerca sperimentale in oggetto è la valutazione del comportamento sismico di un sistema di parete. Tale sistema è stato progettato per essere applicato alle strutture esistenti in c.a. prendendo come riferimento un edificio tipico del panorama edilizio nazionale degli anni '70.

Il manufatto in c.a., che chiameremo per semplicità *provino*, progettato specificatamente per testare le soluzioni di parete su tavola vibrante è costituito da una struttura con quattro pilastri, ancorati ad una trave di fondazione, con solaio latero-cementizio. Il pre-dimensionamento del provino in c.a. è stato eseguito nel rispetto dei seguenti vincoli:

- tipologia strutturale di edifici tipici degli anni '70 nel panorama italiano;
- dimensioni della superficie di piano entro i limiti dimensionali massimi consentiti dalla tavola vibrante (4x4 m);
- altezza di piano di un edificio standard;
- norma tecnica di riferimento D.M. 30 maggio 1972 "Norme tecniche alle quali devono uniformarsi le costruzioni in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica" [3], per la scelta di dimensioni e armature minime degli elementi strutturali;

Sulla base delle prescrizioni normative e dei limiti dimensionali suddetti è stata definita la geometria di Figura 62, nella quale sono riportati anche i dati geometrici che caratterizzano il manufatto.



Dati geometrici

Base quadrata di lato 350 cm

Altezza all'estradosso del solaio 360 cm

Figura 62. Geometria del provino

Nel rispetto delle dimensioni e delle armature minime [3] sono state definite le geometrie degli elementi strutturali travi e pilastri. I pilastri sono caratterizzati da una sezione quadrata 30x30 cm e sono armati con 4 ferri di diametro 14 mm e staffe di diametro 8 mm disposte a passo costante di 20 cm; le travi di piano sono state scelte in un primo momento del tipo emergenti con sezione rettangolare 30x40 cm, armate con 5 ferri di diametro 14mm e staffe di diametro 8 mm disposte a passo costante di 20 cm (vedi Figura 63). Il solaio è realizzato con travetti prefabbricati; le armature di completamento sono riportate in Figura 63.

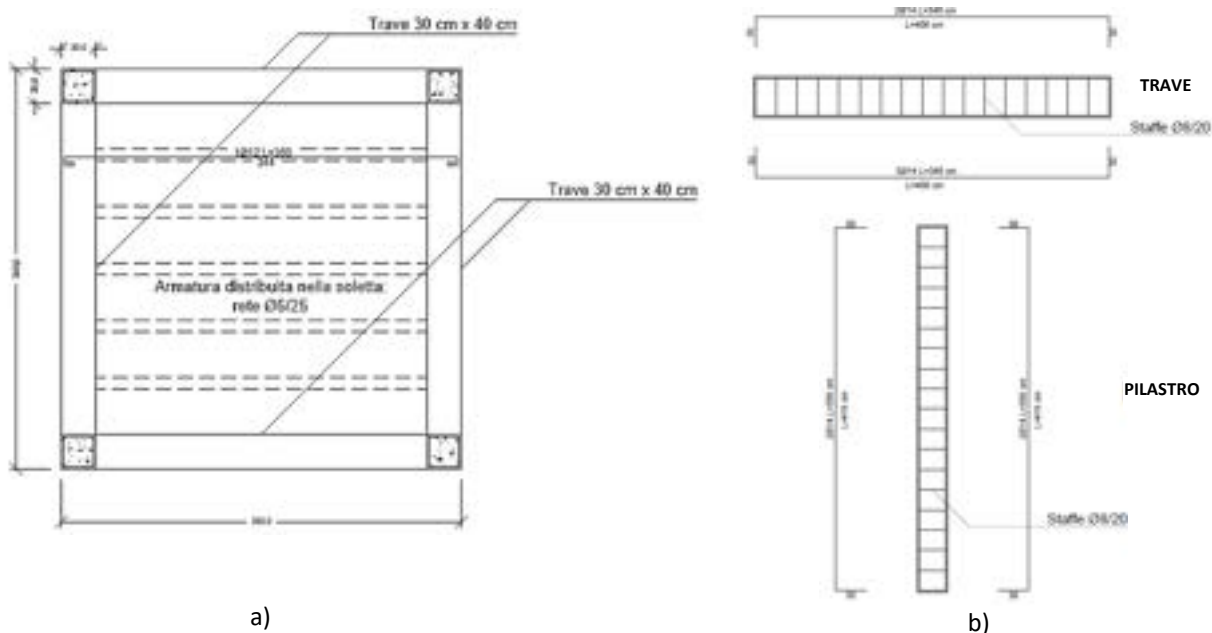


Figura 63. Elementi di primo dimensionamento: a) Carpenteria solaio; b) Distinta armatura travi e pilastri

Una volta definita la geometria del manufatto, è stata svolta una campagna di analisi numeriche preliminari, con lo scopo di valutare la deformabilità del provino (descritte al paragrafo 5.3). Da questa campagna è emerso che la struttura descritta è caratterizzata da una rigidità eccessiva, considerato che, applicando il sisma registrato ad Amatrice, di magnitudo $M_w=6$ (Lat=42.6325 Lon=13.2866 WGS84), del 24 agosto 2016 (codice stazione AMT [2]), il massimo spostamento misurato in testa ai pilastri è risultato essere pari a $d_{max} = 0.8$ cm. Tale valore di spostamento d’interpiano non consentirebbe di valutare adeguatamente le prestazioni del sistema di connessione dei pannelli di rivestimento alla struttura e di fare delle valutazioni realistiche nel corso delle prove su tavola vibrante. Pertanto, si è scelto di rendere la struttura più deformabile realizzando le travi di piano a spessore di solaio con sezione trasversale pari a 40x20 cm, armate con 6 ferri di diametro 14 mm staffe di diametro 8 mm disposte a passo costante di 20 cm, come riportato in Figura 64

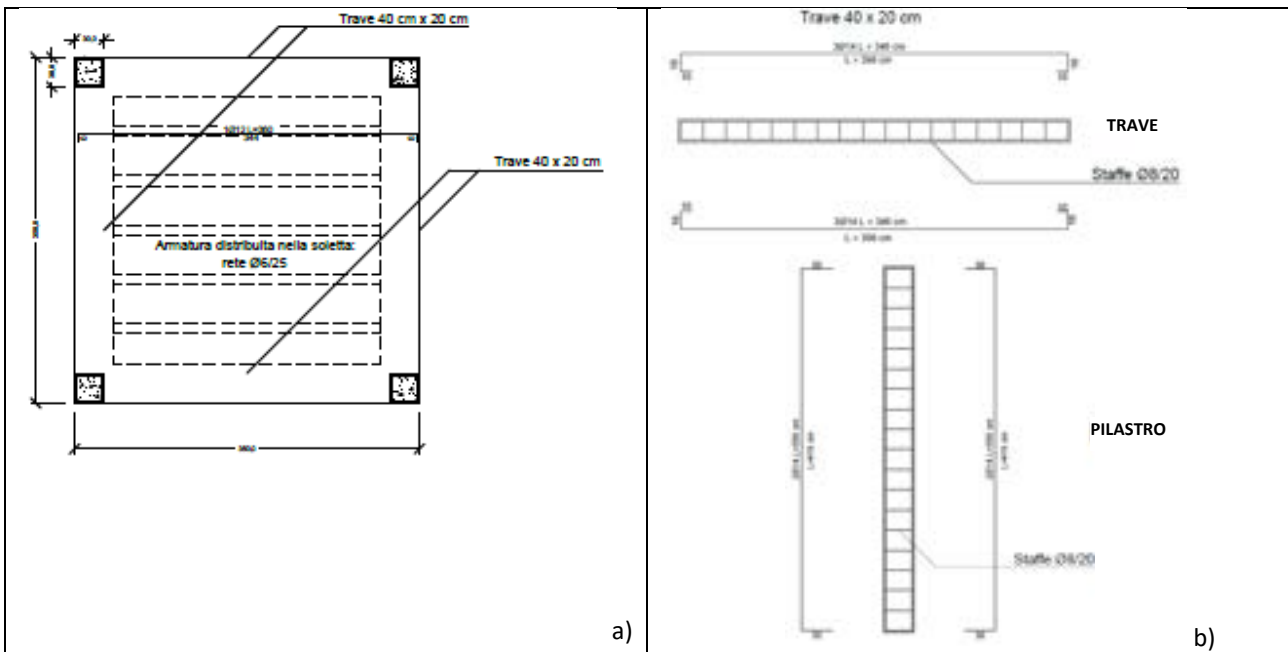


Figura 64. Elementi definitivi: a) Carpenteria solaio; b) Distinta armatura travi e pilastri

Le travi di base del provino sono invece dimensionate per simulare una fondazione su suolo A (base fissa) e contengono anche tre fori per lato per l'alloggiamento delle travi metalliche di ancoraggio alla tavola vibrante (vedi Figura 65).

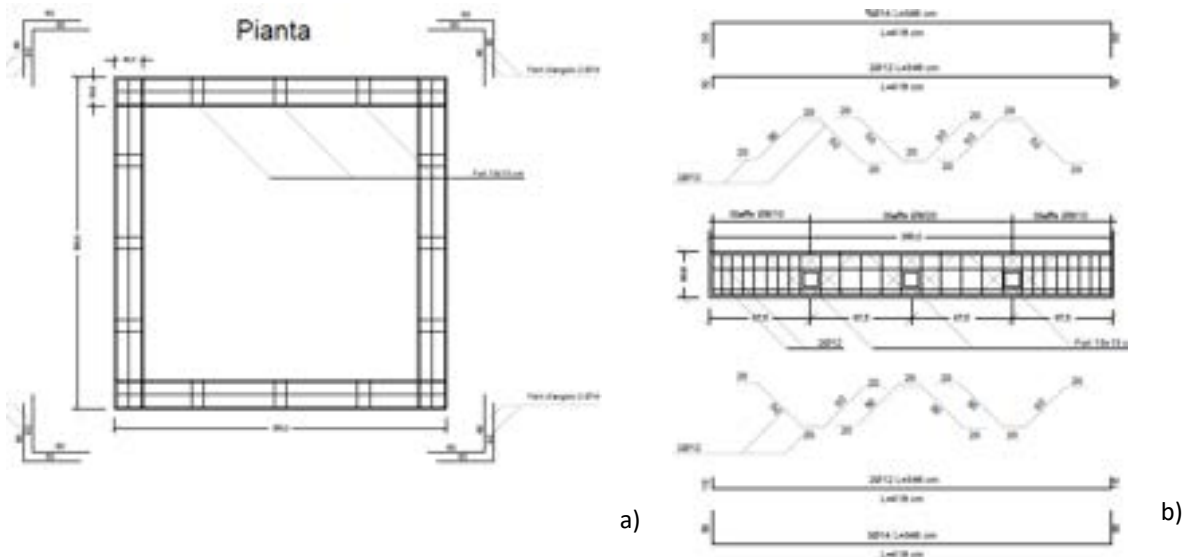


Figura 65. Esecutivi travi di base del provino: a) Configurazione in pianta; b) Distinta delle armature

5.2 Definizione del carico sismico

Sia le analisi numeriche dinamiche, sia le prove sperimentali su tavola vibrante utilizzano come azione sismica una terna di accelerogrammi reali, relativa al sisma registrato ad Amatrice, di magnitudo $M_w=6$ (Lat=42.6325 Lon=13.2866 WGS84, suolo tipo B), il 24 agosto 2016 ([2], codice stazione AMT). La posizione della stazione di misura è mostrata in Figura 66, mentre le tre componenti di accelerazione sono mostrate in Figura 67.



Figura 66. Localizzazione della stazione accelerometrica

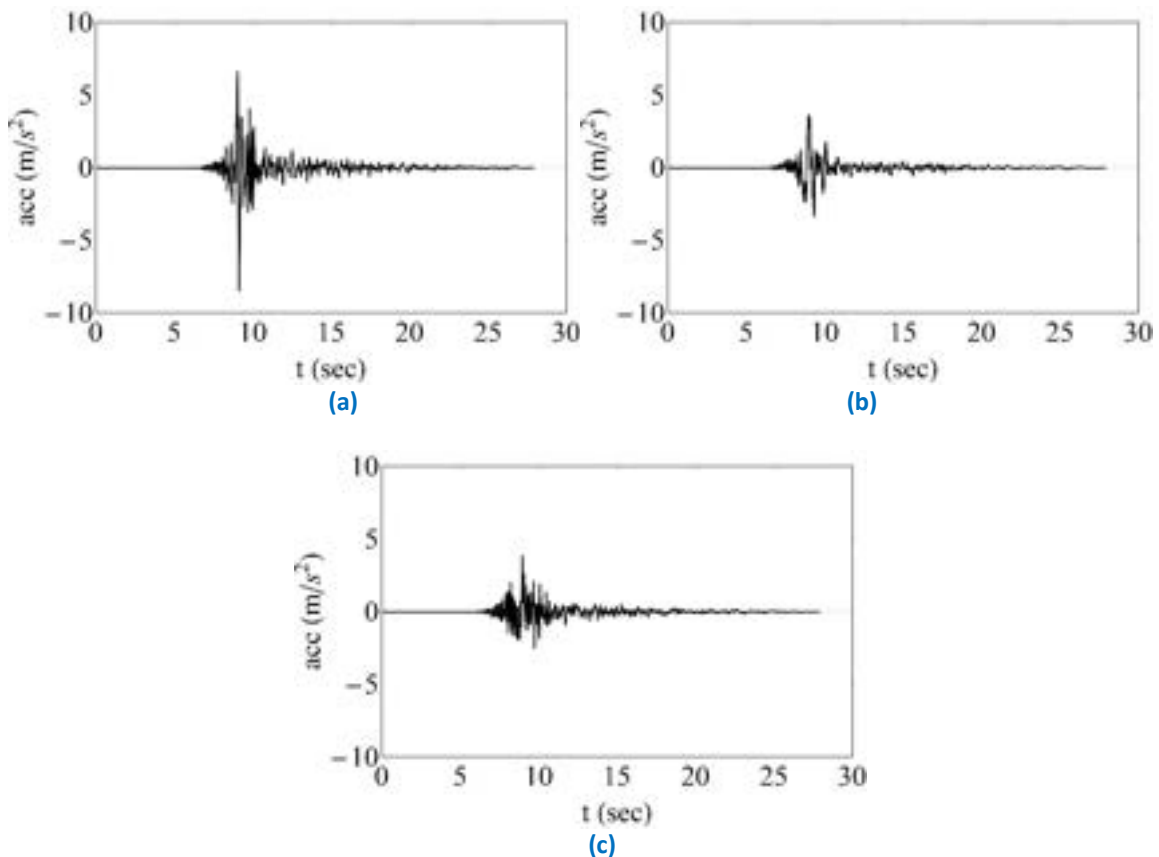


Figura 67. Componenti del terremoto di Amatrice: (a) Est; (b) Nord; (c) Verticale

Gli spettri delle componenti orizzontali in termini di pseudo accelerazione sono riportati nella Figura 68, per un rapporto di smorzamento del 5%. Lo spettro in direzione Est ha picchi più elevati e banda più stretta mentre quello in direzione Nord è più basso e a banda più larga.

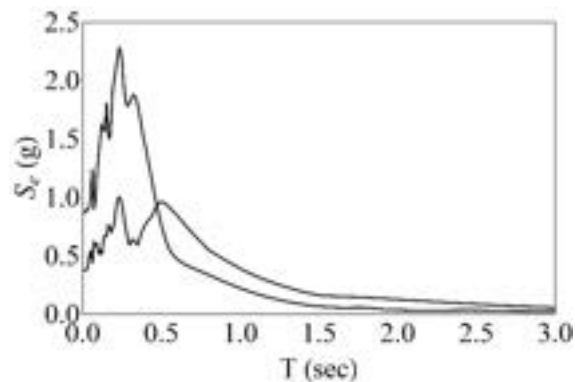


Figura 68. Spettri di risposta delle componenti orizzontali

Al fine di un confronto, gli spettri elastici di normativa per un suolo tipo B, quale quello della stazione di registrazione, vita nominale $v_N=50$ anni e classe d'uso II ($C_u=1$) sono riportati nelle Figura 69 a e b, relativamente alle componenti orizzontale e verticale rispettivamente, per gli stati limite SLO-SLD-SLV-SLC.

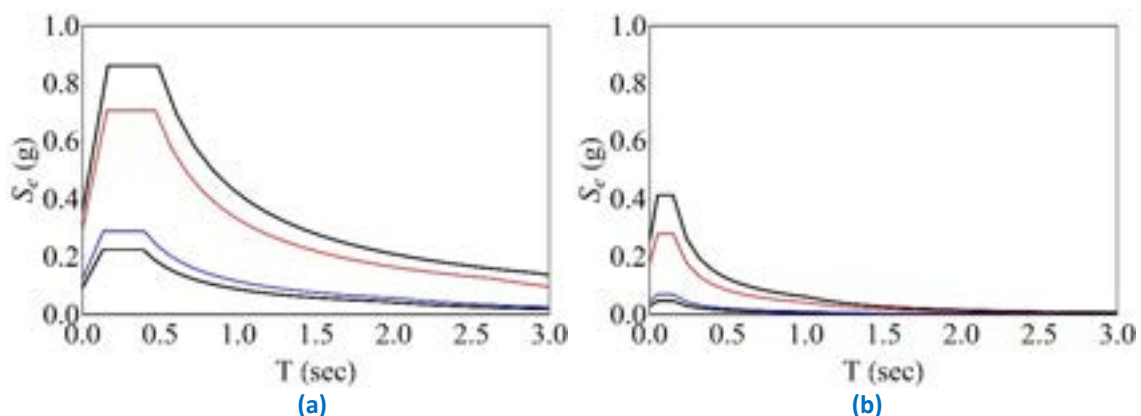


Figura 69. Spettri elastici di normativa: (a) componente orizzontale e (b) componente verticale

Si è consapevoli che, utilizzando un solo terremoto naturale, non è possibile tenere conto degli scarti in difetto e in eccesso imposti dalle norme per la verifica di compatibilità spettrale, ma ci si limita a scalare le accelerazioni in ampiezza in modo che l'ordinata spettrale media della componente più intensa del sisma (E) nell'intervallo di periodi rappresentativi della struttura in esame sia uguale a quella dello spettro. Come riportato in seguito nel paragrafo 5.4.3 relativo alle analisi dinamiche, la struttura ha un periodo fondamentale di circa 0.1 sec (senza masse aggiuntive e considerando il calcestruzzo non fessurato). Nel definire gli accelerogrammi relativi ai diversi stati limite si considera quindi l'ordinata spettrale media nell'intervallo di periodi 0.1-0.3 sec. La Figura 70 riporta tale accelerazione media al variare del parametro α , per il quale vanno divise le accelerazioni per ottenere la ordinata spettrale.

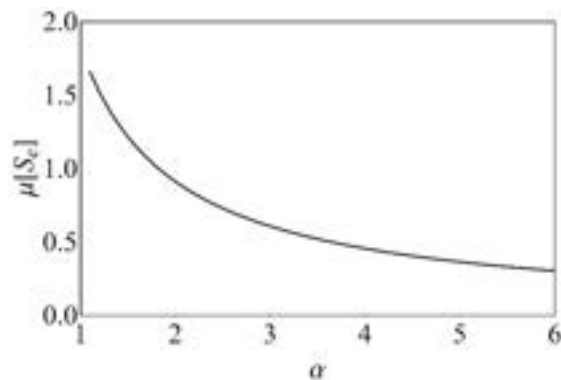


Figura 70. Ordinata spettrale media in funzione di α

Le accelerazioni del sisma opportunamente scalate, relative ai diversi stati limite, sono riportate in Figura 71 per ogni stato limite. Ai diversi stati limite, tutte le componenti del sisma vengono scalate degli stessi fattori α ricavati per la direzione E.

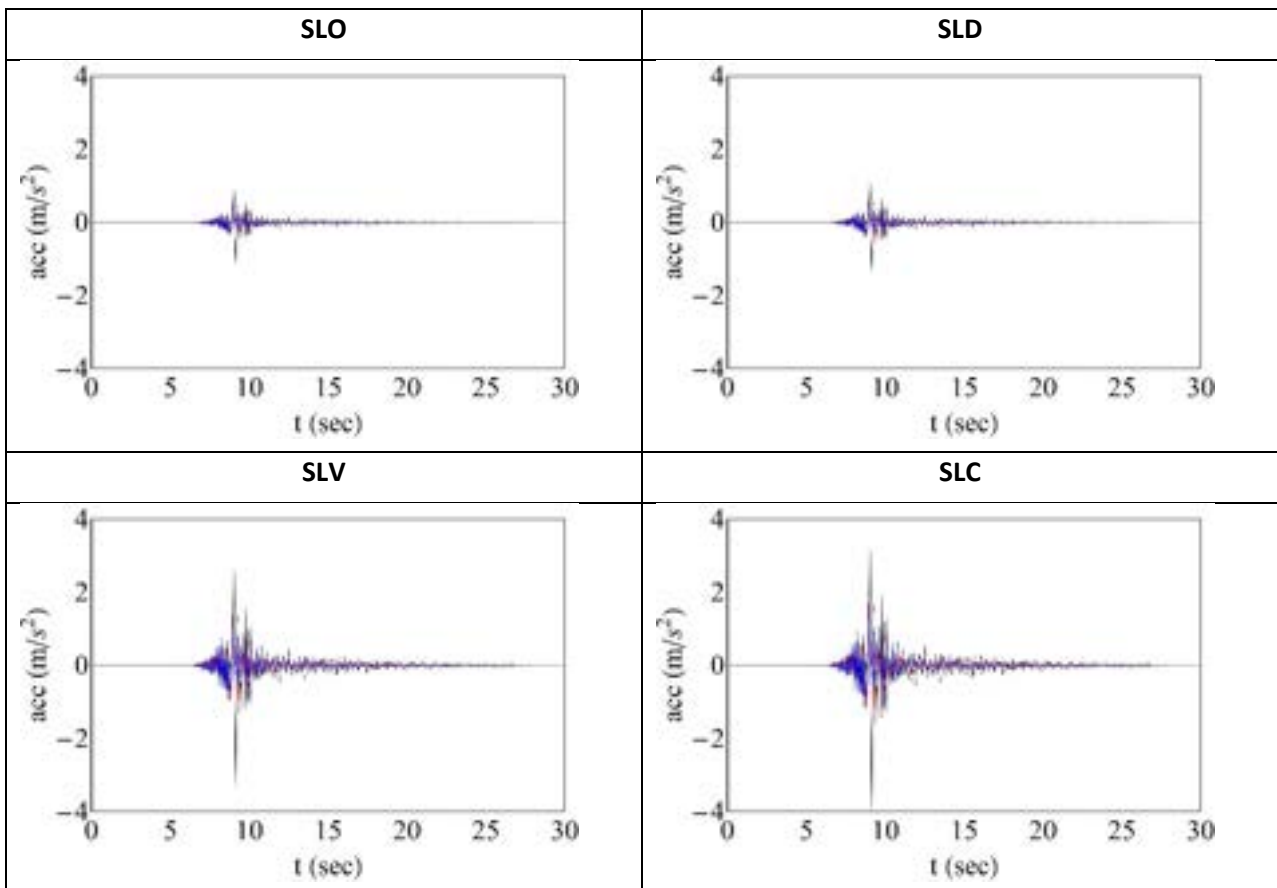


Figura 71. Accelerazioni del sisma scalate per ciascun stato limite

Con gli accelerogrammi riportati in Figura 12 si ottengono gli spettri di risposta riportati in Figura 72, dove in rosso è stato anche riportato lo spettro elastico di normativa per ogni stato limite considerato. Nella stessa figura, si riporta in nero lo spettro della componente in direzione E ed in blu lo spettro della componente in direzione N.

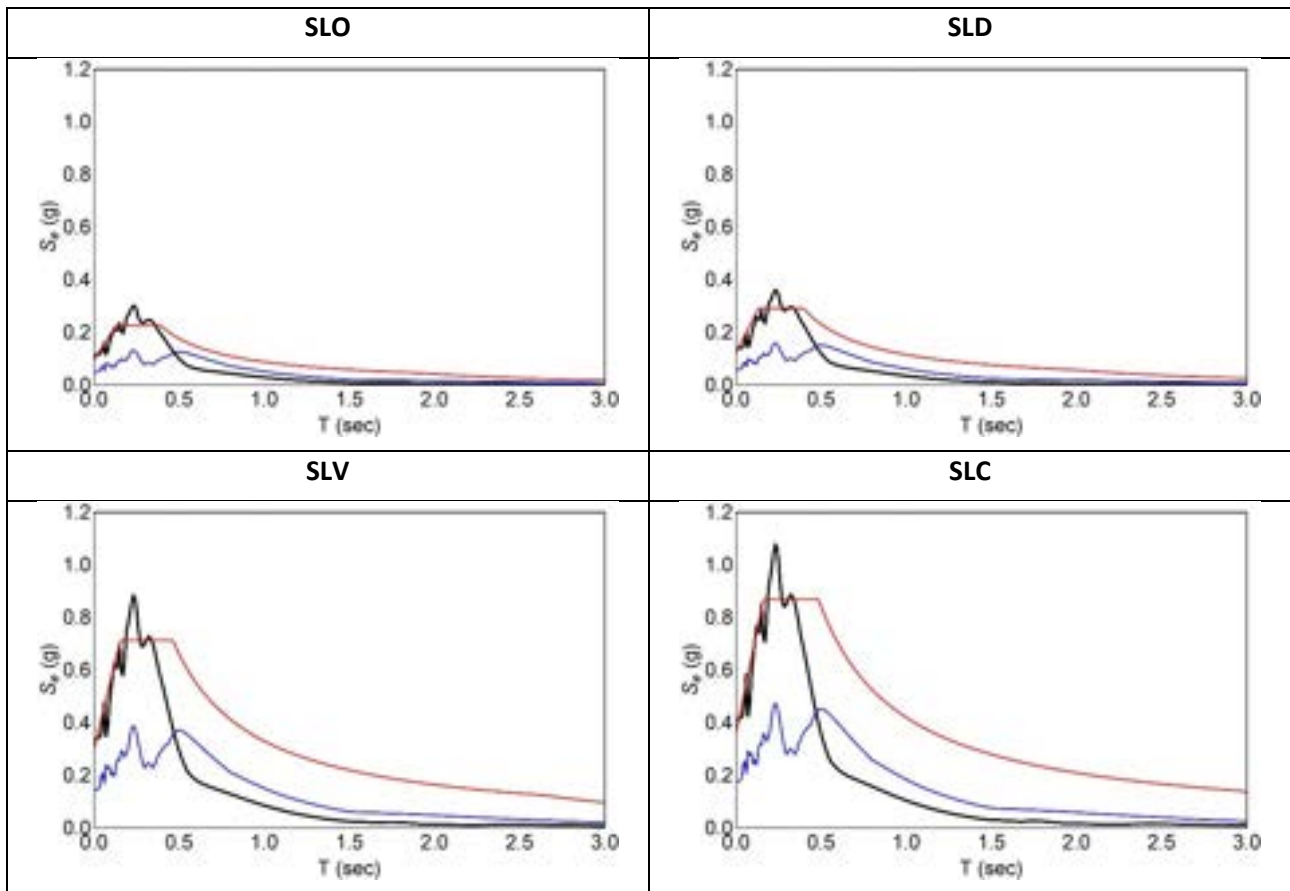


Figura 72. Confronto tra gli spettri degli accelerogrammi scalati e quelli di normativa per: SLO; SLD; SLV; SLC

5.3 Analisi Numeriche preliminari

Partendo dal pre-dimensionamento del provino descritto nel paragrafo 5.1, sono state svolte delle analisi numeriche preliminari finalizzate ad avere una prima valutazione della risposta della struttura in termini di deformabilità e dunque di spostamento di interpiano sotto l'effetto di carico sismico. L'obiettivo è stato quello di svolgere delle valutazioni iniziali sulla base delle quali affinare la progettazione del provino per i test da effettuare su tavola vibrante.

Le analisi sono state effettuate con il software Midas Gen2020 v2.1, mediante l'utilizzo di elementi finiti di tipo *beam* con 6 gradi di libertà per nodo, basati sulla teoria della trave di Timoshenko, e con la convenzione dei segni sulle forze rappresentata nella figura seguente.

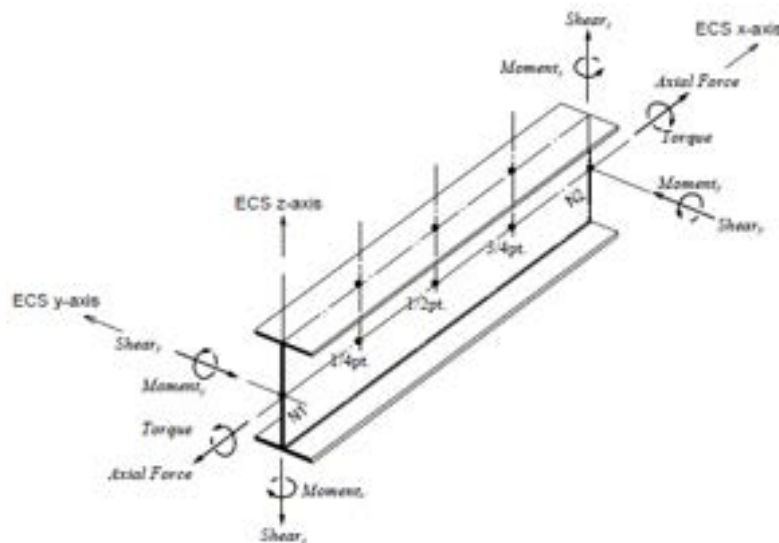


Figura 73. Convenzione di segno sulle forze sull'elemento

In questa fase sono state assunte le seguenti ipotesi:

- configurazione con travi emergenti 30x40 cm descritta in Figura 63;
- inserimento delle sole masse strutturali e ipotesi preliminari sul tipo di tamponatura da utilizzare;
- input sismico rappresentato dal terremoto di Amatrice del 24 agosto 2016 (vedi paragrafo 5.2).

Per la valutazione della risposta statica e dinamica, il telaio, modellato con elementi finiti monodimensionali, è stato ipotizzato in una prima analisi come posizionato al livello del suolo (telaio monopiano descritto al paragrafo 5.3.1), mentre in una seconda analisi è stato considerato come un torrino posto all'ultimo piano di un telaio multipiano rappresentativo di un edificio tipo (telaio multipiano descritto al paragrafo 5.3.2). In seguito, poiché il provino sarà costruito fuori dalla tavola vibrante e movimentato su di essa mediante l'utilizzo di un carro ponte, nel paragrafo 5.3.3 è stata effettuata una verifica strutturale nei confronti del carico generato dal sollevamento.

5.3.1 Telaio monopiano

Il telaio in c.a. analizzato nel presente paragrafo (Figura 74) è caratterizzato da un'altezza pari a 3.2 m e da una pianta con dimensioni pari a 3.2x3.2 m (asse pilastri). Seguendo il dimensionamento iniziale (vedi paragrafo 5.1), i quattro pilastri hanno sezione quadrata con lato 30 cm e le travi presentano una sezione rettangolare con dimensioni 30x40 cm. Per quanto riguarda le condizioni di vincolo, è considerato incastrato alla base. Nel modello sono state implementate (come proprietà delle sezioni degli elementi finiti monodimensionali) le armature degli elementi strutturali così come mostrate in Figura 63.

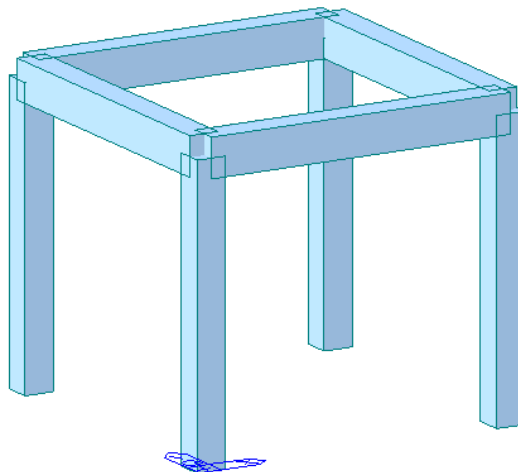


Figura 74. Modello ad elementi finiti del telaio monopiano

Il materiale considerato è un calcestruzzo con resistenza caratteristica cubica a compressione $R_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$ (C25/30), mentre per quanto riguarda le armature, si considera un acciaio del tipo B450C. Il solaio, considerato infinitamente rigido nel suo piano, è stato inserito nel modello per le analisi dinamiche con una massa pari a circa 2.358 kg e un momento di inerzia pari a circa 3.305 kgm^2 . In questa fase, non sono stati considerati carichi aggiuntivi rispetto a quelli strutturali.

Inizialmente si è proceduto effettuando un'analisi statica. In Figura 75, Figura 76 e Figura 77 sono mostrati rispettivamente i diagrammi degli sforzi normali, del momento flettente e del taglio dovuti ai carichi statici (peso proprio).

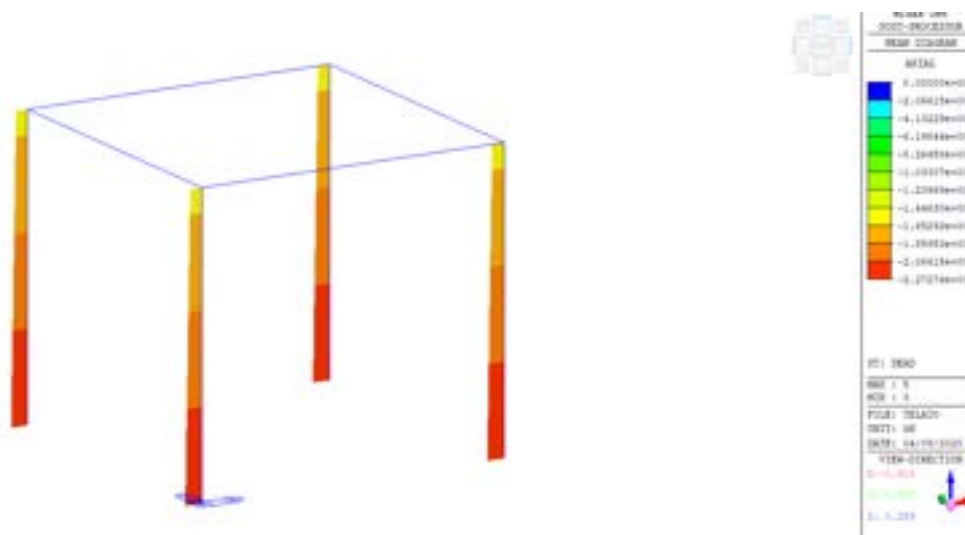


Figura 75. Sforzo normale dovuto ai carichi statici

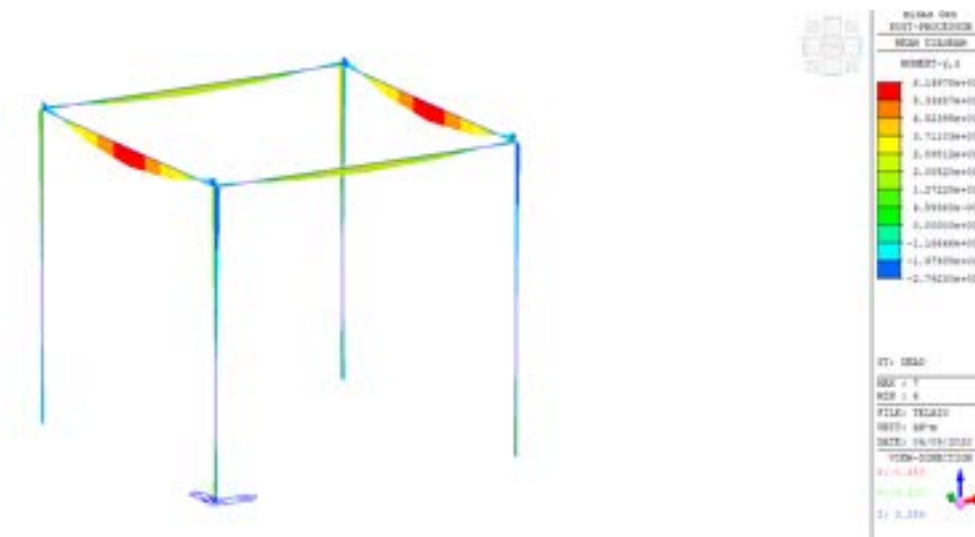


Figura 76. Momento flettente dovuto ai carichi statici

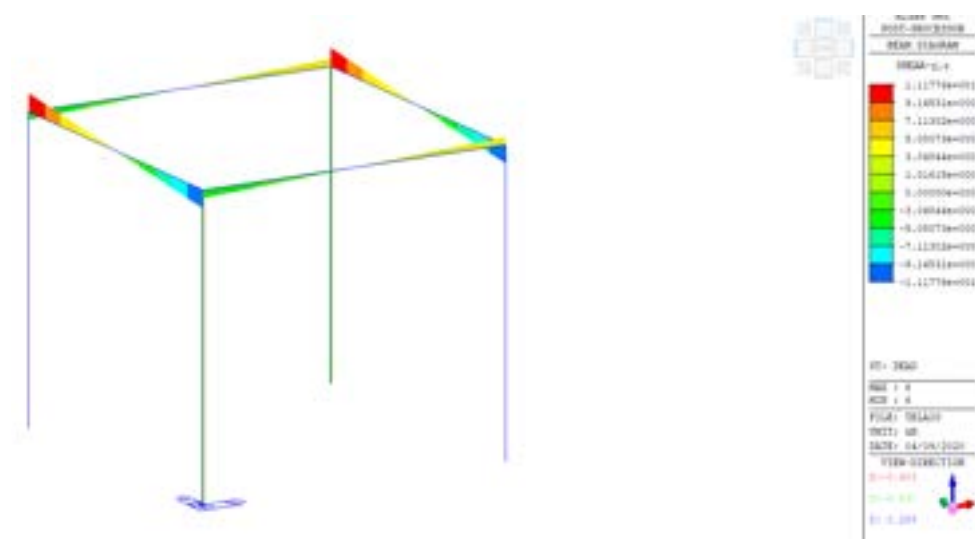


Figura 77. Taglio dovuto ai carichi statici

Per quanto riguarda l'analisi dinamica sono state considerate le masse associate al peso proprio strutturale e al solaio, come da disegni esecutivi descritti al paragrafo 5.1 per la configurazione con travi emergenti. Inoltre, è stato considerato il peso di metà tamponatura stimato in prima approssimazione in 77.95/2 kN. La massa del solaio e della tamponatura sono state applicate nel baricentro del piano insieme al momento di inerzia rotazionale valutato come $M(a^2+b^2)/12$, essendo a e b le dimensioni in pianta del solaio.

Al fine di caratterizzare il provino dal punto di vista dinamico, prima di effettuare l'analisi dinamica con forzante sismica è stata effettuata l'analisi modale lineare. In Figura 78 sono rappresentati i primi tre modi naturali di vibrare, le cui frequenze e corrispondenti periodi sono riportati in Tabella 26.

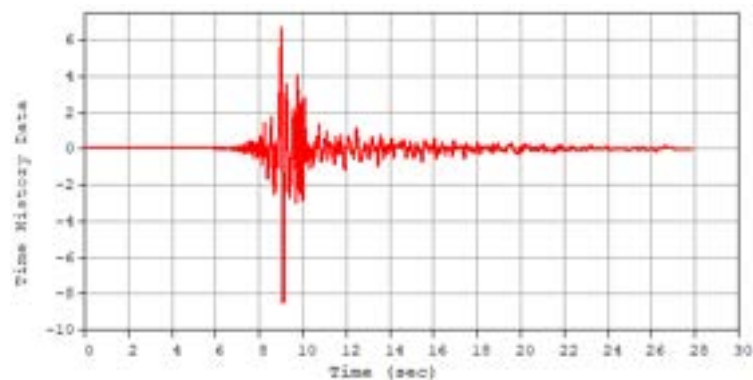


Figura 78. Primi tre modi di vibrare della struttura a telaio monopiano

Tabella 26. Frequenze e periodi dei primi tre modi naturali di vibrare della struttura a telaio monopiano

Modo	Frequenza [Hz]	Periodo [s]
1	8.1	0.120
2	8.1	0.120
3	8.5	0.117

L'analisi numerica dinamica è stata effettuata considerando come input la sequenza sismica che ha colpito l'Italia centrale il 24 agosto 2016 ([2], codice stazione AMT) descritto al paragrafo 5.2. In questa prima analisi, sono state considerate unicamente le due componenti orizzontali di accelerazione riportate in Figura 79.



(a)

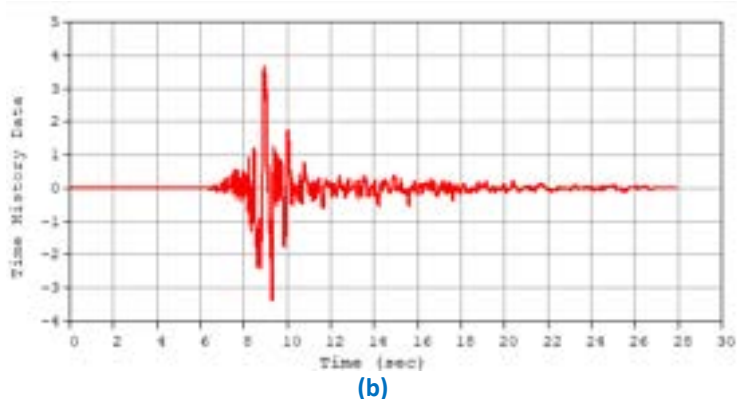


Figura 79. Componenti orizzontali del sisma registrato alla stazione di Amatrice (m/s²): (a) Est; (b) Nord

Dopo aver applicato alla struttura i carichi statici, è stata quindi effettuata un’analisi dinamica non lineare con integrazione diretta delle equazioni del moto. Il modello numerico utilizzato considera la plasticità concentrata nelle zone nodali. La tipologia di plasticità considerata è del tipo isteretico con incrudimento cinematico, caratterizzato da una curva trilineare del tipo mostrato in Figura 80.

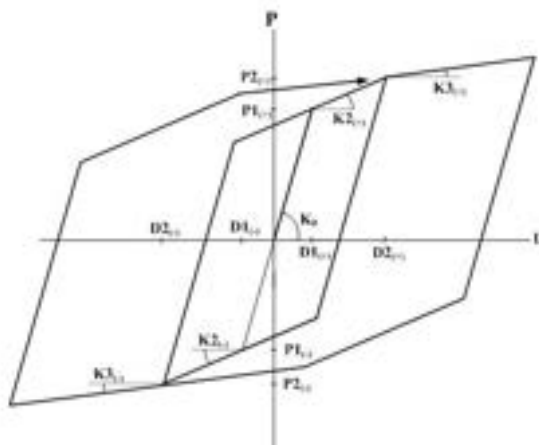


Figura 80. Modello isteretico con incrudimento cinematico

Il primo snervamento mostrato in Figura 80 è definito dal raggiungimento per flessione della tensione di trazione del calcestruzzo. Il secondo punto di snervamento invece definisce le condizioni di rottura per compressione del calcestruzzo o lo snervamento dell’armatura. Per i pilastri è stata considerata anche l’interazione tra momenti flettenti e sforzo normale, valutando ad ogni passo di integrazione lo stato delle cerniere plastiche per mezzo di una superficie di snervamento tridimensionale.

Lo spostamento massimo ottenuto dall’analisi dinamica non lineare condotta è pari a 8.68 mm nella direzione X (componente E del sisma), come mostrato in Figura 81, la quale riporta la configurazione deformata del provino nell’istante in cui si verifica il massimo spostamento.

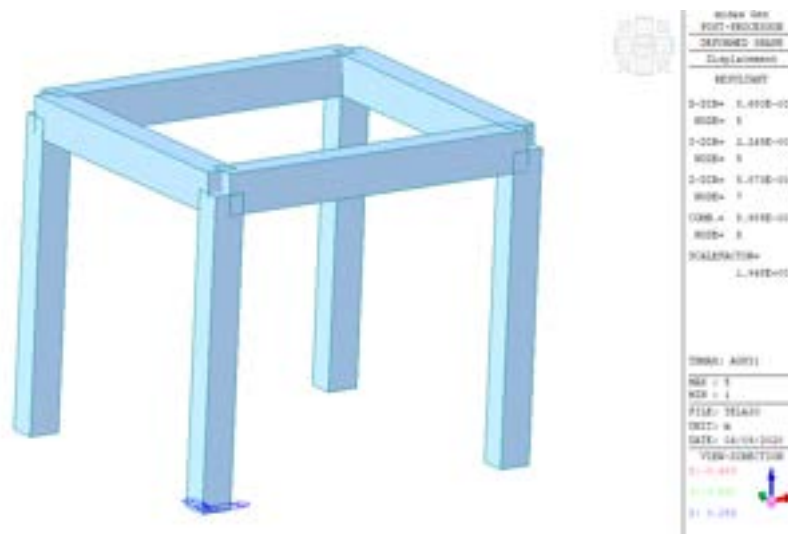


Figura 81. Spostamento massimo ottenuto dalle analisi dinamiche

La Figura 82 invece mostra lo sforzo normale nei pilastri durante il sisma. Si osserva la decompressione per un breve istante in alcuni dei pilastri.

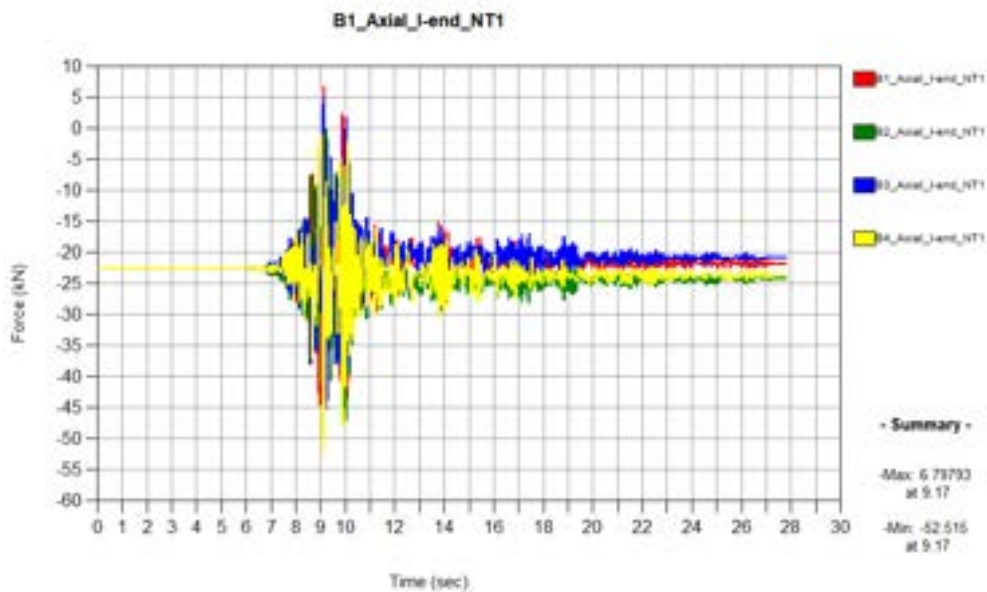


Figura 82. Sforzi normali nei pilastri durante il sisma

In Figura 83 e Figura 84 vengono mostrati, rispettivamente, gli sforzi di taglio e di momento flettente nei pilastri, nelle due direzioni.

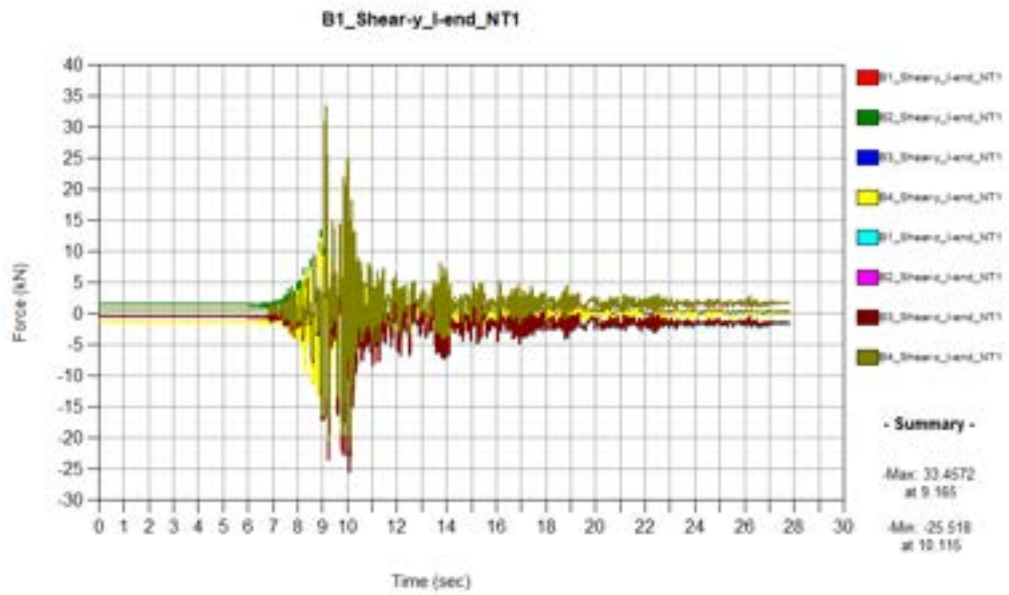


Figura 83. Tagli nei pilastri durante il sisma

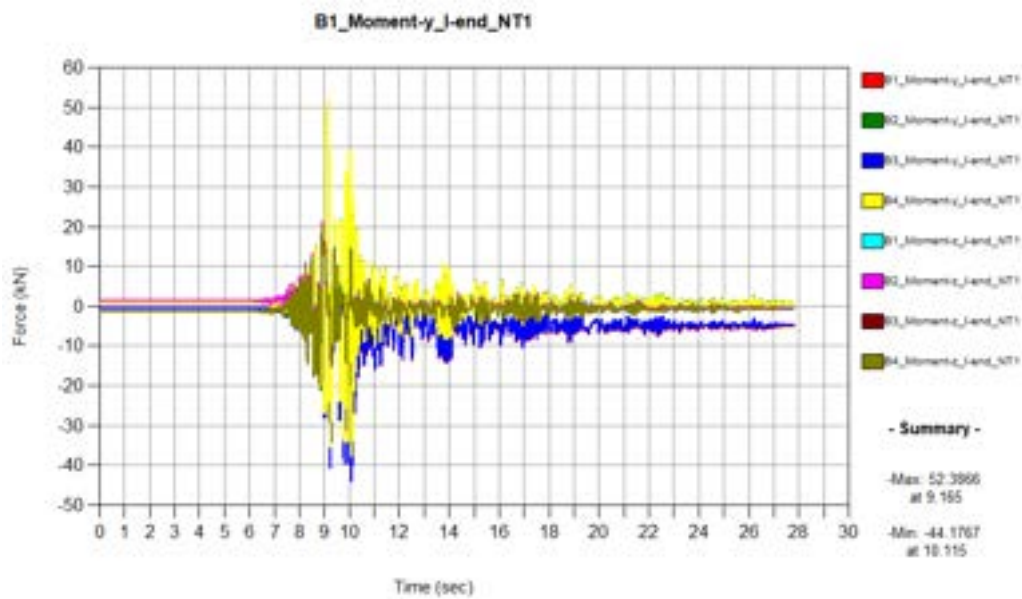


Figura 84. Momenti flettenti nei pilastri durante il sisma

La Figura 85 invece mostra lo stato delle cerniere plastiche al termine del sisma. Come si può osservare, è stato superato il solo primo limite di snervamento, associabile al danno ma non al collasso della struttura.

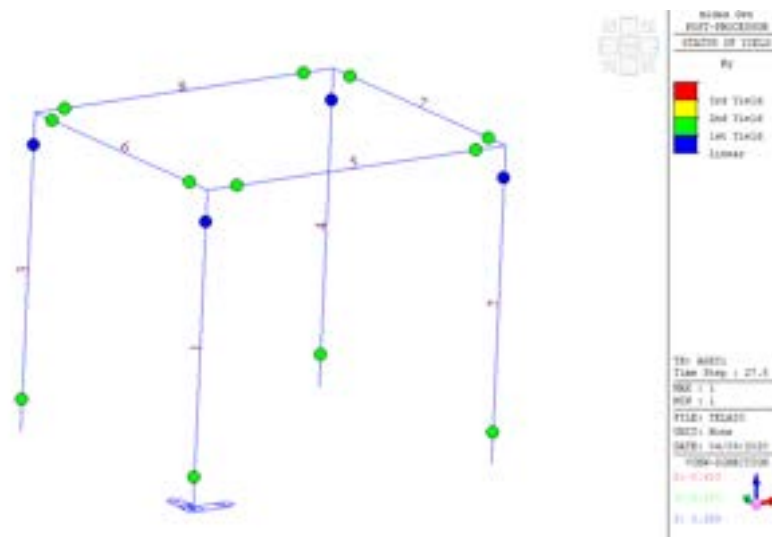


Figura 85. Stato delle cerniere plastiche a fine sisma (Rotazione R_y)

5.3.2 Telaio multipiano

Negli studi preliminari, propedeutici allo svolgimento delle prove su tavola vibrante, è stata valutata anche la possibilità di sottoporre il provino ad una accelerazione ottenuta ipotizzando che la parete da testare non sia posta al livello del suolo. Non disponendo di una infrastruttura sperimentale in grado di effettuare un test dinamico con input diverso in testa e al piede della parete, ci si è basati sulle seguenti considerazioni.

Per semplicità, si fa riferimento ad un telaio piano di tipo *shear-type* (Figura 86) a tre piani. L'equazione del moto è la seguente, prescindendo dallo smorzamento:

$$M\ddot{u} + Ku = -M\tau\ddot{u}_g$$

dove $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T$ ed inoltre:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

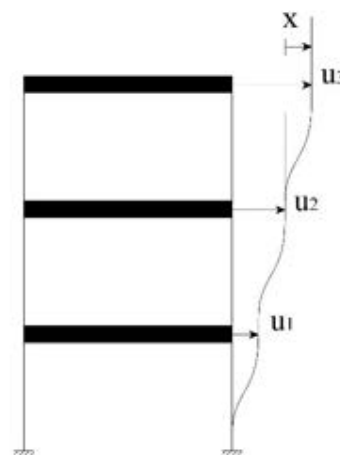


Figura 86. Telaio *shear-type*

Partizionando le matrici, definiamo:

$$\mathbf{M}_b = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}_b = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}_{b3} = \begin{bmatrix} 0 \\ -k_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}_{3b} = \mathbf{K}_{b3}^T \quad \mathbf{u}_b = [u_1, u_2]^T$$

Il sistema precedente, quindi, si riscrive come:

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{u}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{u}_b + \mathbf{K}_{b3} u_3 = -\mathbf{M}_b \boldsymbol{\tau}_b \ddot{u}_g$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + \mathbf{K}_{3b} \mathbf{u}_b + k_3 u_3 = -m_3 \ddot{u}_g$$

La seconda equazione si può riscrivere effettuando il prodotto $\mathbf{K}_{3b} \mathbf{u}_b$

$$m_3 \ddot{u}_3 - k_3 u_2 + k_3 u_3 = -m_3 \ddot{u}_g$$

Effettuando il cambiamento di variabili $x = u_3 - u_2$ e facendo riferimento allo spostamento relativo dell'ultimo piano, la terza equazione diventa:

$$m_3 \ddot{x} + m_3 \ddot{u}_2 - k_3 u_2 + k_3 x + k_3 u_2 = -m_3 \ddot{u}_g$$

Ossia:

$$m_3 \ddot{x} + k_3 x = -m_3 (\ddot{u}_2 + \ddot{u}_g)$$

Alla base della tavola vibrante si potrà dunque applicare, nel caso in cui si intenda simulare l'effetto del sisma sul provino quando questo si trova all'ultimo piano, l'accelerazione totale al piano inferiore ottenuta dalle simulazioni numeriche.

È stato considerato un telaio tridimensionale di una palazzina tipo, sull'ultimo piano del quale è stato inserito il telaio analizzato in precedenza (Figura 87).

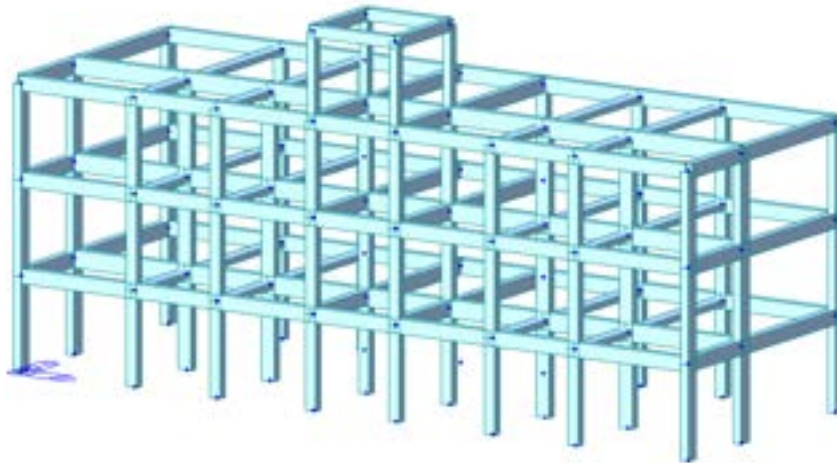


Figura 87. Telaio multipiano

Per il telaio dell'ultimo piano è stata assunta la stessa massa utilizzata nelle simulazioni del telaio monopiano (di cui al paragrafo 5.3.1), mentre ai piani inferiori è stata applicata una massa concentrata nel baricentro ed il corrispondente momento di inerzia, ipotizzando una massa distribuita di 12 kN/(g m²).

La Figura 88 mostra primi tre modi della struttura insieme a frequenze (Hz), masse partecipanti (%) e forme modali.

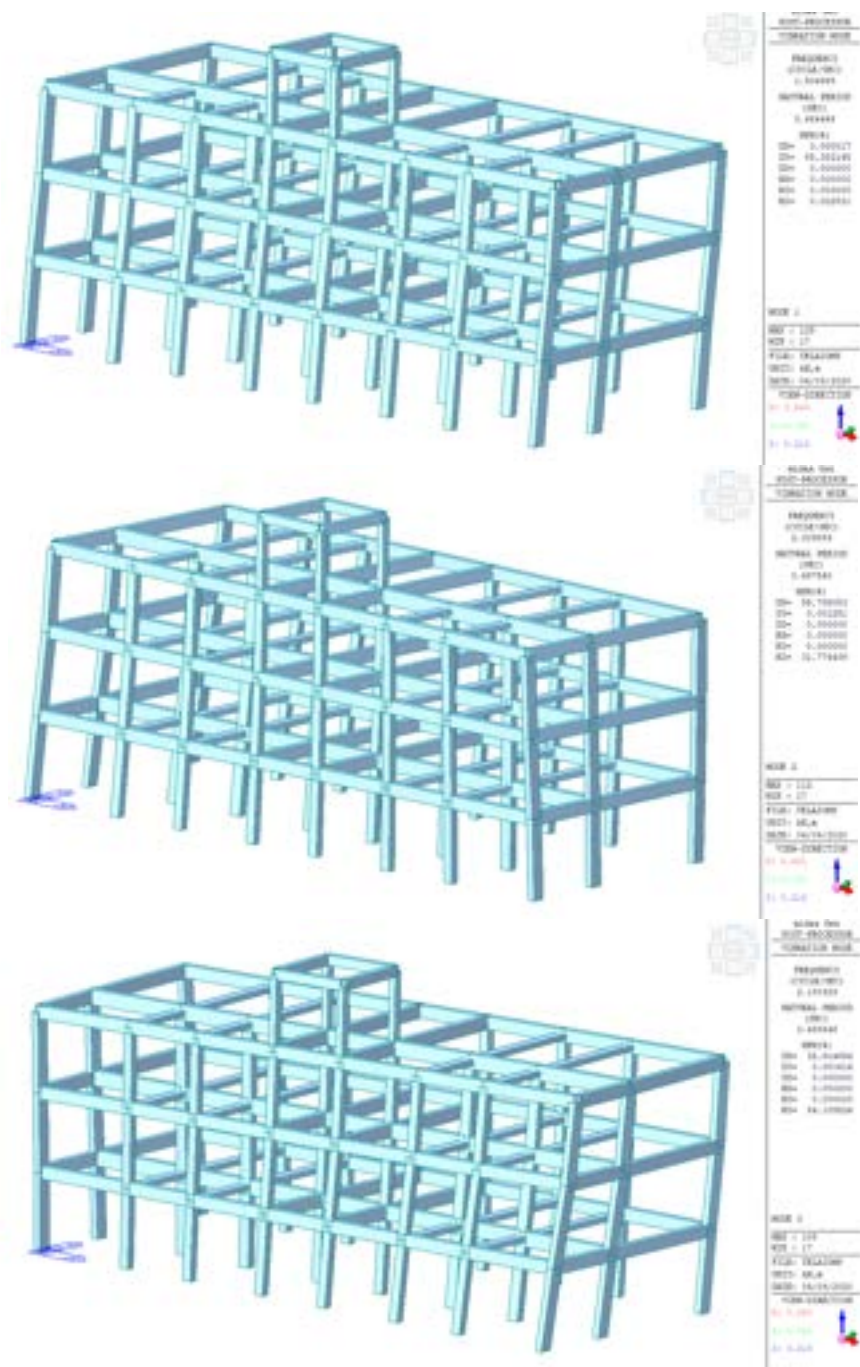


Figura 88. Deformate modali dei primi tre modi naturali di vibrare

Confrontando le frequenze proprie riportate per il telaio multipiano in Tabella 27 con quelle relative al telaio monopiano riportate in Tabella 26 si osserva che, come atteso, la struttura a telaio multipiano è significativamente più deformabile, poiché le sue frequenze proprie sono notevolmente ridotte rispetto a quelle del telaio monopiano.

Tabella 27. Frequenze e periodi dei primi tre modi naturali di vibrare della struttura a telaio multipiano

Modo	Frequenza [Hz]	Periodo [s]
1	1.50	0.667
2	2.01	0.498
3	2.18	0.459

Al fine di limitare il costo computazionale, la non linearità meccanica è stata considerata solo per il torrino posto in sommità, mentre la struttura sottostante è stata modellata con comportamento elastico lineare. Le analisi dinamiche sono state effettuate esattamente come descritto nel paragrafo 5.3.1 per il telaio monopiano ed utilizzando lo stesso input sismico.

Figura 89, Figura 90 e Figura 91 mostrano gli sforzi normali, i tagli e i momenti flettenti sui pilastri del torrino ottenuti dall'analisi dinamica non lineare.

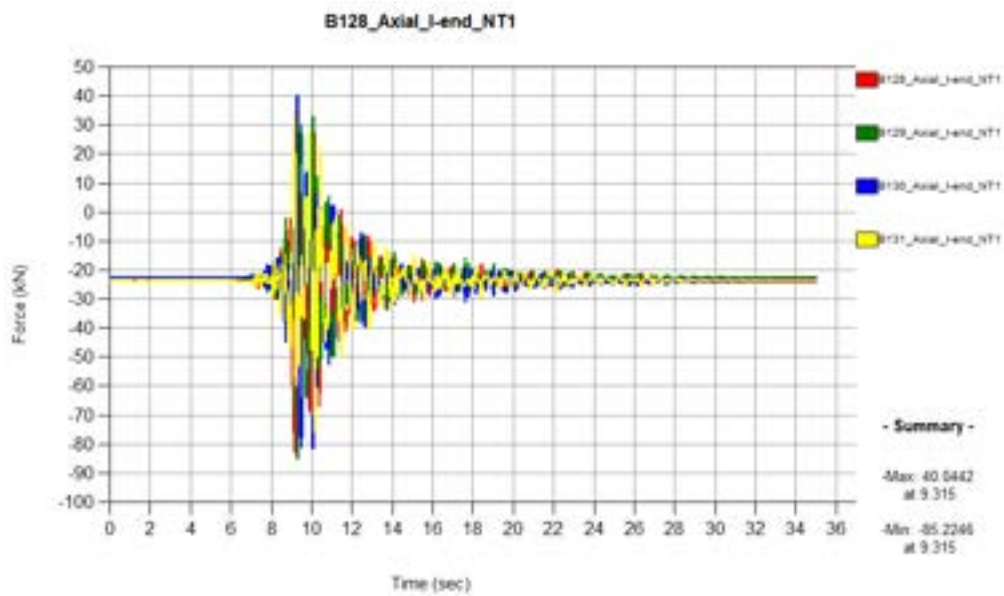


Figura 89. Sforzi normali nei pilastri del torrino (kN)

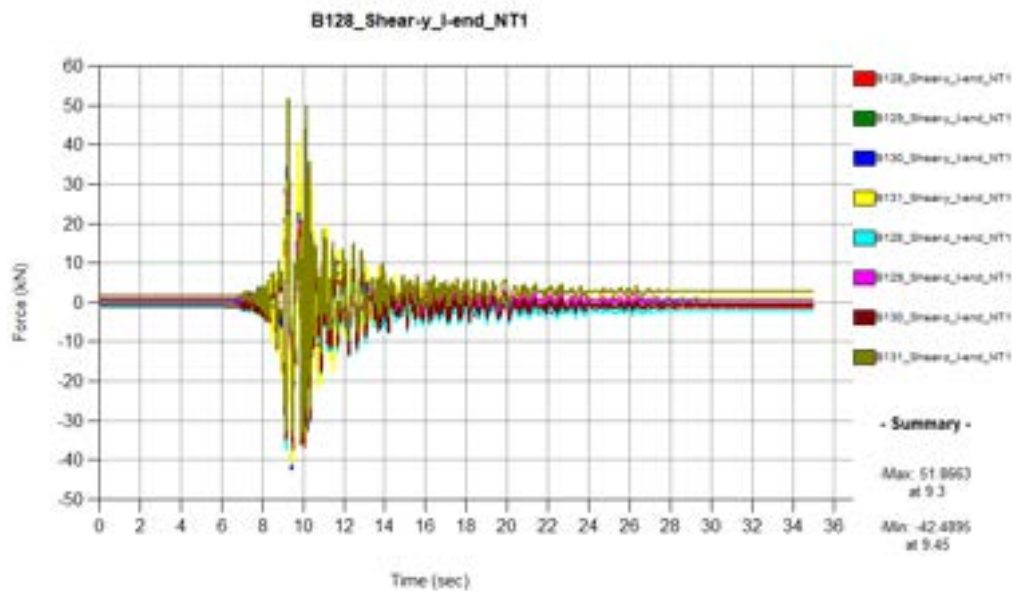


Figura 90. Tagli nei pilastri del torrino (kN)

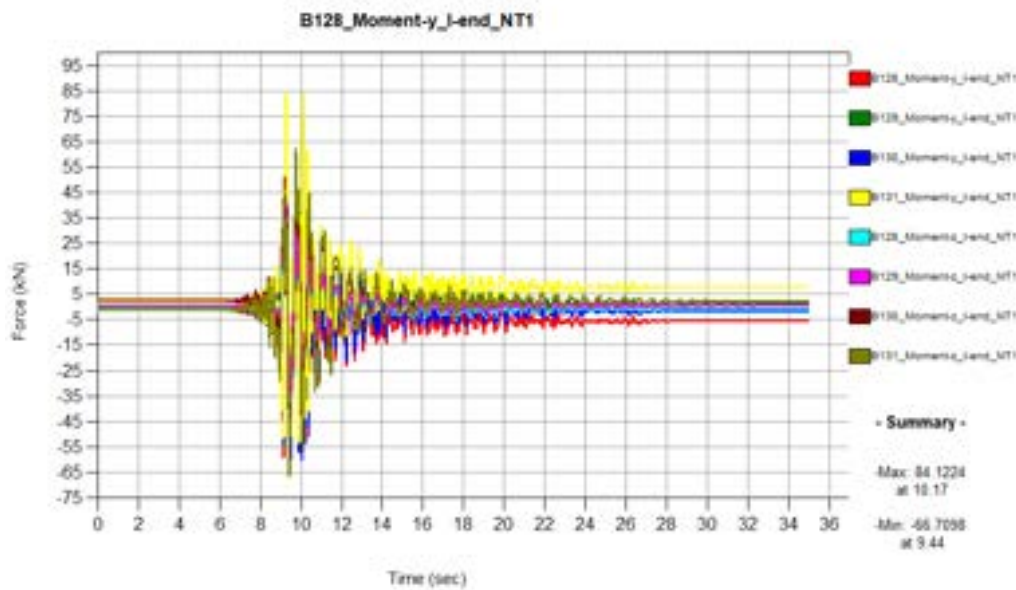


Figura 91. Momenti nei pilastri del torrino (in figura ordinata in kNm)

Lo stato delle cerniere plastiche al termine del sisma è riportato in Figura 92 e Figura 93, per le rotazioni secondo y e secondo z (riferimento locale dell'elemento finito utilizzato). Come si può osservare da tali figure, a differenza di quanto osservato per il telaio monopiano in Figura 85, in questo caso viene superato anche il secondo limite di snervamento, che implica la rottura per compressione del calcestruzzo o lo snervamento dell'armatura.

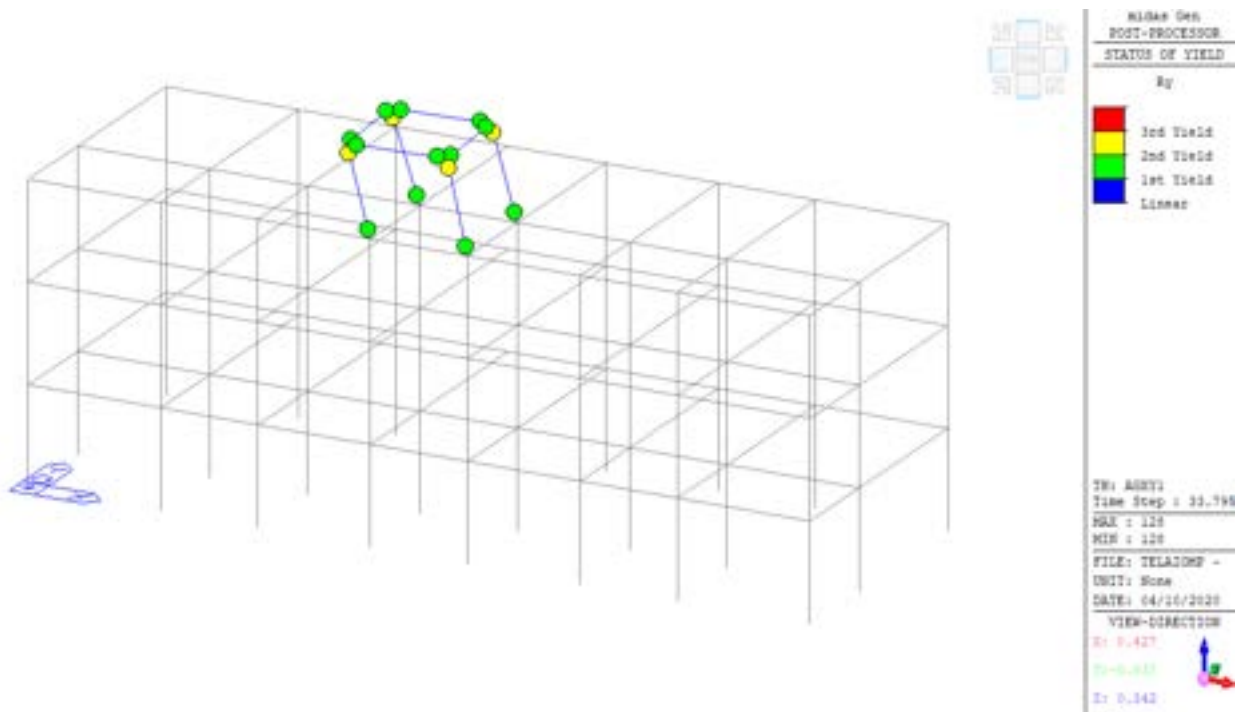


Figura 92. Stato delle cerniere plastiche a fine sisma: rotazione Ry

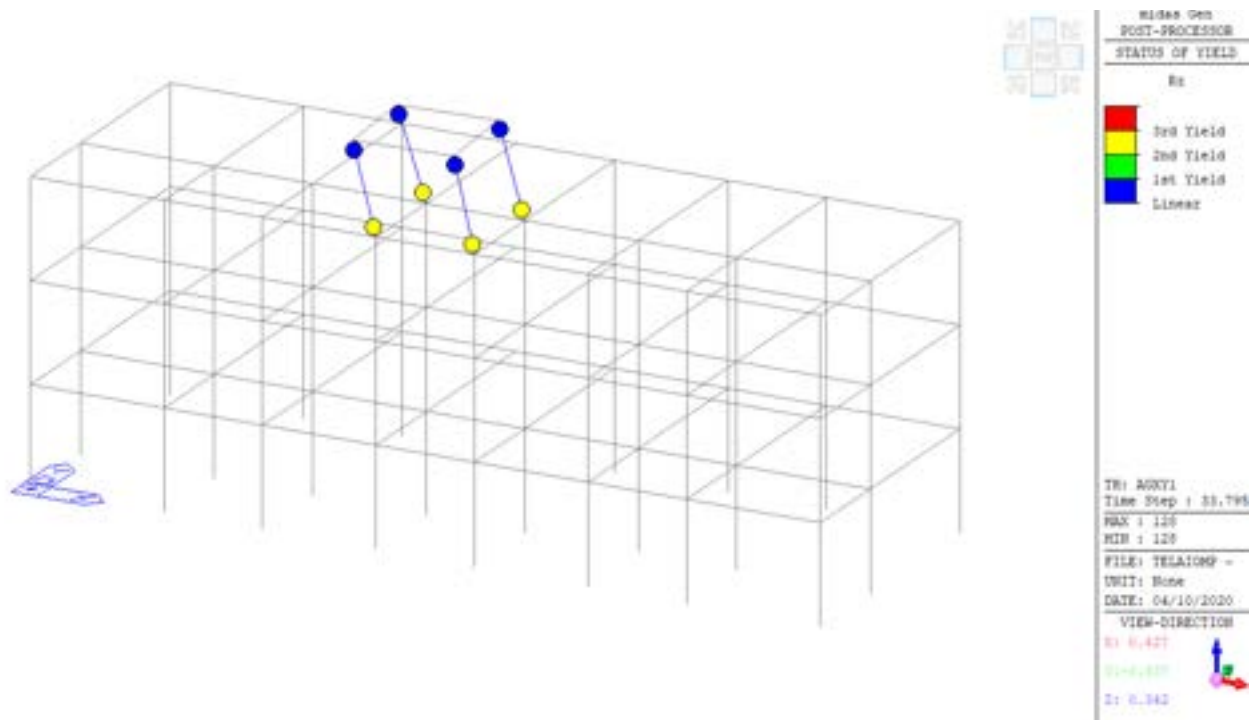


Figura 93. Stato delle cerniere plastiche a fine sisma: rotazione Rz

Infine, in Figura 94 si riportano le componenti di accelerazione assoluta alla base del torrino. È importante osservare che le accelerazioni risulterebbero più basse se si adottasse un comportamento non lineare anche per gli elementi dei piani inferiori, che in tal caso dissiperebbero parte dell'energia trasmessa dal sisma. L'approccio adottato risulta dunque cautelativo in questo contesto, dal momento che sovrastima le accelerazioni alla base che subisce il torrino.

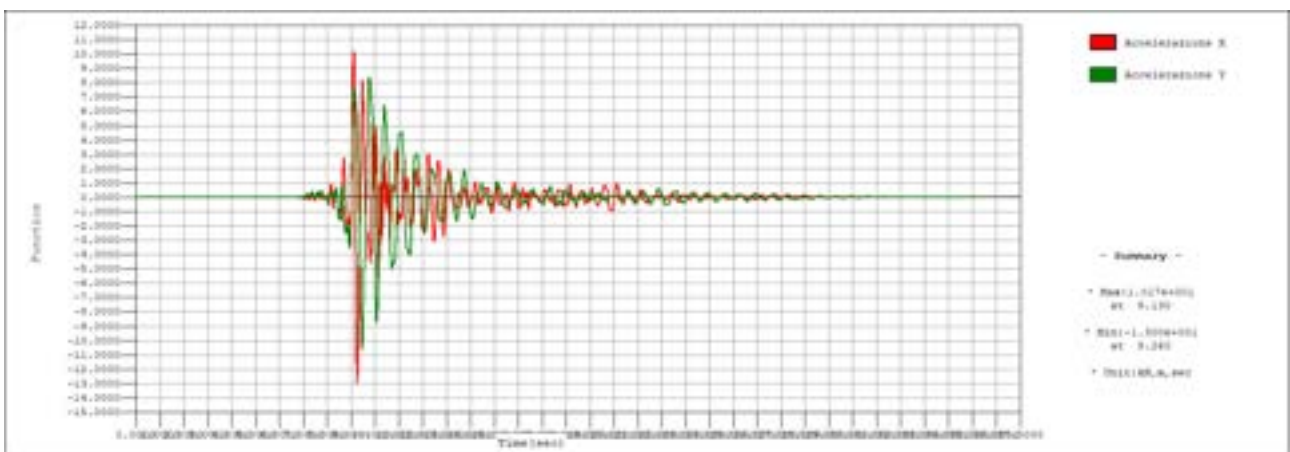


Figura 94. Accelerazione assoluta al piano III (m/s²)

5.3.3 Verifica a sollevamento sul modello preliminare

Dal momento che, al fine di ottimizzare le tempistiche delle prove sperimentali, il provino sarà realizzato fuori dalla tavola vibrante per poi essere posizionato su di essa a stagionatura avvenuta per poter essere sottoposto ai test, si rende necessaria una verifica a sollevamento. La verifica del telaio 3D nella fase di spostamento per il posizionamento sulla tavola vibrante è stata eseguita aggiungendo al modello descritto in precedenza (paragrafo 5.3.1) la trave di collegamento alla base (avente una sezione trasversale pari a 30x40 cm) e posizionando le travi di supporto HEA 120 cui saranno collegati 4 tiranti come indicato in Figura 95.

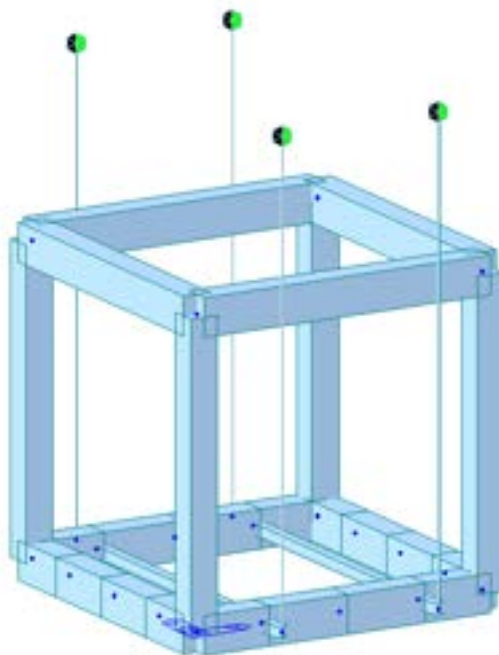


Figura 95. Modello completo di cordolo di base vincolato verticalmente in 4 punti

Nel modello sono stati quindi rimossi i vincoli di base e la struttura è stata sospesa ai tiranti, assumendo che lo spostamento sarà effettuato in modo da non generare effetti di tipo dinamico. Come per il resto della struttura, sono stati utilizzati i seguenti materiali:

- calcestruzzo con resistenza caratteristica cubica a compressione $R_{ck}=25 \text{ N/mm}^2$;
- acciaio del tipo B450C per il c.a.

Inoltre:

- acciaio S275 per i profilati HEA.

Nel modello numerico implementato, è stato considerato il carico della struttura e quello derivante dalla tamponatura ed eventuali rivestimenti, assunto pari a 4 kN/m^2 , per cui il cordolo di base è stato caricato con 10.2 kN/m .

Si riportano i diagrammi delle caratteristiche della sollecitazione nelle figure da Figura 96 a Figura 103, per due combinazioni di carico per il c.a., assumendo i valori minimi o massimi dei coefficienti di combinazione secondo la formula seguente:

$$\gamma_{G1} G1 + \gamma_{G2} G2 + \gamma_{Q1} Qk1$$

con $\gamma_{G1}=1-1.3$, $\gamma_{G2}=0-1.5$, $\gamma_{Q1}=0-1.5$.

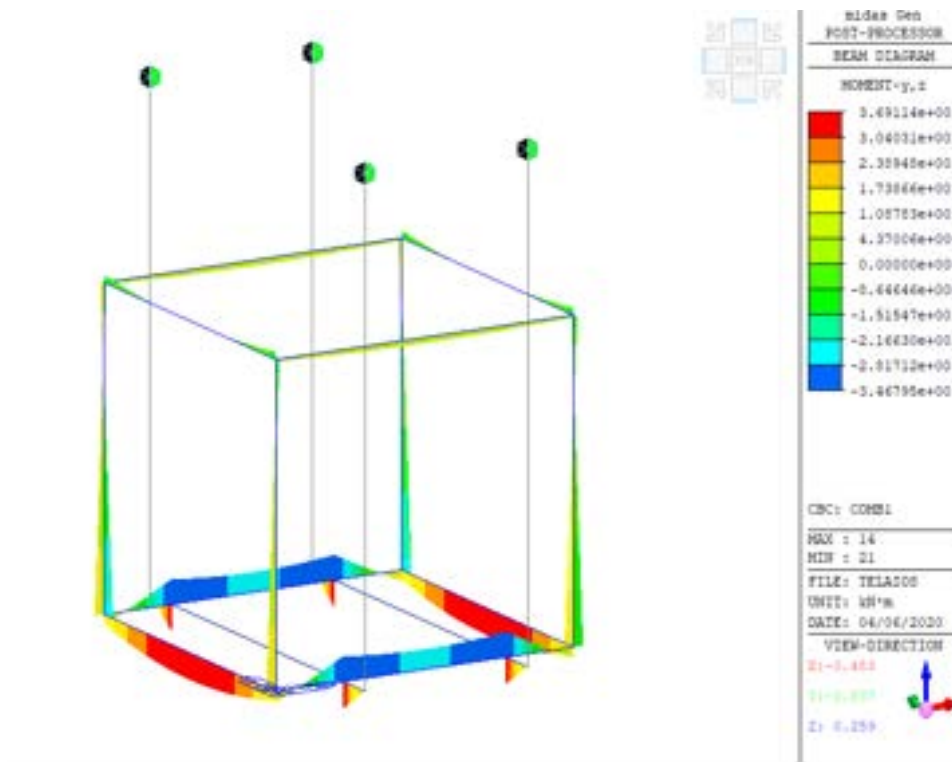


Figura 96. Diagramma dei momenti flettenti (Combinazione 1, kNm)

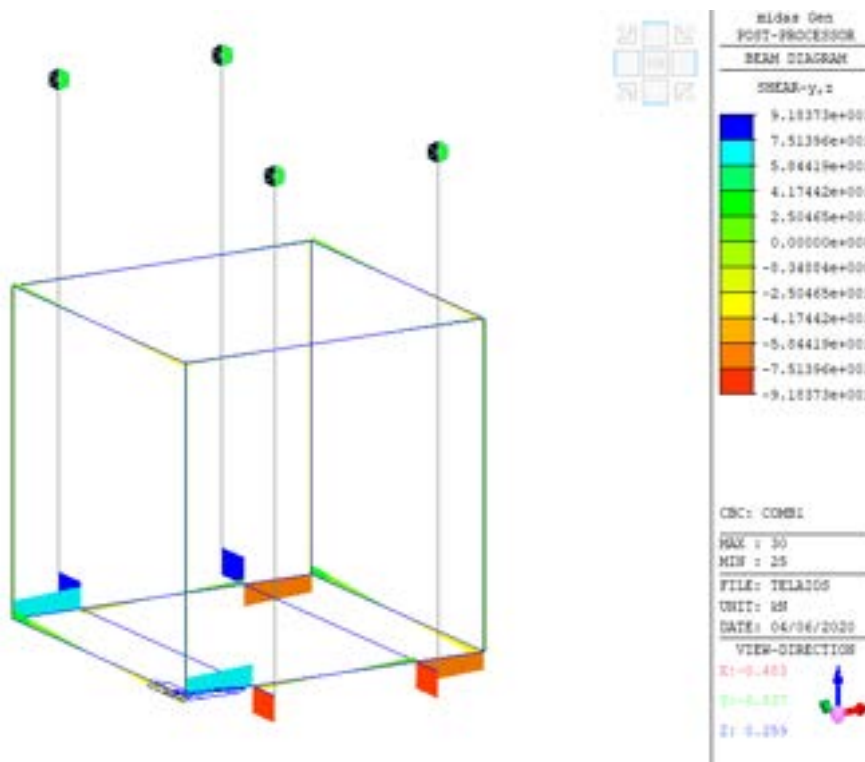


Figura 97. Diagramma dei tagli (Combinazione 1, kN)

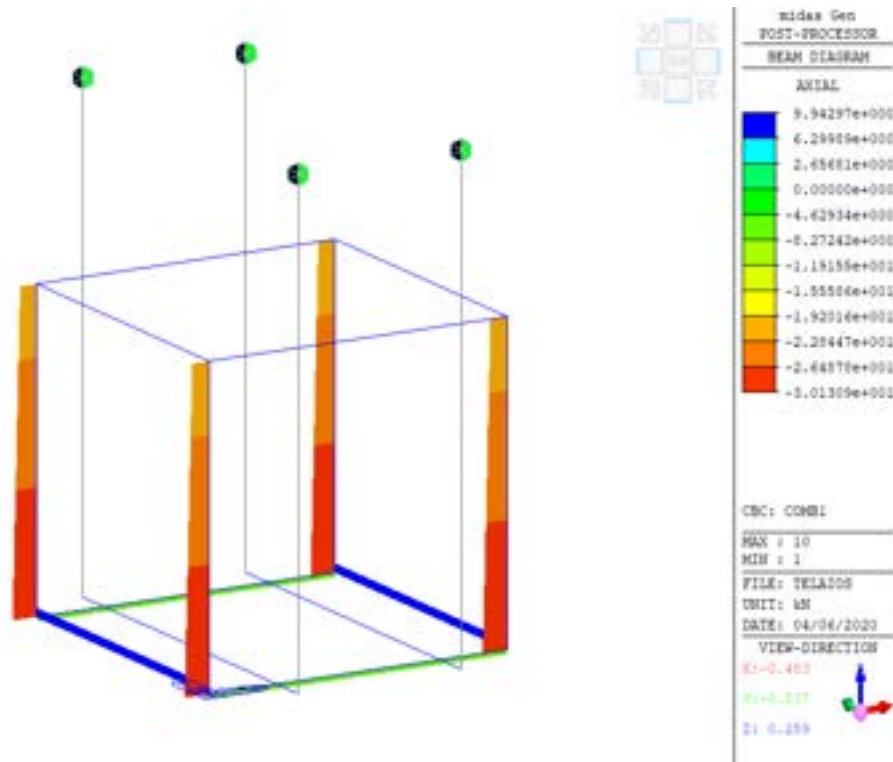


Figura 98. Diagramma degli sforzi normali (Combinazione 1, kN)

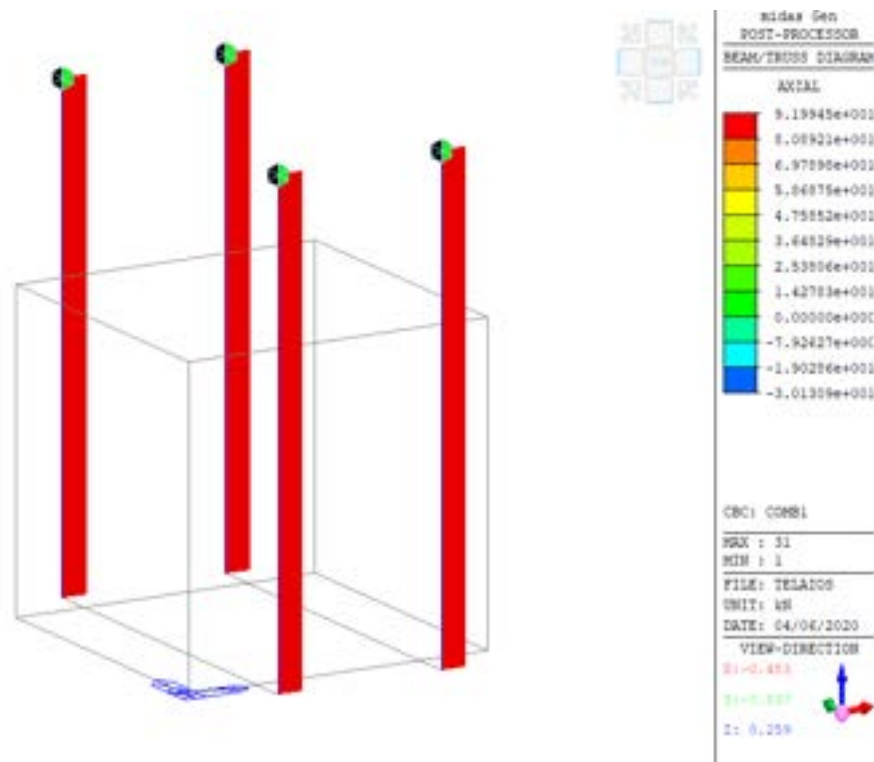


Figura 99. Diagramma degli sforzi normali nei tiranti (Combinazione 1, kN)

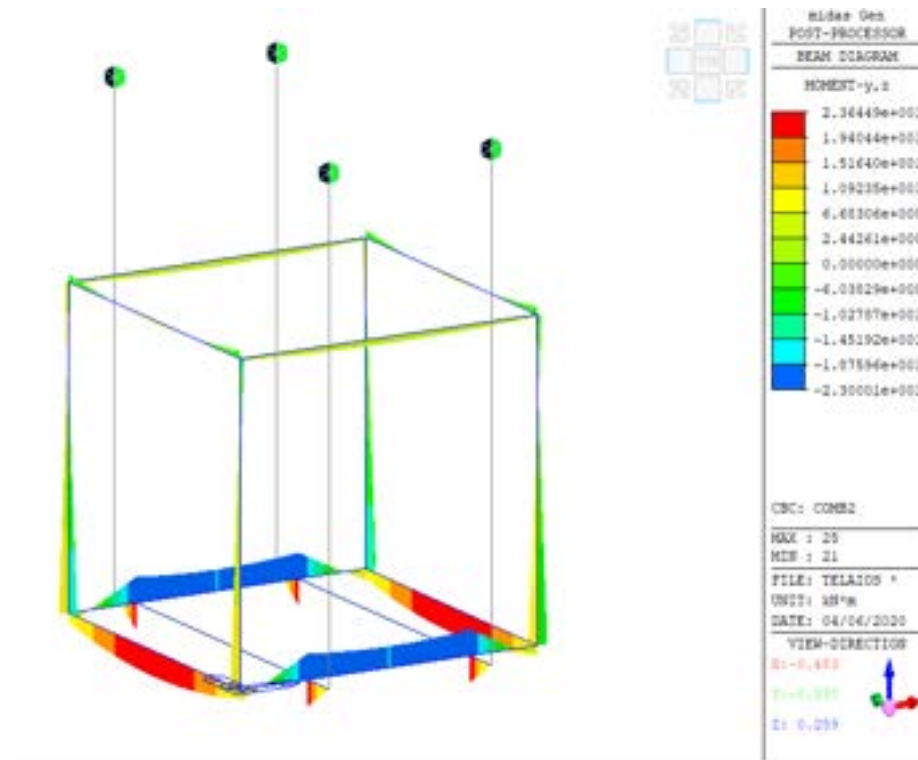


Figura 100. Diagramma dei momenti flettenti (Combinazione 2, kNm)

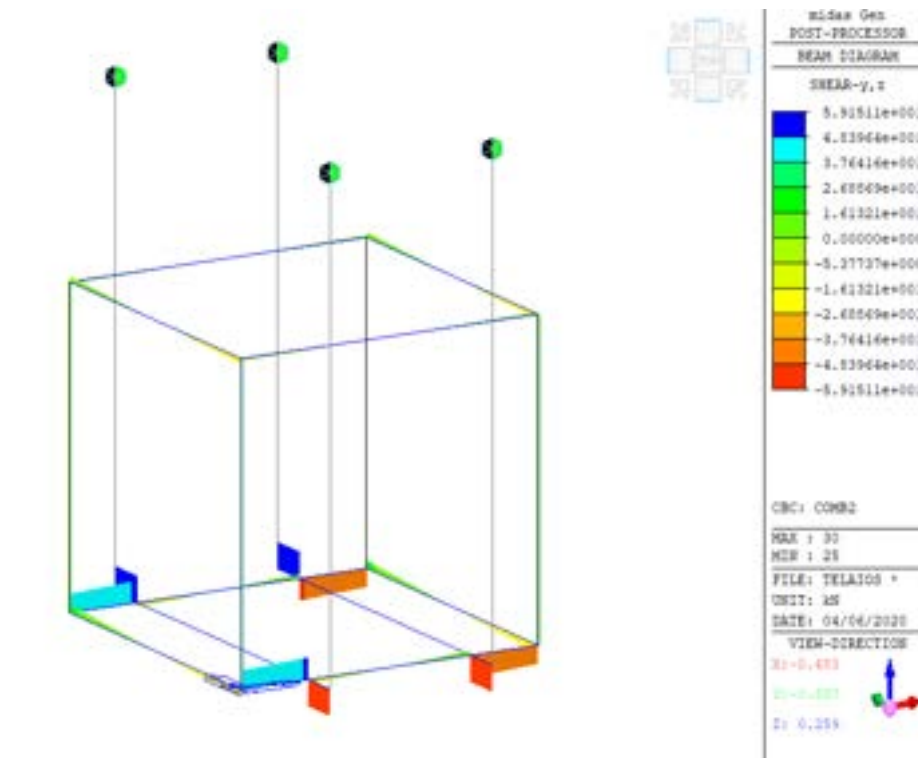


Figura 101. Diagramma dei tagli (Combinazione 2, kN)

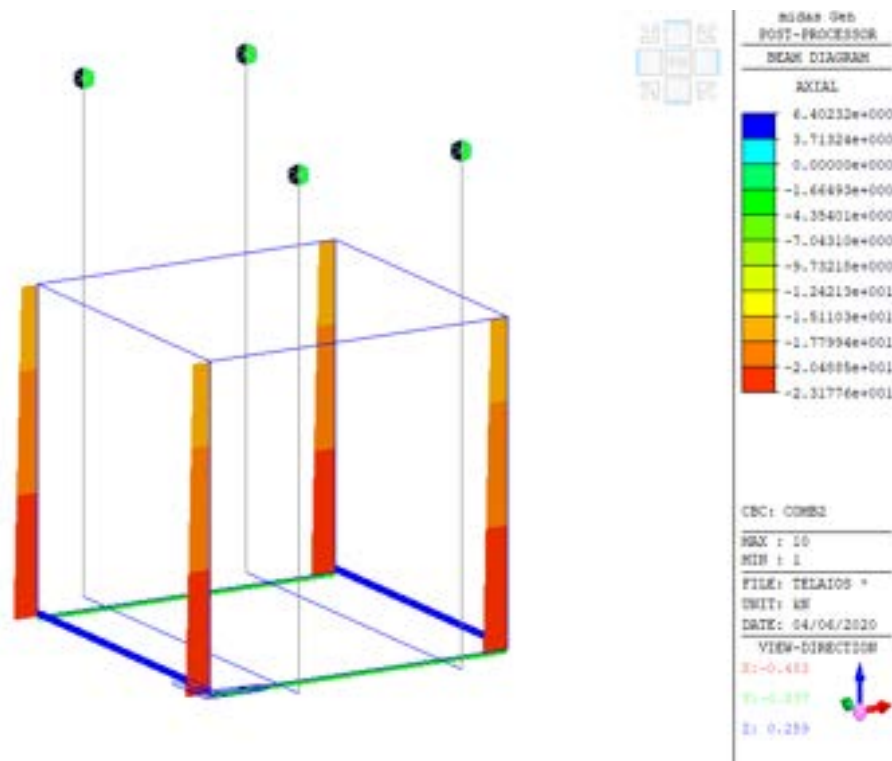


Figura 102. Diagramma degli sforzi normali (Combinazione 2, kN)

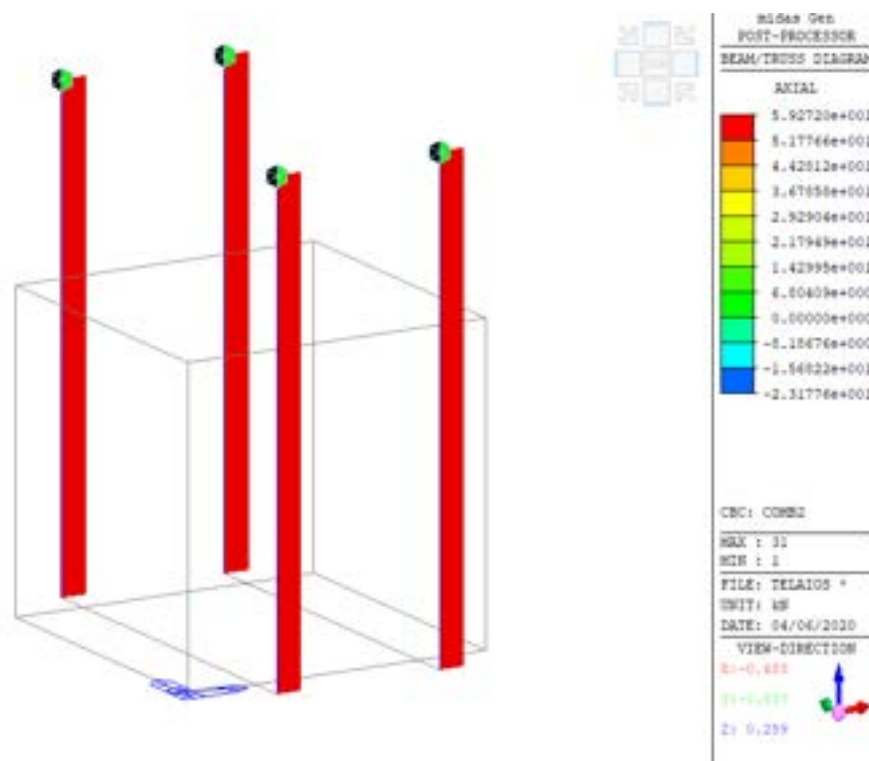


Figura 103. Diagramma degli sforzi normali nei tiranti (Combinazione 2, kN)

La verifica è stata condotta assumendo le armature indicate nei disegni esecutivi. Sono stati poi verificati gli effetti locali legati al carico concentrato per il sollevamento. La massima forza F di sollevamento è pari a circa 92 kN. Con riferimento alla Figura 104, la trazione sulle barre di armatura può calcolarsi mediante un semplice equilibrio di forze:

$$T = \frac{F}{2 \cdot \sin\alpha}$$

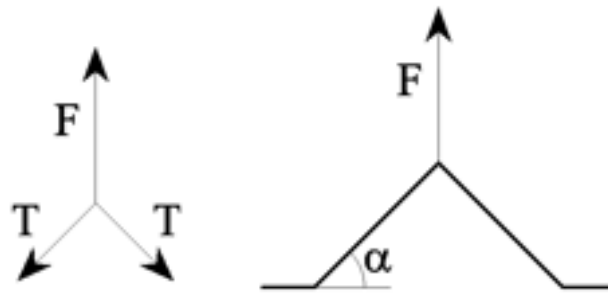


Figura 104. Equilibrio

Si adottano quindi le armature inclinate indicate nei disegni esecutivi, soggette alla trazione:

$$T = 92 \text{ kN} \sqrt{2}/2 = 65,05 \text{ kN}$$

Adottando due barre $\Phi 12$, si ottiene:

$$\frac{T}{A_s} = 287,6 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma$$

5.4 Analisi Numeriche

5.4.1 Calcolo del peso proprio e analisi del carico da sollevamento

Una volta concluse le analisi numeriche preliminari descritte nel paragrafo 5.3, è stato fatto un riesame più dettagliato dei carichi sulla base del tipo di laterizi che si è deciso di adottare nella realizzazione delle tamponature (tipo "Poroton 600"). Sono state quindi ripetute le analisi strutturali aggiornando i carichi strutturali, sia di sollevamento con provino sospeso tramite tiranti, sia statiche che dinamiche con provino vincolato al suolo.

Il cordolo di base è stato caricato con 5.29 kN/m, carico derivante dalla tamponatura, oltre al peso proprio. Inoltre, è stato considerato un carico di circa 0.2 kN/m sia sul cordolo di base, sia sulle travi superiori, derivante dalla struttura della parete che sarà installata sulle pareti del manufatto. I carichi considerati sono riportati in dettaglio nella Tabella 28. In questa tabella, con "n" si intende in generale il numero di elementi, ad eccezione di laterizi e nervature, dove "n" indica il numero di fasce da 2.75 m, e della tamponatura, dove "n" indica il numero di pannelli.

Tabella 28. Analisi dei carichi

Solaio	Dimensioni			V	n	Vtot	γ			P
	m	m	m	m ³		m ³	kN/m ³			kN
Laterizi	0.4	2.75	0.16	0.176	5	0.88	5.89			5.18
Nervature	0.1	0.16	2.75	0.044	4	0.176	25			4.4
Soletta	2.9	2.9	0.04	0.3364	1	0.3364	25			8.41
Fasce piene						0.2896	25			7.24
Totale solaio										25.2
Peso pilastri, travi e cordolo di base	Dimensioni			V	n	Vtot	γ			P
	m	m	m	m ³		m ³	kN/m ³			kN
	0.3	0.3	3.6	0.324	4	1.296	25.0			32.4
	0.3	0.4	2.9	0.348	8	2.784	25.0			69.6
Tamponatura tipo Poroton600 ^o	Dimensioni			V	n	Vtot	γ	Vmalta	γ malta	P
	m	m	m	m ³		m ³	kN/m ³	m ³	kN/m ³	kN
	2.9	2.8	0.3	2.436	4	9.744	6.4746	0.25984	18	67.77

Totale	kN	194.995
---------------	-----------	----------------

Realizzando 2 aperture 1.2 m x 1.3 m

1.2	1.3	0.3	0.468	2	0.936	6.4746	0.02496	18	6.51
-----	-----	-----	-------	---	-------	--------	---------	----	------

Totale	kN	188.486
---------------	-----------	----------------

I pesi propri sono stati valutati anche considerando che su due lati del provino saranno realizzate delle aperture. Una apertura è necessaria per consentire l'ispezione del manufatto al suo interno durante la campagna di prove sperimentali, mentre l'altra apertura è necessaria per testare una tamponatura installata a secco e direttamente collegata al telaio in c.a. Il peso di tale tamponatura a secco non è stato tenuto in

conto poiché essa sarà realizzata una volta che il provino sarà stato movimentato e si troverà già sulla tavola vibrante.

5.4.2 Verifiche strutturali nei confronti del sollevamento

In questo paragrafo viene ripetuta l'analisi nei confronti del carico da sollevamento, relativa alla fase di trasporto del provino dall'esterno del laboratorio dove è stato realizzato, alla tavola vibrante, descritta nel paragrafo, ma tenendo conto dei carichi strutturali aggiornati come descritto nel paragrafo precedente. Le figure dalla Figura 105 alla Figura 112 mostrano i nuovi diagrammi delle caratteristiche della sollecitazione, per due combinazioni di carico per il c.a., assumendo i valori minimi o massimi dei coefficienti di combinazione secondo la formula seguente:

$$\gamma_{G1} G1 + \gamma_{G2} G2 + \gamma_{Q1} Qk1$$

con $\gamma_{G1}=1-1.3$, $\gamma_{G2}=0-1.5$, $\gamma_{Q1}=0-1.5$.

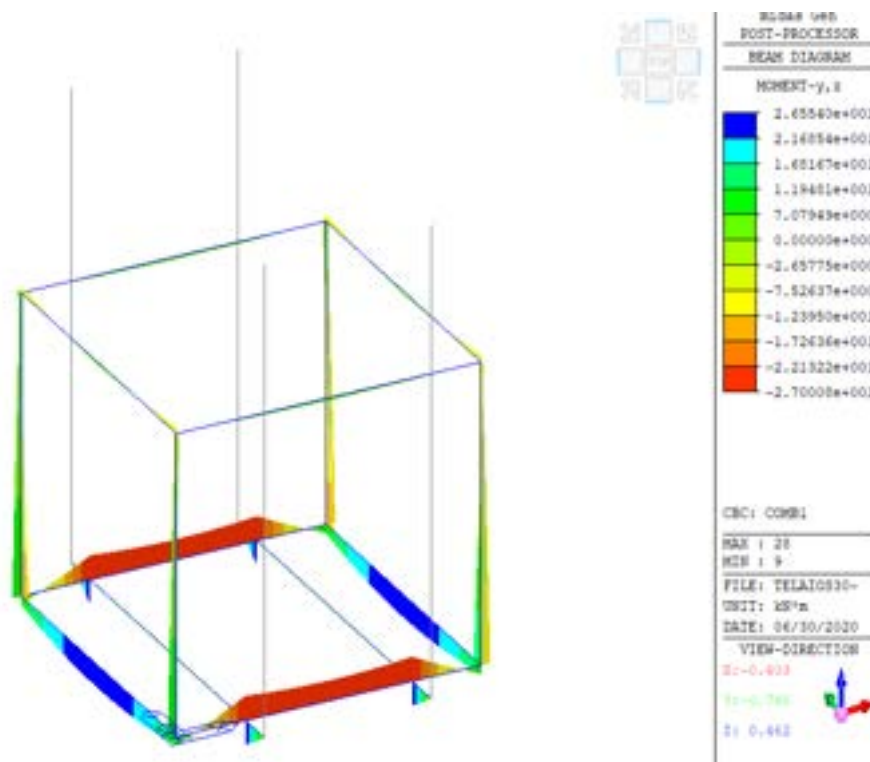


Figura 105. Diagramma dei momenti flettenti (Combinazione 1)

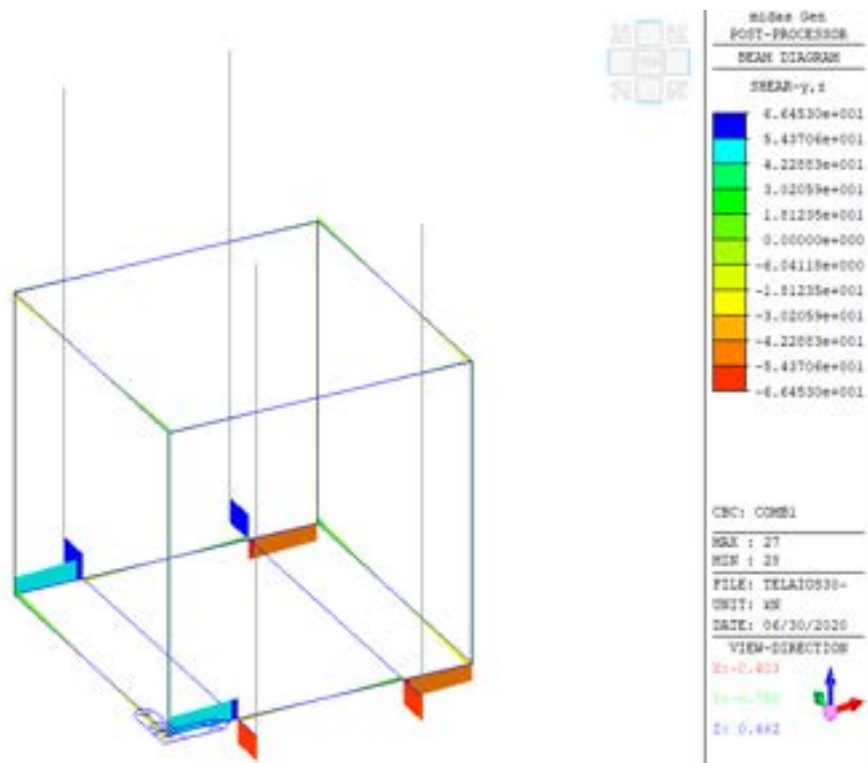


Figura 106. Diagramma dei tagli (Combinazione 1)

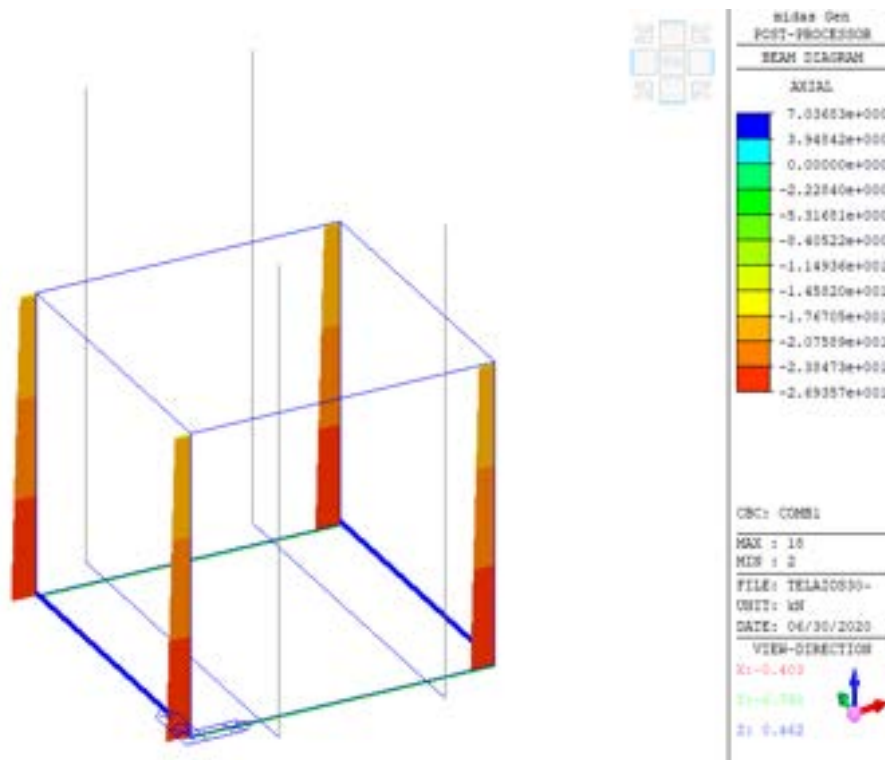


Figura 107. Diagramma degli sforzi normali (Combinazione 1)

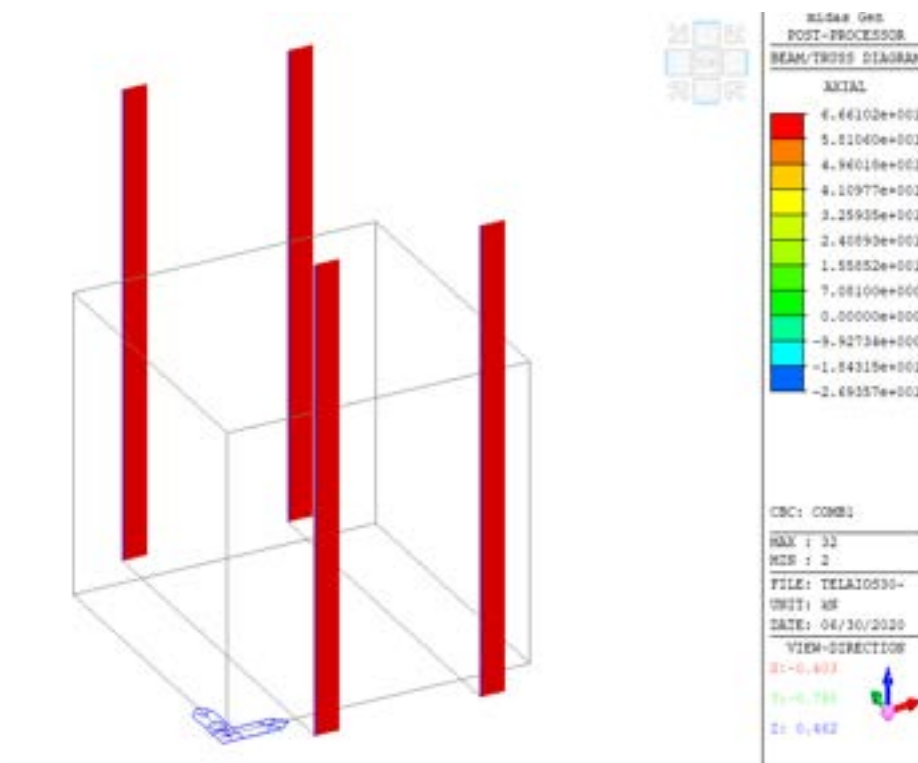


Figura 108. Diagramma degli sforzi normali nei tiranti (Combinazione 1)

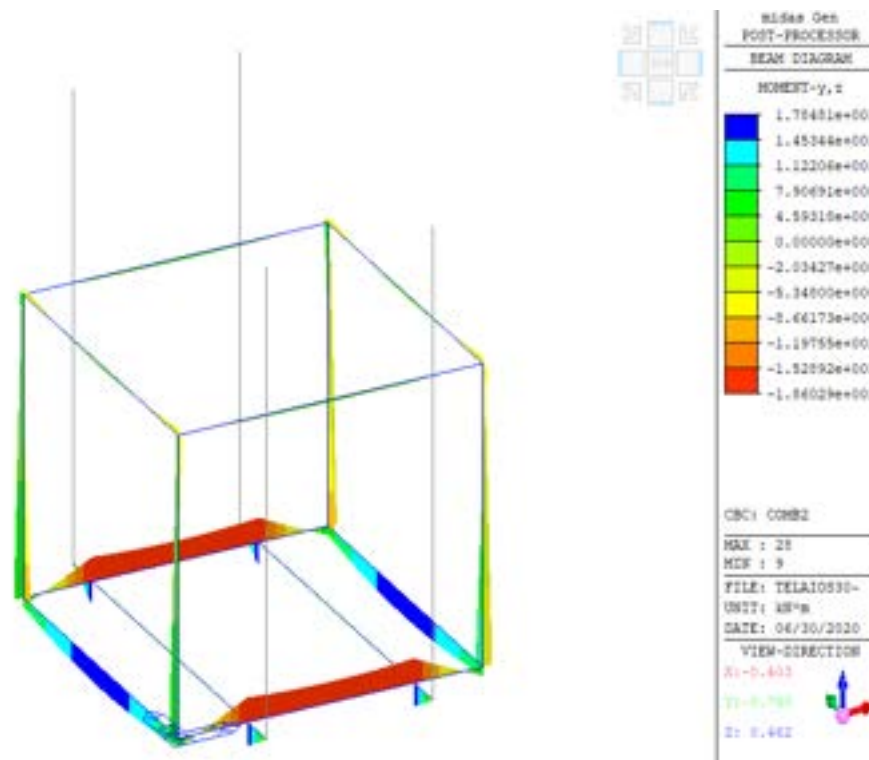


Figura 109. Diagramma dei momenti flettenti (Combinazione 2)

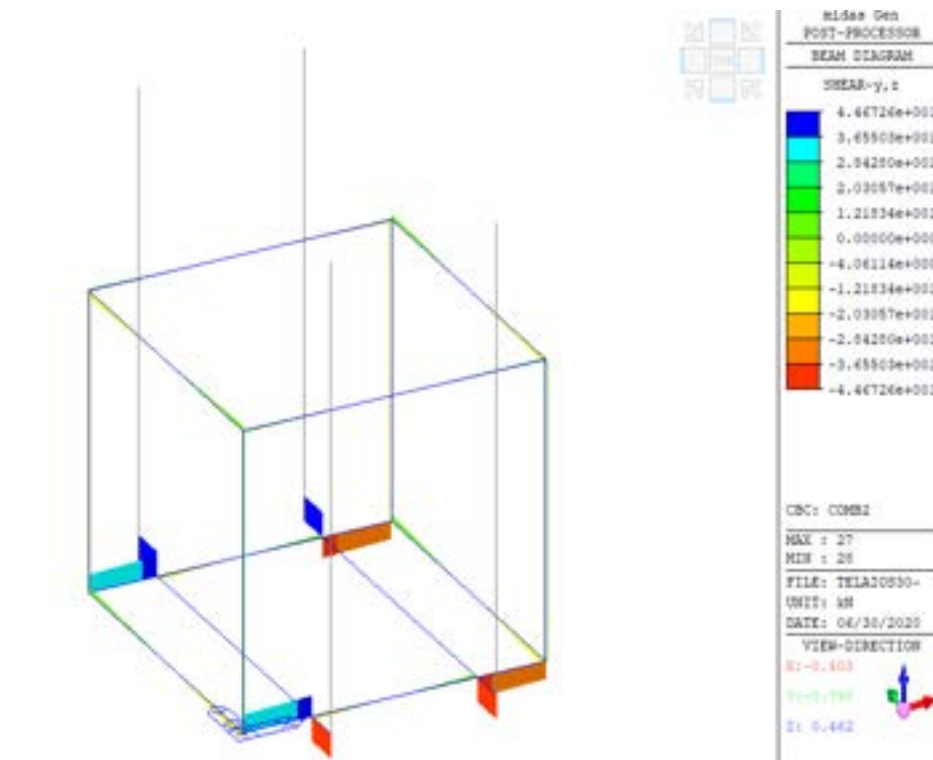


Figura 110. Diagramma dei tagli (Combinazione 2)

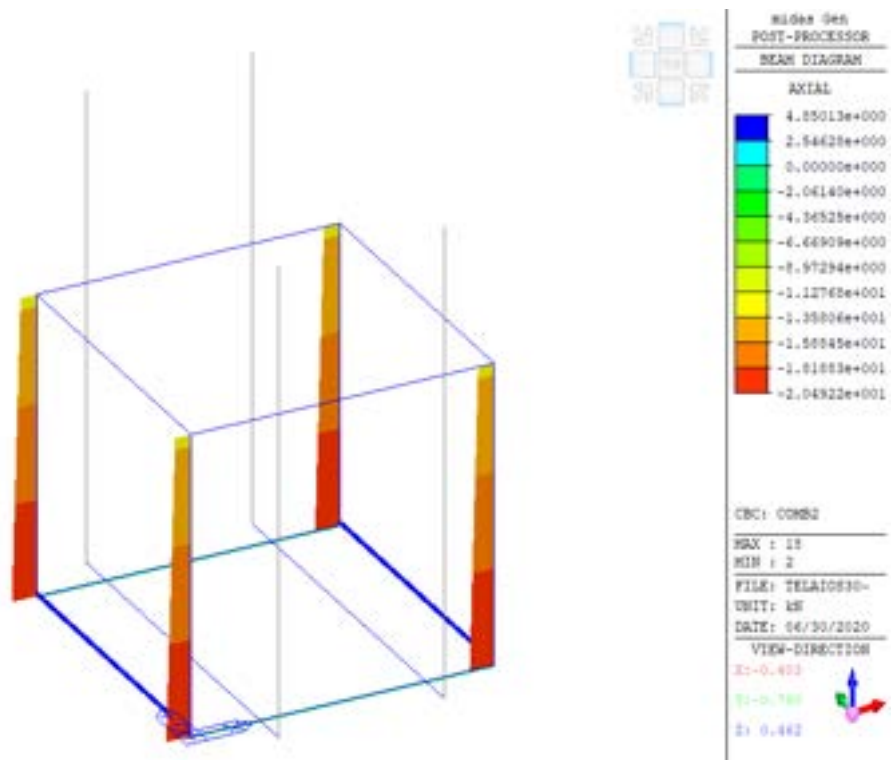


Figura 111. Diagramma degli sforzi normali (Combinazione 2)

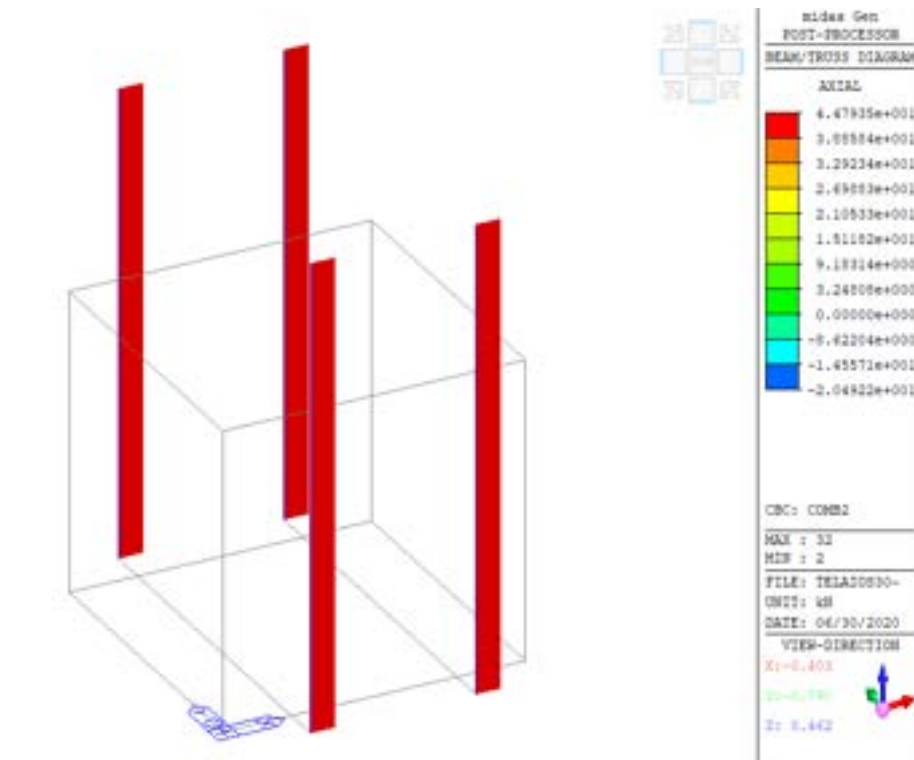


Figura 112. Diagramma degli sforzi normali nei tiranti (Combinazione 2)

È stata effettuata la verifica degli elementi di base in c.a. e dei profilati in acciaio da adottare per il sollevamento. La numerazione degli elementi è riportata in Figura 113.

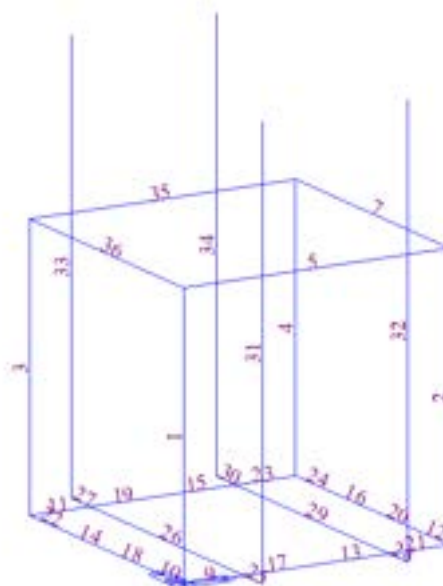


Figura 113. Numerazione degli elementi

Le verifiche strutturali sono soddisfatte sia per il c.a., sia per i profilati in acciaio. Si riportano ad esempio in Figura 114 e Figura 115 due verifiche, rispettivamente per un elemento in c.a. e per un profilato in acciaio.

1. Design Information

Member Number 19

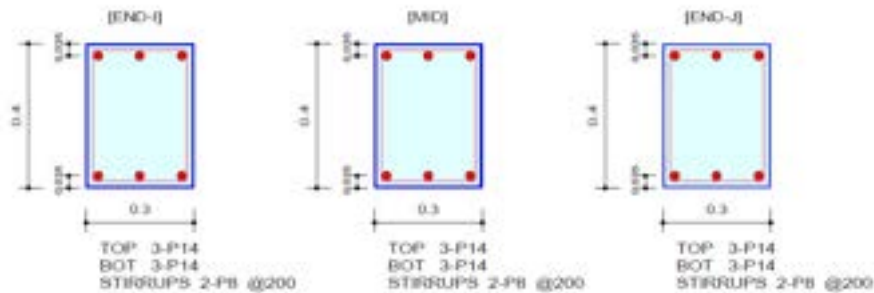
Design Code Eurocode2:04 & NTC2018

Unit System kN, m

Material Data $f_{ck} = 25000$, $f_{yk} = 450000$, $f_{yw} = 450000$ KPa

Section Property 30x40 (No. 1)

Beam Span 0.875m



2. Bending Moment Capacity

	END-I	MID	END-J
(-) Load Combination No.	1	1	1
Moment (M _{Ed})	27.00	24.97	22.65
Factored Strength (M _{Rd})	61.76	61.76	61.76
Check Ratio (M _{Ed} /M _{Rd})	0.4372	0.4042	0.3666
Neutral Axis (x/d)	0.1104	0.1104	0.1104
(+) Load Combination No.	2	2	2
Moment (M _{Ed})	0.00	0.00	0.00
Factored Strength (M _{Rd})	61.76	61.76	61.76
Check Ratio (M _{Ed} /M _{Rd})	0.0000	0.0000	0.0000
Neutral Axis (x/d)	0.1104	0.1104	0.1104
Using Rebar Top (A _{s_top})	0.0005	0.0005	0.0005
Using Rebar Bot (A _{s_bot})	0.0005	0.0005	0.0005

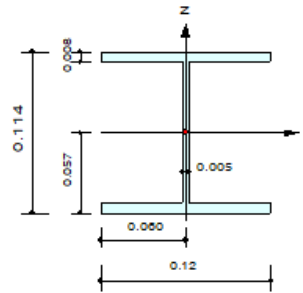
3. Shear Capacity

	END-I	MID	END-J
Load Combination No.	1	1	1
Factored Shear Force (V _{Ed})	10.62	7.96	2.85
V _{Rdc}	0.00	0.00	0.00
V _{Rds}	64.27	64.27	64.27
V _{Rdmax}	349.03	349.03	349.03
Using Shear Reinf. (A _{sw})	0.0005	0.0005	0.0005
Using Stirrups Spacing	2-P8 @200	2-P8 @200	2-P8 @200
V _{Ed} / V _{Rdc}	0.0000	0.0000	0.0000
V _{Ed} / min(V _{Rds} , V _{Rdmax})	0.1652	0.1239	0.0413
Check Ratio	0.1652	0.1239	0.0413

Figura 114. Elemento 19: verifiche strutturali dell'elemento in c.a. nei confronti del carico da sollevamento

1. Design Information

Design Code Eurocode3:05
 Unit System kN, m
 Member No 30
 Material S275 (No:2)
 (Fy = 275000, Es = 210000000)
 Section Name HEA120 (No:3)
 (Rolled : HEA120).
 Member Length : 0.40000



2. Member Forces

Axial Force Fxx = 0.00000 (LCB: 1, POS:I)
 Bending Moments My = 26.4913, Mz = 0.00000
 End Moments Myi = 26.4913, Myj = 0.00000 (for Lb)
 Myi = 26.4913, Myj = 0.00000 (for Ly)
 Mzi = 0.00000, Mzj = 0.00000 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = 0.00000 (LCB: 1, POS:1/2)
 Fzz = 66.2789 (LCB: 1, POS:J)

Depth	0.11400	Web Thick	0.00500
Top F Width	0.12000	Top F Thick	0.00800
Bot.F Width	0.12000	Bot.F Thick	0.00800
Area	0.00253	Asz	0.00057
Iyb	0.01138	Ozb	0.00180
Iy	0.00001	Izz	0.00000
Ybar	0.05000	Zbar	0.05700
Wely	0.00011	Welz	0.00004
ry	0.04890	rz	0.03020

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 0.40000, Lz = 0.40000, Lb = 0.40000
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Equivalent Uniform Moment Factors Cmy = 1.00, Cmz = 1.00, CmLT = 1.00

4. Checking Result

Slenderness Ratio
 L/r = 106.0 < 300.0 (Memb:26, LCB: 1)..... O.K
 Axial Resistance
 N_Ed/Nt_Rd = 0.000/695.750 = 0.000 < 1.000 O.K
 Bending Resistance
 M_Edy/M_Rdy = 26.4913/32.8350 = 0.807 < 1.000 O.K
 M_Edz/M_Rdz = 0.0000/16.0084 = 0.000 < 1.000 O.K
 Combined Resistance
 R.MNRd = MAX[M_Edy/Mny_Rd, M_Edz/Mnz_Rd]
 R.byN = N_Ed/(A*fy/Gamma_M0), R.byM = M_Edy/My_Rd + M_Edz/Mz_Rd
 Rmax = MAX[R.MNRd, (R.byN+R.byM)] = 0.807 < 1.000 O.K
 Shear Resistance
 V_Edy/Vy_Rd = 0.000 < 1.000 O.K
 V_Edz/Vz_Rd = 0.496 < 1.000 O.K

Figura 115. Elemento 30: verifiche strutturali dell'elemento in acciaio nei confronti del carico da sollevamento

Sono stati poi verificati gli effetti locali legati al carico concentrato per il sollevamento. La massima forza di trazione sui tiranti è pari a circa 67 kN.

5.4.3 Analisi dinamiche lineari e non lineari

In questa sezione vengono ripetute le analisi dinamiche effettuate per il telaio monopiano come descritto in 5.3.1, ma aggiornando i carichi coinvolti secondo quanto riportato in 5.4.1. Quindi, nel modello per le analisi dinamiche analizzato nella presente sezione è stata inserita una massa del solaio pari a circa 2573 kg (vedi paragrafo 5.4.1), alla quale si aggiunge metà della tamponatura, pari a circa 3455 kg. Il momento di inerzia polare di solaio e tamponatura è stato valutato in circa 14899 kgm². Tali valori sono stati poi incrementati considerando la massa derivante da un carico variabile (carico accidentale per le civili abitazioni) di 2 kN/m², moltiplicato per un coefficiente 0.3, che rappresenta l'aliquota del carico variabile da assumere nelle analisi sismiche per le destinazioni residenziali (ψ_{2j} di Tab. 2.5.I secondo le attuali NTC2018). È inoltre importante precisare che le analisi descritte in questa sezione considerano il solaio come un elemento infinitamente rigido nel suo piano.

Prima di effettuare le analisi dinamiche con forzante sismica, è stata effettuata un'analisi modale lineare. I primi tre modi naturali di vibrare sono mostrati in Figura 116, mentre in Tabella 29Tabella sono riportate le frequenze proprie per ciascuno di questi modi.

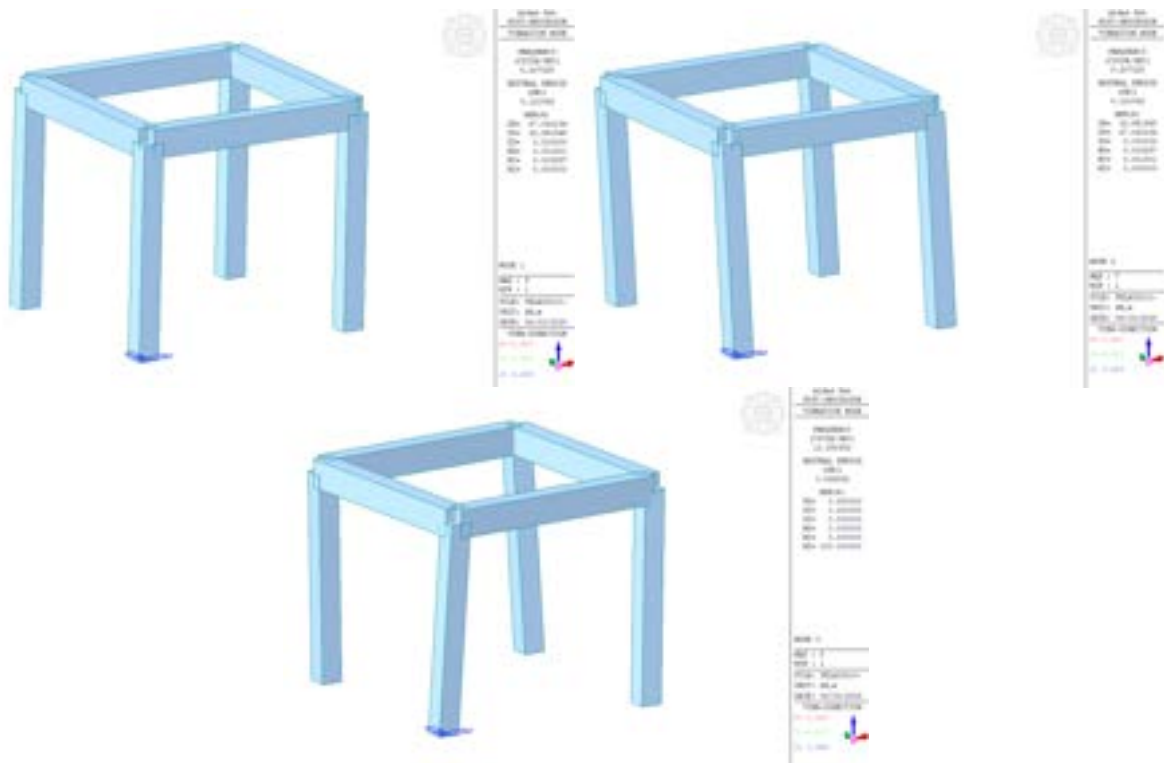


Figura 116. Modi di vibrare

Tabella 29. Frequenze e periodi

Modo	Frequenza (Hz)	Periodo (sec)
1	8.2073	0.1218
2	8.2073	0.1218
3	10.3884	0.0963

Come si può osservare confrontando i risultati di Tabella 29 con quelli mostrati in Tabella 26, l'aggiornamento dei carichi comporta un leggero aumento delle frequenze dei primi tre modi di vibrare.

Una volta terminata l'analisi modale si è proceduto effettuando una analisi dinamica non lineare con integrazione diretta delle equazioni del moto. Sono state applicate le tre componenti del sisma di Amatrice del 24/08/2016 [2] descritte nel paragrafo 5.2, dopo aver caricato la struttura con i carichi statici. L'analisi è stata effettuata sia utilizzando gli accelerogrammi a tutta ampiezza, sia gli accelerogrammi scalati in modo che siano rappresentativi dei diversi stati limite, così come descritto in 5.2. Il modello isteretico ad incrudimento cinematico utilizzato per le analisi è lo stesso utilizzato in precedenza (vedi Figura 80).

Gli spostamenti massimi dei quattro nodi a livello del solaio, ottenuti nel caso di accelerogrammi a tutta ampiezza (nat.) e di accelerogrammi scalati ai vari stati limite, sono riportati in Tabella 30.

Tabella 308. Spostamenti massimi ottenuti dall'analisi dinamica

Sisma	Nodo	Accelerogramma	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RX ([rad])	RY ([rad])	RZ ([rad])
nat.	5	agXYZ(all)	0.008263	0.002205	0.000538	-0.00025	0.000786	-1.6E-05
	6	agXYZ(all)	0.008263	0.002204	0.00049	-0.00026	0.000897	-1.6E-05
	7	agXYZ(all)	0.008264	0.002205	0.00054	0.00023	0.000786	-1.6E-05
	8	agXYZ(all)	0.008264	0.002204	0.000492	0.000228	0.000901	-1.6E-05
SLC	5	agXYZslc(all)	0.003057	0.001033	0.000092	-0.00015	0.000375	0.000007
	6	agXYZslc(all)	0.003057	0.001048	0.000089	-0.00015	0.000365	0.000007
	7	agXYZslc(all)	0.003043	0.001033	0.000092	0.00014	0.000377	0.000007
	8	agXYZslc(all)	0.003043	0.001048	0.00009	0.000138	0.000367	0.000007
SLV	5	agXYZslv(all)	0.002493	0.000836	0.000073	-0.00013	0.000286	0.000006
	6	agXYZslv(all)	0.002493	0.000843	0.000068	-0.00013	0.000274	0.000006
	7	agXYZslv(all)	0.002486	0.000836	0.000072	0.000123	0.000286	0.000006
	8	agXYZslv(all)	0.002486	0.000843	0.000068	0.000121	0.000277	0.000006
SLD	5	agXYZsld(all)	0.001031	0.00032	0.000024	-0.00007	0.000117	-7E-06
	6	agXYZsld(all)	0.001031	0.000329	0.000022	-0.00007	0.000088	-7E-06
	7	agXYZsld(all)	0.001048	0.00032	0.000026	0.000066	0.000113	-7E-06
	8	agXYZsld(all)	0.001048	0.000329	0.000023	0.000067	0.000089	-7E-06
SLO	5	agXYZslo(all)	0.00086	0.000266	0.000019	-0.00006	0.0001	-4E-06
	6	agXYZslo(all)	0.00086	0.000273	0.000017	-5.9E-05	0.000073	-4E-06
	7	agXYZslo(all)	0.000869	0.000266	0.000019	0.000054	0.000098	-4E-06
	8	agXYZslo(all)	0.000869	0.000273	0.000018	0.000057	-7.3E-05	-4E-06

La configurazione deformata del provino nell'istante di tempo in cui si verifica lo spostamento massimo per l'accelerogramma a tutta ampiezza è mostrata in Figura 117. Lo spostamento massimo al variare dello stato limite considerato, invece, è mostrato in Figura 118.



Figura 117. Massimo spostamento per accelerogramma non scalato e numerazione nodi

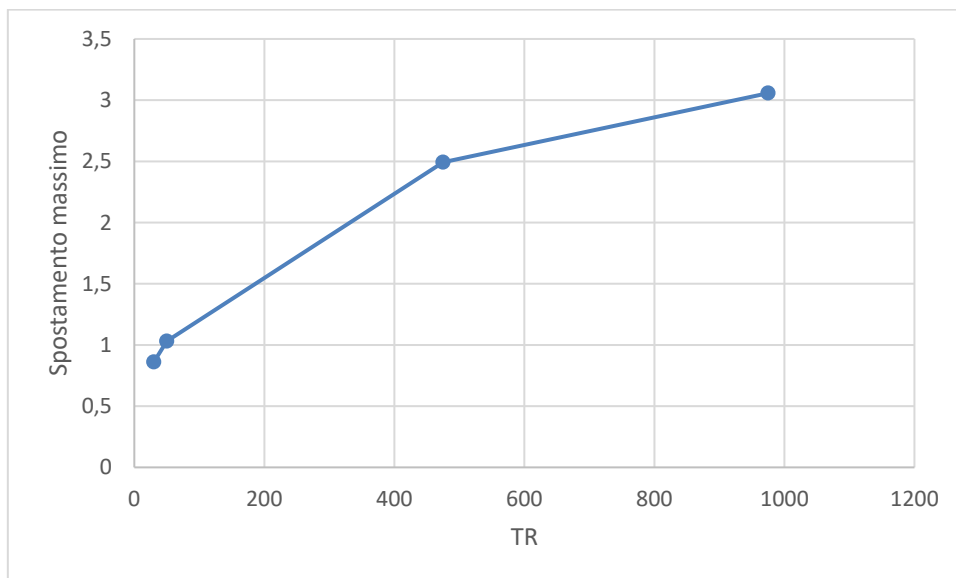


Figura 118. Massimo spostamento al variare dello stato limite (TR: tempo di ritorno in anni) considerato (mm)

La Figura 119 mostra lo sforzi normale nei pilastri durante il sisma. Si osserva la decompressione per un breve istante in alcuni pilastri. In Figura 120 e Figura 121 sono invece riportati rispettivamente gli sforzi di taglio ed il momento flettente durante il sisma per ogni pilastro.

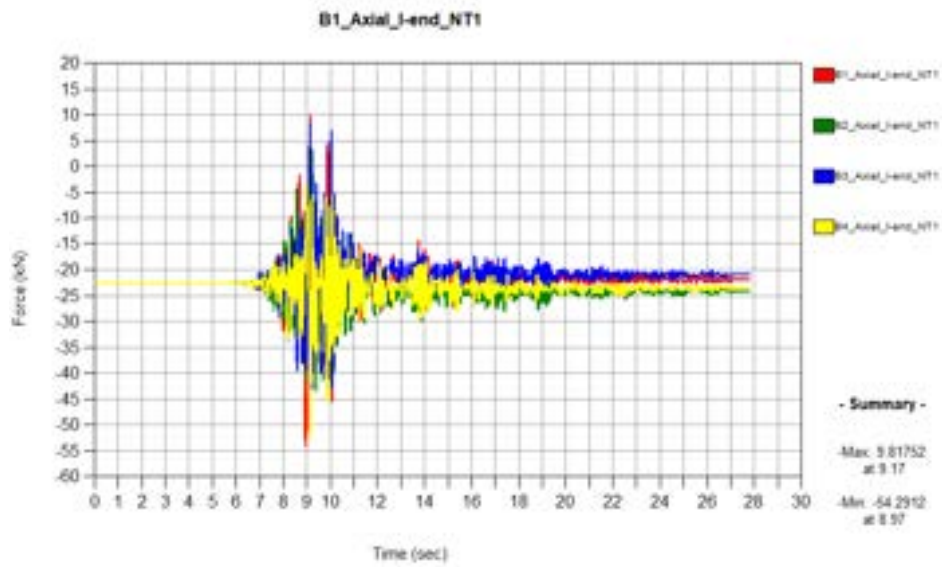


Figura 119. Sforzi normali nei pilastri durante il sisma

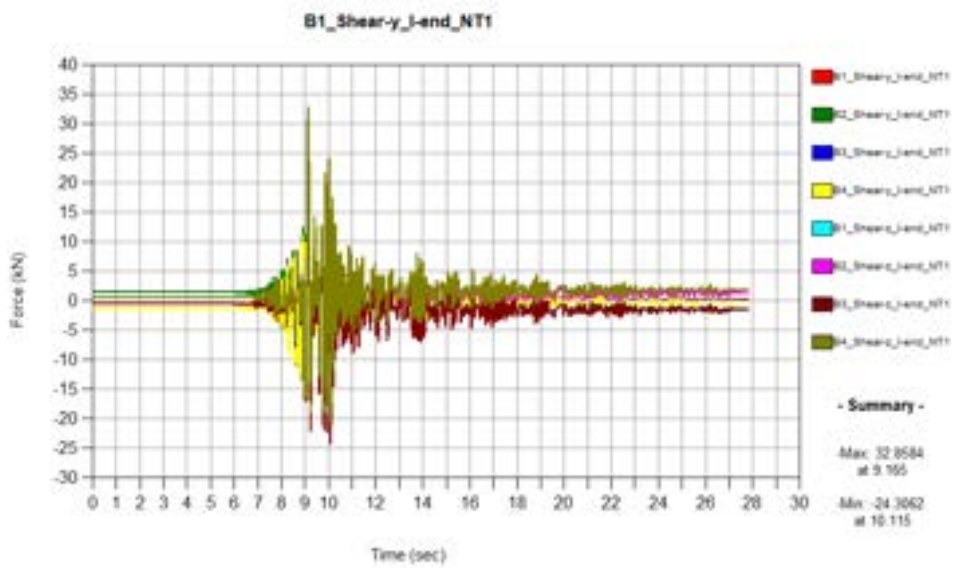


Figura 120. Tagli nei pilastri durante il sisma

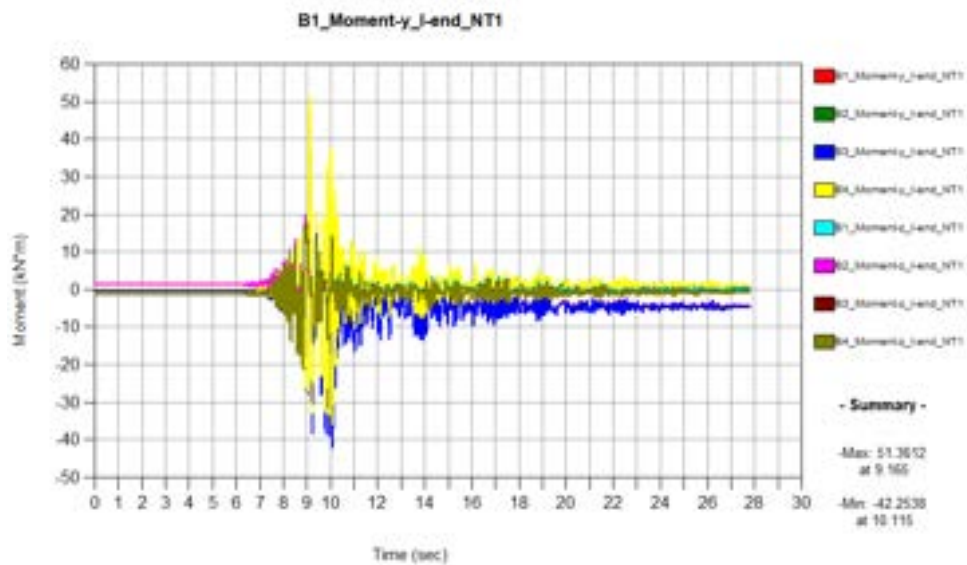


Figura 121. Momenti nei pilastri durante il sisma

Per quanto riguarda il sisma scalato in modo da essere rappresentativo degli stati limite analizzati, gli andamenti degli sforzi normali in ogni pilastro sono mostrati per gli stati limite SLO, SLD, SLV e SLC rispettivamente in Figura 122, Figura 123, Figura 124 e Figura 125.

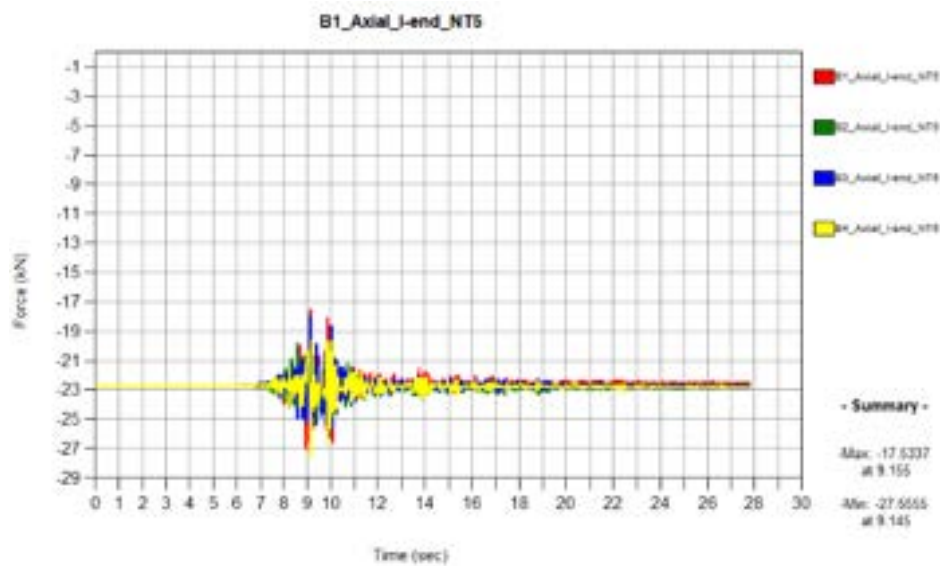


Figura 122. Sforzi normali nei pilastri per SLO

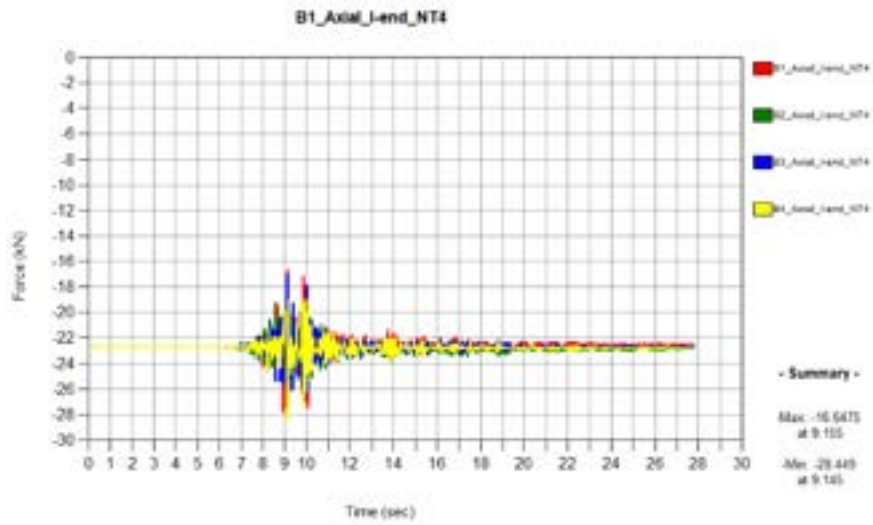


Figura 123. Sforzi normali nei pilastri per SLD

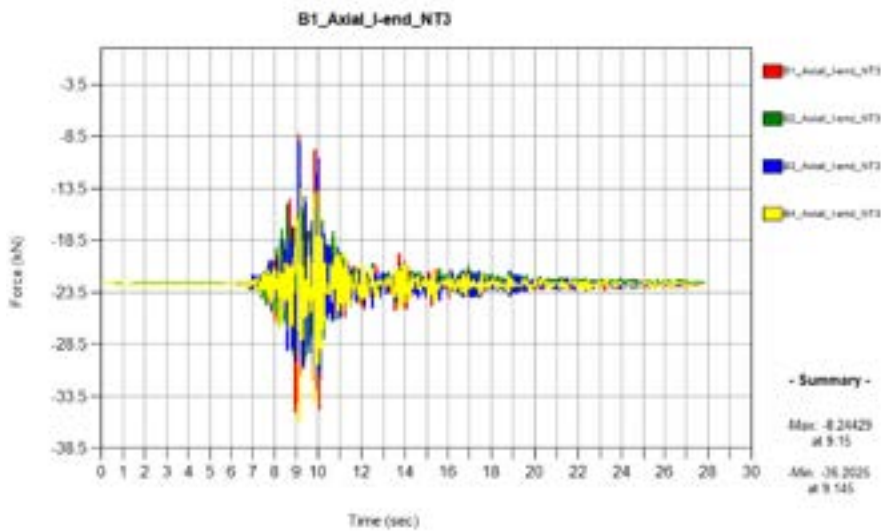


Figura 124. Sforzi normali nei pilastri per SLV

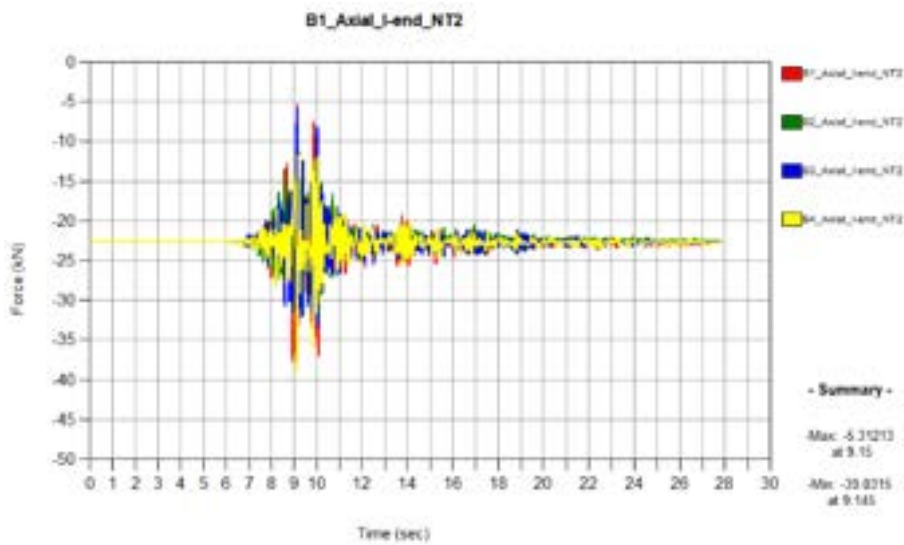


Figura 125. Sforzi normali nei pilastri per SLC

Per quanto riguarda lo stato delle cerniere plastiche, alla base dei pilastri si supera il secondo limite di snervamento per il terremoto a tutta ampiezza, come mostrato in figura 126

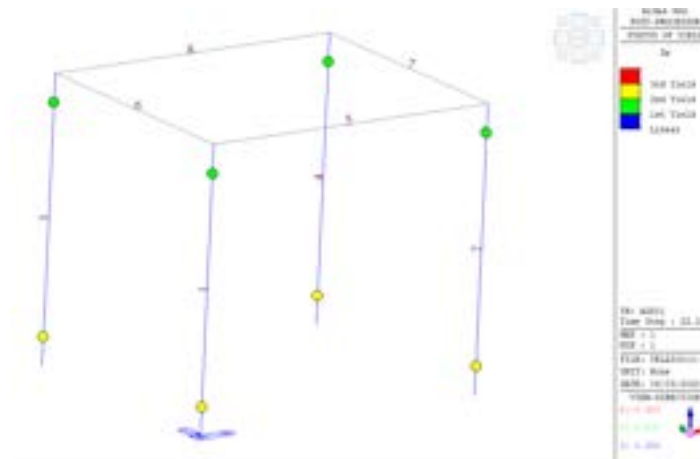


Figura 126. Stato delle cerniere plastiche per $t=22.26$ s

Lo stato delle cerniere plastiche si basa sulla interazione tra lo sforzo normale e i due momenti, con riferimento a due superfici di snervamento che definiscono la fessurazione (primo limite di snervamento) e le condizioni di snervamento dei materiali (secondo limite).

Le curve momento-rotazione relative alla base del pilastro 1 (Figura 127) per il terremoto a tutta ampiezza (rosso) e per i quattro stati limite considerati sono mostrate in Figura 128.

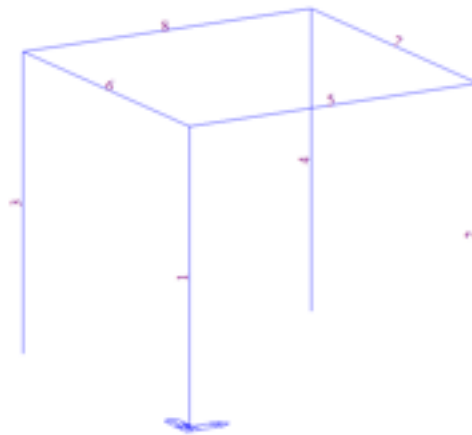


Figura 127. Numerazione degli elementi

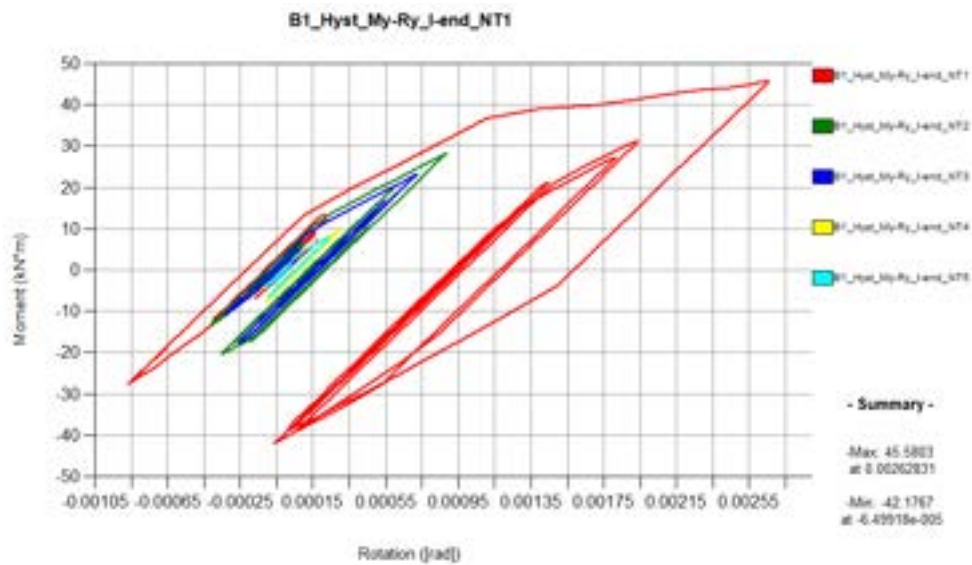


Figura 128. Curve Rotazione-Momento alla base del pilastro 1

5.4.4 Struttura con travi in spessore di solaio

Dal momento che le analisi numeriche effettuate mostrano che lo spostamento nodale massimo è dell'ordine di 8.26 mm (Tabella 30, sisma a piena ampiezza, nodo 5, direzione X) e considerando che i test su tavola vibrante hanno come scopo quello di indagare il comportamento nei confronti del sisma del sistema di parete che sarà installato sul manufatto, si è deciso di aumentare la deformabilità del provino, per valutare le prestazioni del sistema di connessione dei pannelli alla struttura in condizioni più gravose in termini di spostamenti d'interpiano

A tal fine, il telaio descritto nei paragrafi precedenti è stato modificato inserendo delle travi in spessore di solaio con sezione 40x20 cm, armate con 3+3 Ø14 e staffe Ø8/20, al posto delle iniziali travi emergenti con sezione 30x40 cm. Una vista del modello numerico con le travi in spessore di solaio è riportata in Figura 129.

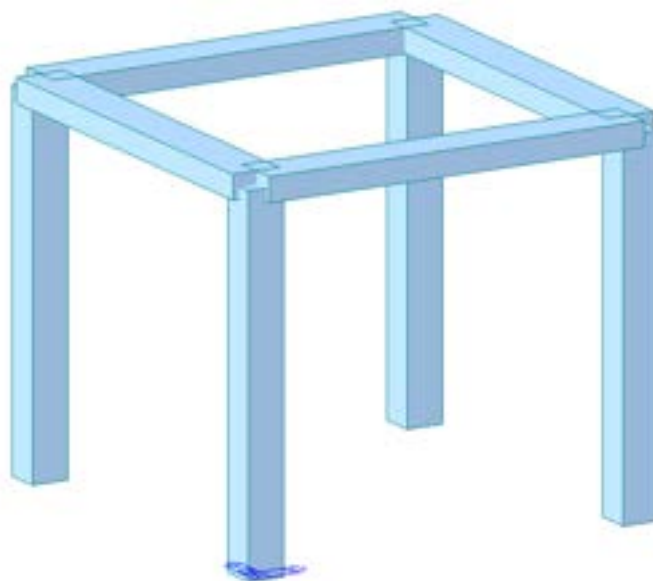


Figura 129. Struttura con travi in spessore di solaio

Le analisi descritte nel paragrafo 5.4.3 sono state ripetute sul modello con le travi in spessore. Ripetendo la analisi si trovano per i nodi superiori (in testa ai pilastri) gli spostamenti riportati in Tabella 31.

Tabella 31. Spostamenti massimi

Sisma	Nodo	Accelerogramma	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RX ([rad])	RY ([rad])	RZ ([rad])
nat.	5	agXYZ(all)	0.012243	-0.00378	0.000665	-0.00124	0.003668	0.000019
	6	agXYZ(all)	0.012243	-0.00377	0.000676	-0.00123	0.003669	0.000019
	7	agXYZ(all)	0.012246	-0.00378	0.000682	0.001332	0.003658	0.000019
	8	agXYZ(all)	0.012246	-0.00377	0.000679	0.001327	0.003676	0.000019
SLC	5	agXYZslc(all)	0.004337	-0.0016	0.000092	0.000442	0.001497	-0.00001
	6	agXYZslc(all)	0.004337	-0.0016	0.000093	0.000442	0.00146	-0.00001
	7	agXYZslc(all)	0.004357	-0.0016	0.000095	0.000556	0.001475	-0.00001
	8	agXYZslc(all)	0.004357	-0.0016	0.000098	0.00056	0.001431	-0.00001
SLV	5	agXYZslv(all)	0.00345	-0.00133	0.000066	0.000357	0.00119	0.000009
	6	agXYZslv(all)	0.00345	-0.00132	0.000065	0.000361	0.001154	0.000009
	7	agXYZslv(all)	0.00346	-0.00133	0.000065	0.000469	0.001164	0.000009
	8	agXYZslv(all)	0.00346	-0.00132	0.000069	0.000472	0.001117	0.000009
SLD	5	agXYZsld(all)	0.001362	-0.00057	0.000023	-0.00016	0.000438	-1.3E-05
	6	agXYZsld(all)	0.001362	-0.00055	0.000022	-0.00016	-0.00042	-1.3E-05
	7	agXYZsld(all)	0.001377	-0.00057	0.000025	0.000211	0.000438	-1.3E-05
	8	agXYZsld(all)	0.001377	-0.00055	0.000024	0.000207	-0.00042	-1.3E-05
SLO	5	agXYZslo(all)	0.001142	-0.00047	0.000019	-0.00015	0.000369	-1.9E-05
	6	agXYZslo(all)	0.001142	-0.00046	0.00002	-0.00014	-0.00035	-1.9E-05
	7	agXYZslo(all)	0.001169	-0.00047	0.000021	0.000178	0.000369	-1.9E-05
	8	agXYZslo(all)	0.001169	-0.00046	0.00002	0.000175	-0.00035	-1.9E-05

Il massimo spostamento ottenuto per il nodo 5 al variare dello stato limite considerato è riportato Figura 130. Confrontando questa figura con la Figura 118 è possibile apprezzare un incremento dello spostamento massimo per ogni stato limite considerato, dovuto alla diminuzione della rigidezza della struttura.

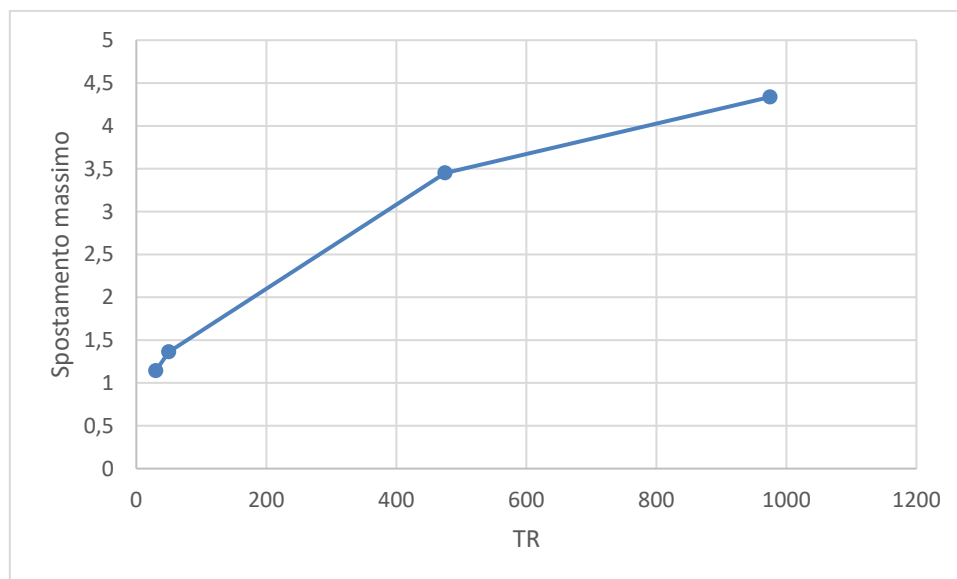


Figura 130. Massimo spostamento al variare dello stato limite (TR: tempo di ritorno in anni) considerato (mm)

Lo sforzo normale per il sisma a tutta ampiezza, lo sforzo di taglio ed il momento flettente sono riportati graficamente per tutti i pilastri rispettivamente in Figura 131, Figura 132 e Figura 133.

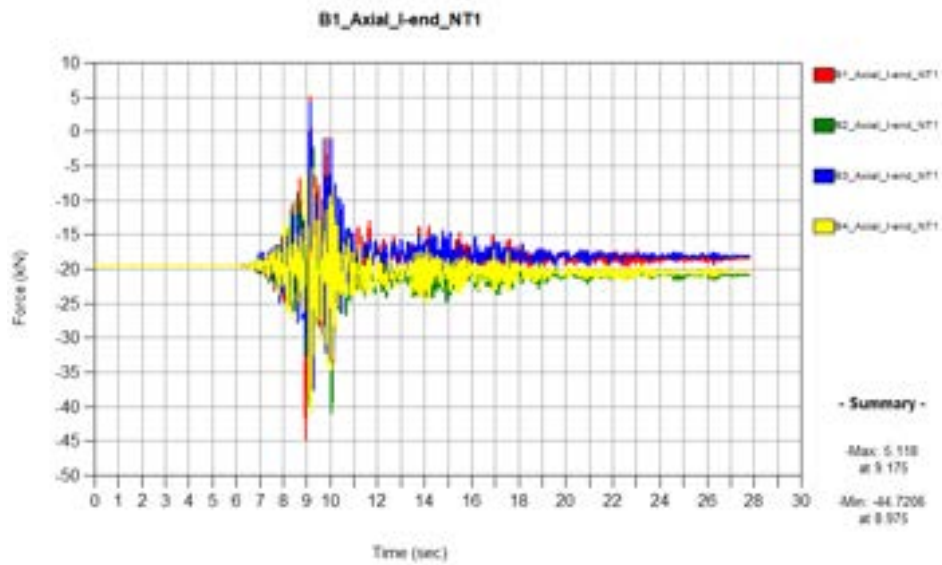


Figura 131. Sforzi normali nei pilastri durante il sisma

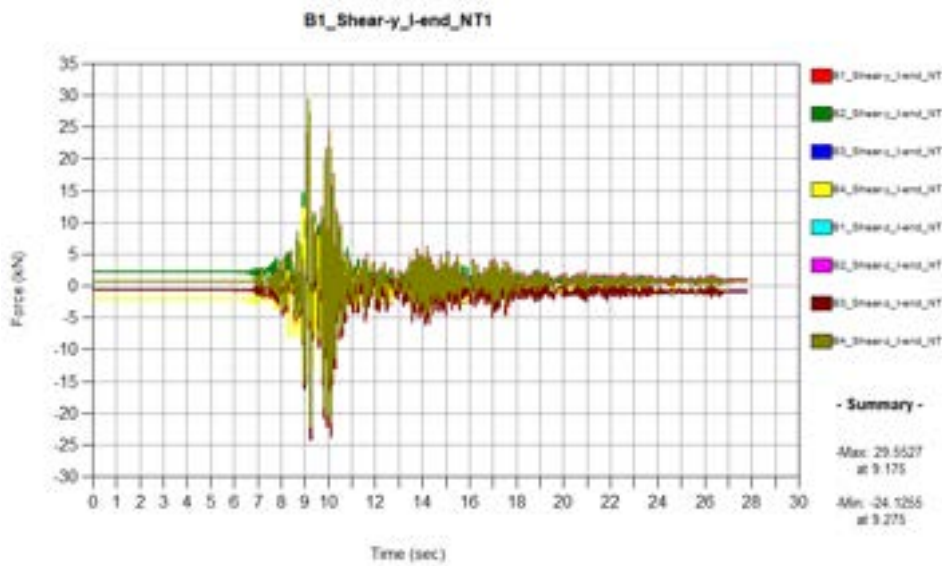


Figura 132. Tagli nei pilastri durante il sisma

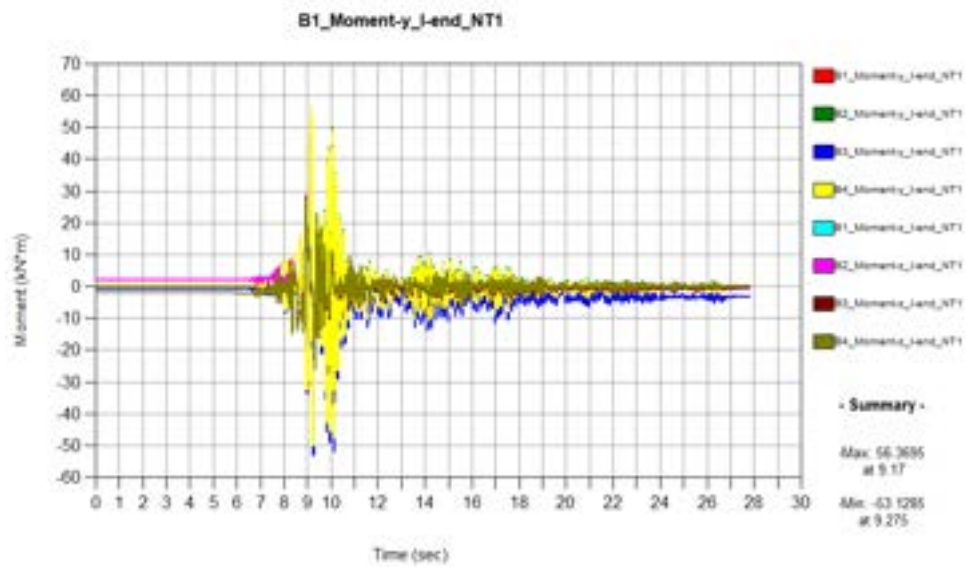


Figura 133. Momenti nei pilastri durante il sisma

Per quanto riguarda il sisma opportunamente scalato, gli andamenti degli sforzi normali in ogni pilastro sono mostrati per gli stati limite SLO, SLD, SLV e SLC rispettivamente in Figura 134, Figura 135, Figura 136 e Figura 137.

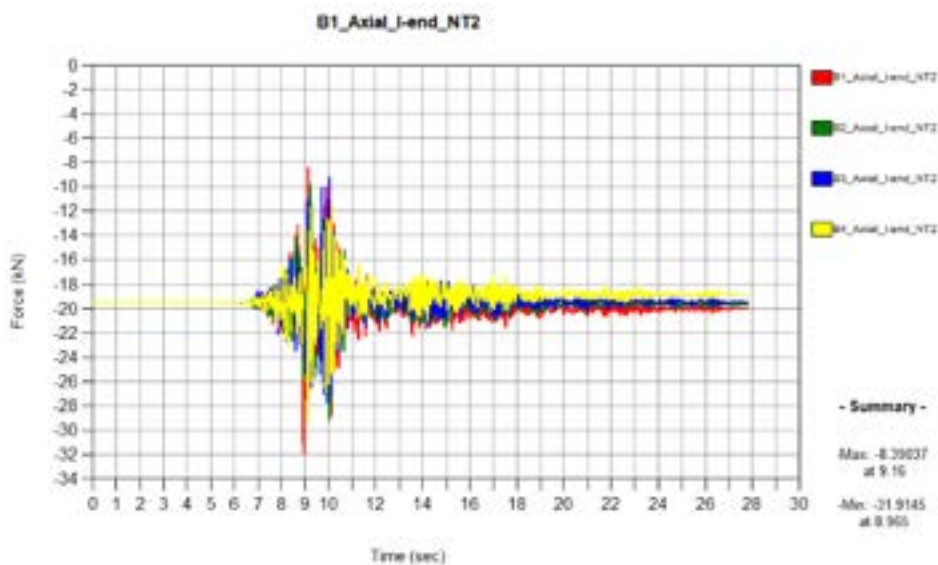


Figura 134. Sforzi normali nei pilastri per SLO

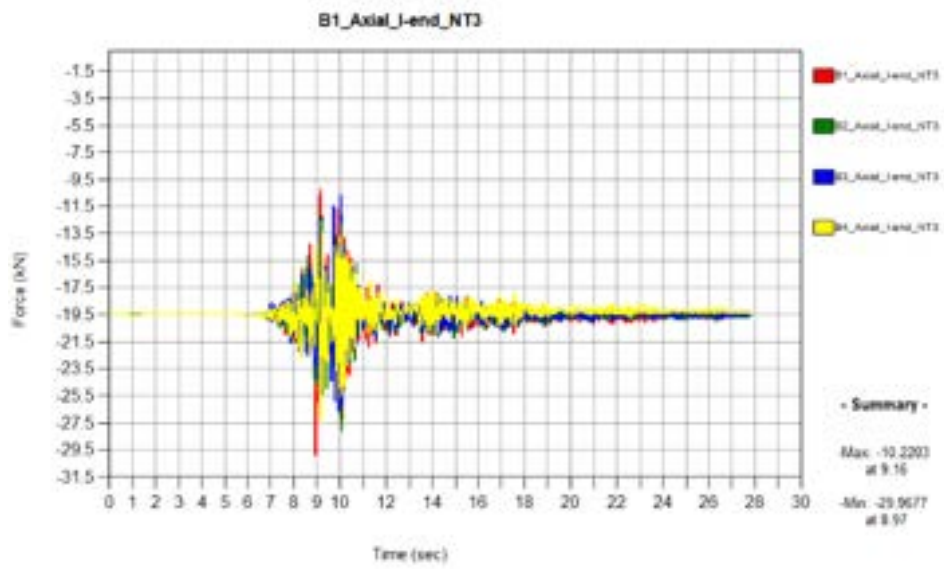


Figura 135. Sforzi normali nei pilastri per SLD

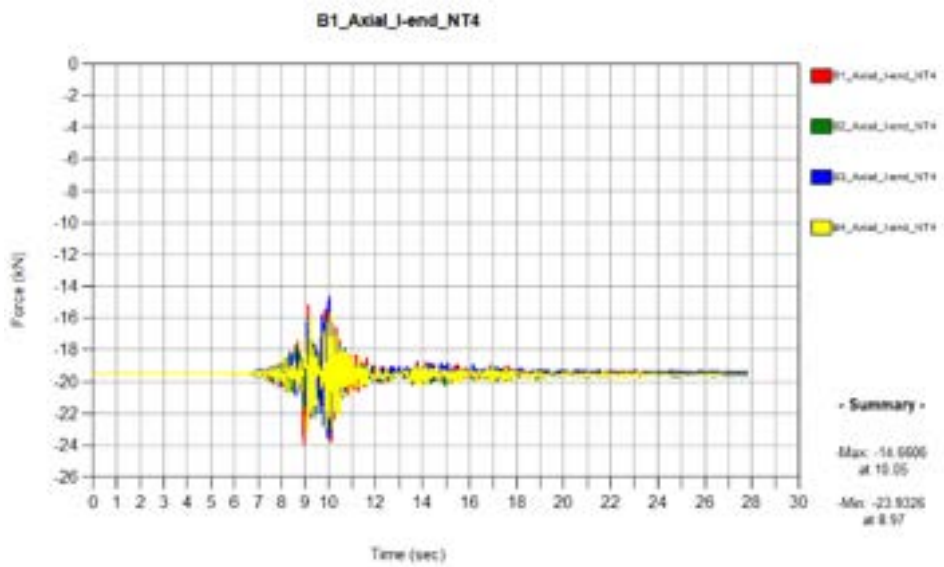


Figura 136. Sforzi normali nei pilastri per SLV

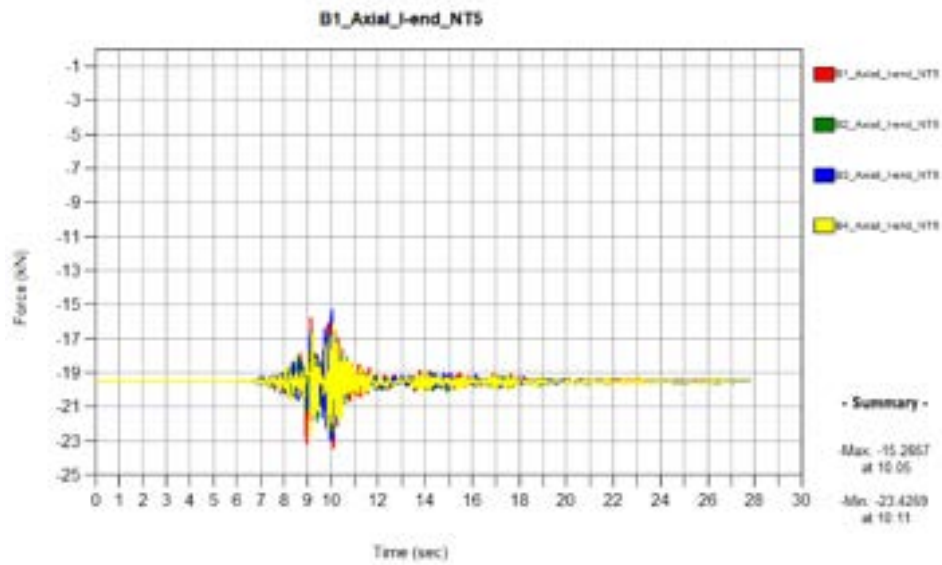


Figura 137. Sforzi normali nei pilastri per SLC

Per quanto riguarda lo stato delle cerniere plastiche, alla base dei pilastri si supera il secondo limite di snervamento per il terremoto a tutta ampiezza, come mostrato in Figura 138.

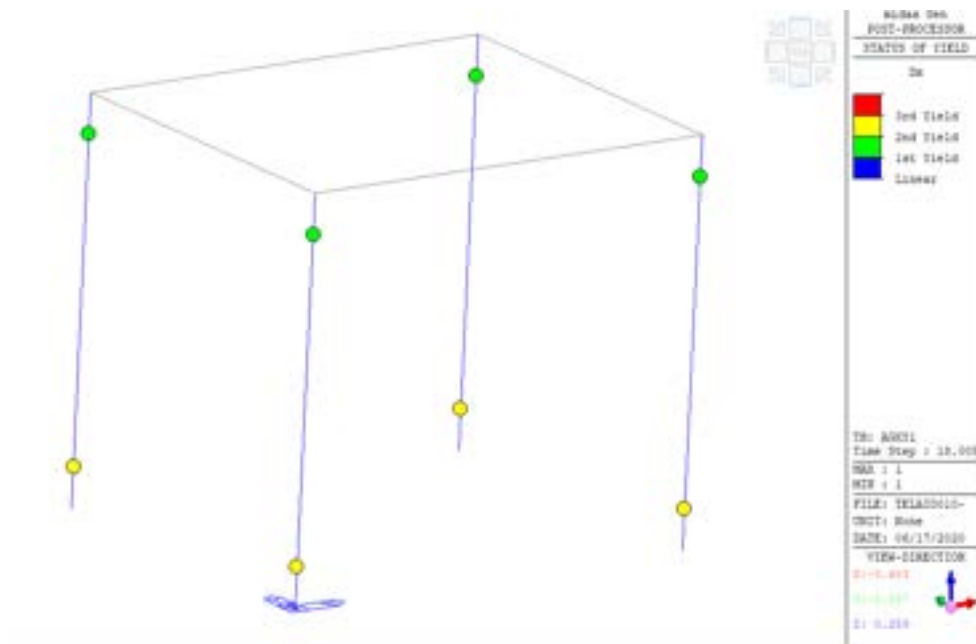


Figura 138. Stato delle cerniere plastiche sui pilastri a fine sisma

Le curve momento-rotazione relative alla base di un pilastro per il terremoto a tutta ampiezza (rosso) e per i quattro stati limite considerati sono mostrate in Figura 139.

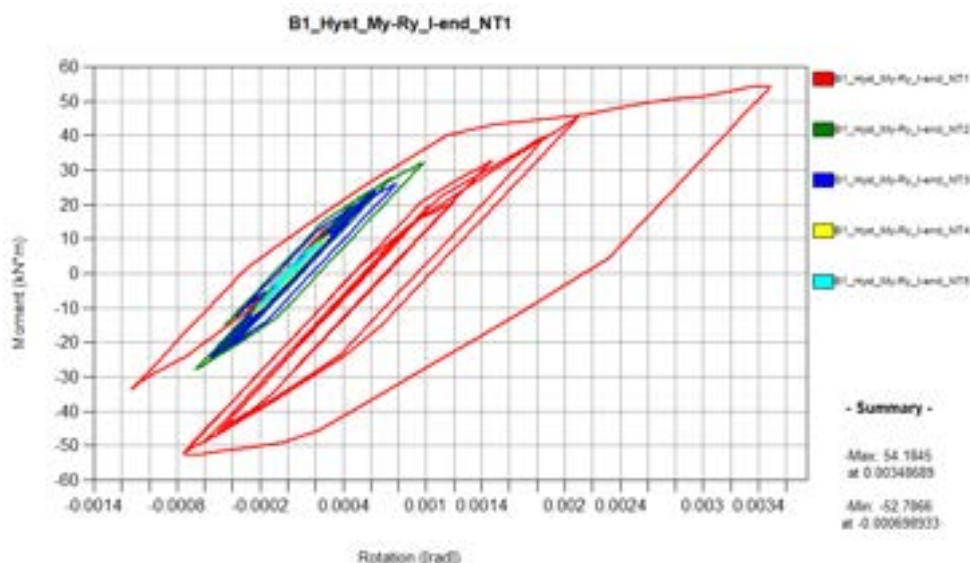


Figura 139. Curve Rotazione-Momento alla base di un pilastro

Infine, si riporta una ulteriore analisi effettuata considerando il telaio con travi emergenti ed aggiungendo una massa di circa 600 kg sul solaio. Tale massa è stata valutata considerando il carico variabile di 2 kN/m² ridotto per la condizione di carico sismica.

In Tabella 32 si riportano gli spostamenti massimi dei quattro nodi a livello del solaio.

Tabella 329. Spostamenti massimi

Sisma	Nodo	Accelerogramma	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RX ([rad])	RY ([rad])	RZ ([rad])
nat.	5	agXYZ(all)	0.008961	0.002415	0.000621	-0.00028	0.000803	0.000015
	6	agXYZ(all)	0.008961	0.002409	0.00057	-0.00028	0.000934	0.000015
	7	agXYZ(all)	0.008953	0.002415	0.000618	0.000308	0.000818	0.000015
	8	agXYZ(all)	0.008953	0.002409	0.000566	0.000313	0.000936	0.000015
SLC	5	agXYZslc(all)	0.003282	0.001084	0.000096	-0.00017	0.000399	0.000007
	6	agXYZslc(all)	0.003282	0.001091	0.000095	-0.00017	0.000394	0.000007
	7	agXYZslc(all)	0.003298	0.001084	0.0001	0.000165	0.000398	0.000007
	8	agXYZslc(all)	0.003298	0.001091	0.000098	0.000164	0.000399	0.000007
SLV	5	agXYZslv(all)	0.002669	0.000862	0.000075	-0.00015	0.000301	0.000011
	6	agXYZslv(all)	0.002669	0.000875	0.000073	-0.00016	0.000295	0.000011
	7	agXYZslv(all)	0.002663	0.000862	0.000076	0.000141	0.000304	0.000011
	8	agXYZslv(all)	0.002663	0.000875	0.000075	0.000141	0.000299	0.000011
SLD	5	agXYZsld(all)	0.001078	0.000332	0.000025	-8.2E-05	0.000121	0.000008
	6	agXYZsld(all)	0.001078	0.000344	0.000022	-8.3E-05	0.000095	0.000008
	7	agXYZsld(all)	0.001079	0.000332	0.000025	0.000073	0.000119	0.000008
	8	agXYZsld(all)	0.001079	0.000344	0.000024	0.000075	0.000094	0.000008
SLO	5	agXYZslo(all)	0.000886	0.000276	0.000019	-6.9E-05	0.000103	0.000005
	6	agXYZslo(all)	0.000886	0.000285	0.000017	-6.9E-05	-7.8E-05	0.000005
	7	agXYZslo(all)	0.000894	0.000276	0.000019	0.000062	0.000101	0.000005
	8	agXYZslo(all)	0.000894	0.000285	0.000018	0.000064	-7.9E-05	0.000005

La configurazione deformata del provino nell'istante di tempo in cui si verifica lo spostamento massimo per l'accelerogramma a tutta ampiezza è mostrata in Figura 140. Lo spostamento massimo al variare dello stato limite considerato, invece, è mostrato in Figura 141.

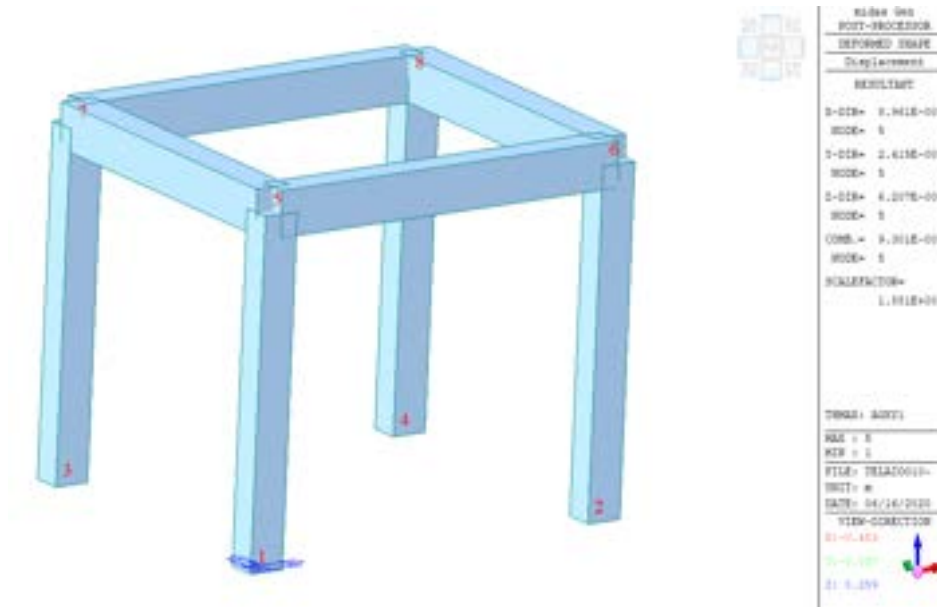


Figura 140. Massimo spostamento per accelerogramma non scalato e numerazione nodi

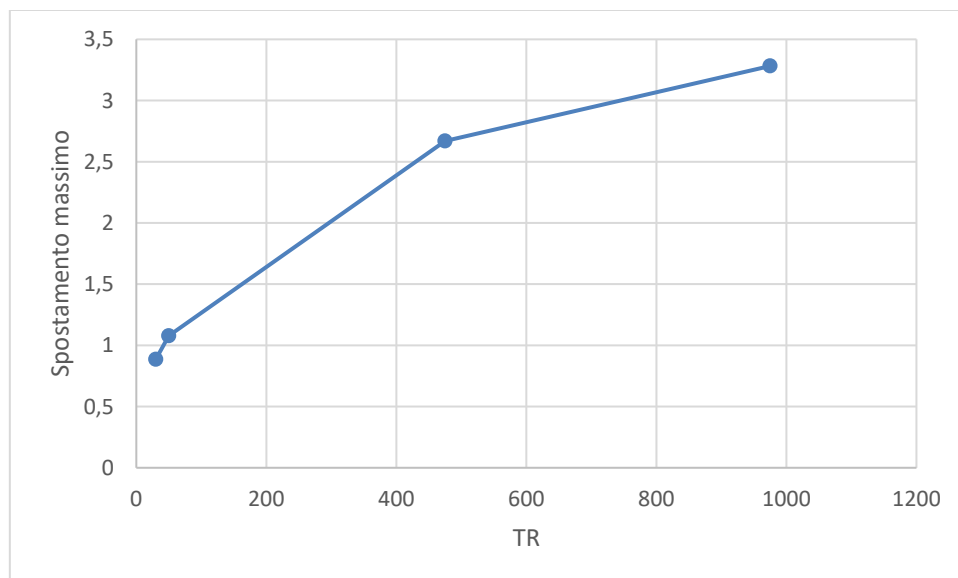


Figura 141. Massimo spostamento al variare dello stato limite considerato (mm)

Lo sforzo normale per il sisma a tutta ampiezza, lo sforzo di taglio ed il momento flettente sono riportati graficamente per tutti i pilastri rispettivamente in Figura 142, Figura 143 e Figura 144.

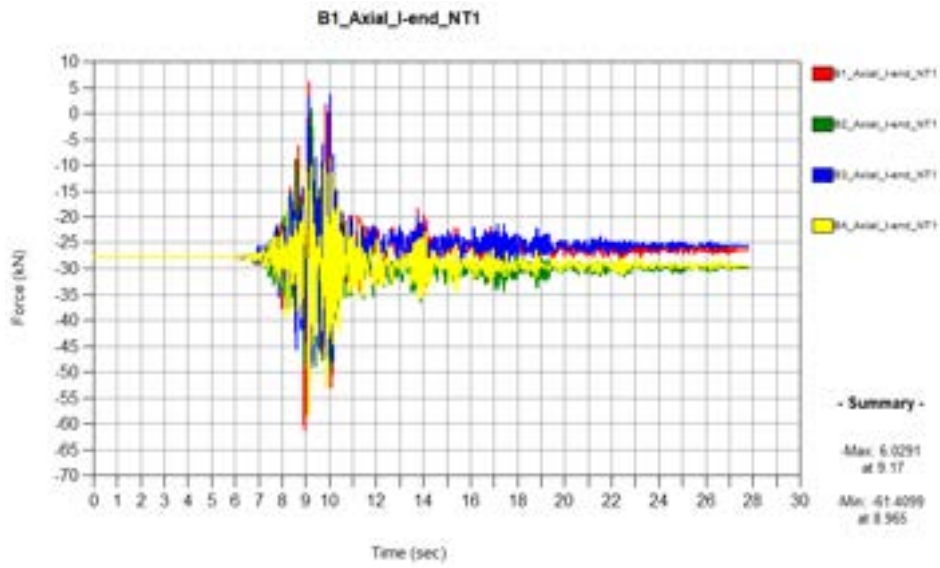


Figura 142. Sforzi normali nei pilastri durante il sisma

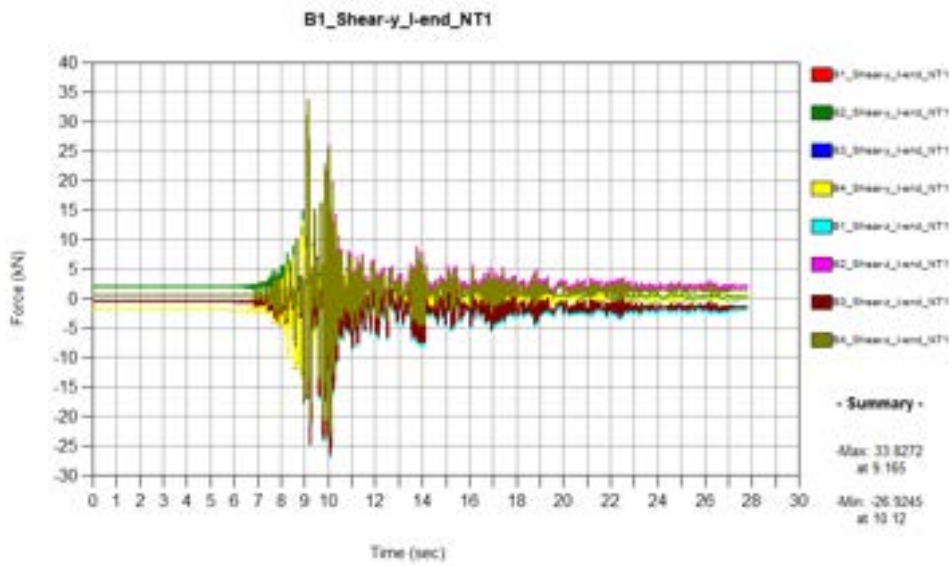


Figura 143. Tagli nei pilastri durante il sisma

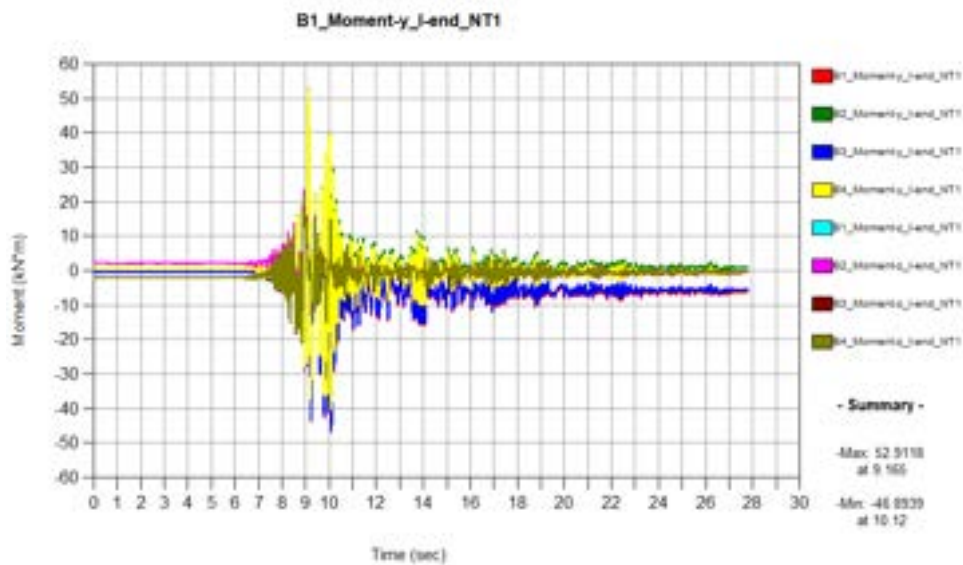


Figura 144. Momenti nei pilastri durante il sisma

Per quanto riguarda il sisma opportunamente scalato, gli andamenti degli sforzi normali in ogni pilastro sono mostrati per gli stati limite SLO, SLD, SLV e SLC rispettivamente in Figura 145, Figura 146, Figura 147 e Figura 148.

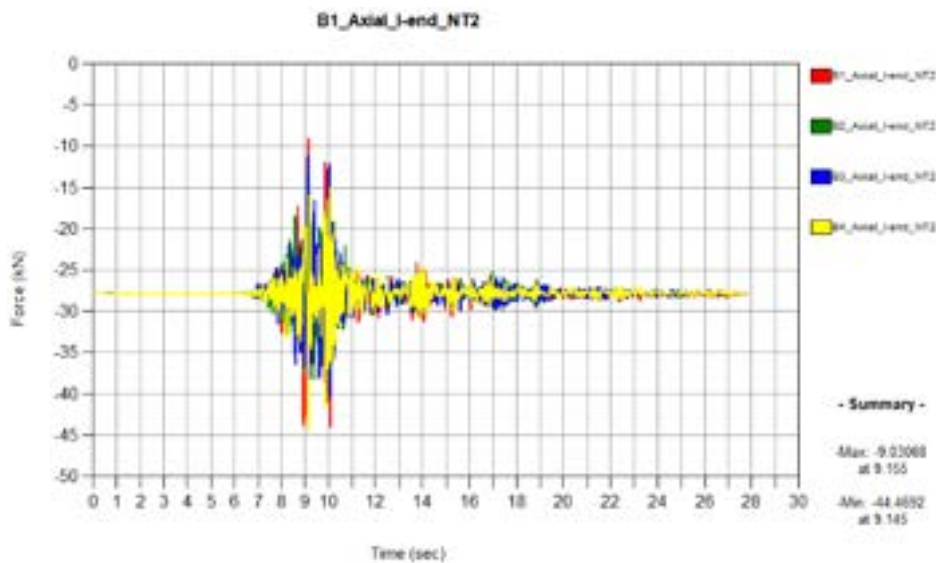


Figura 145. Sforzi normali nei pilastri per SLO

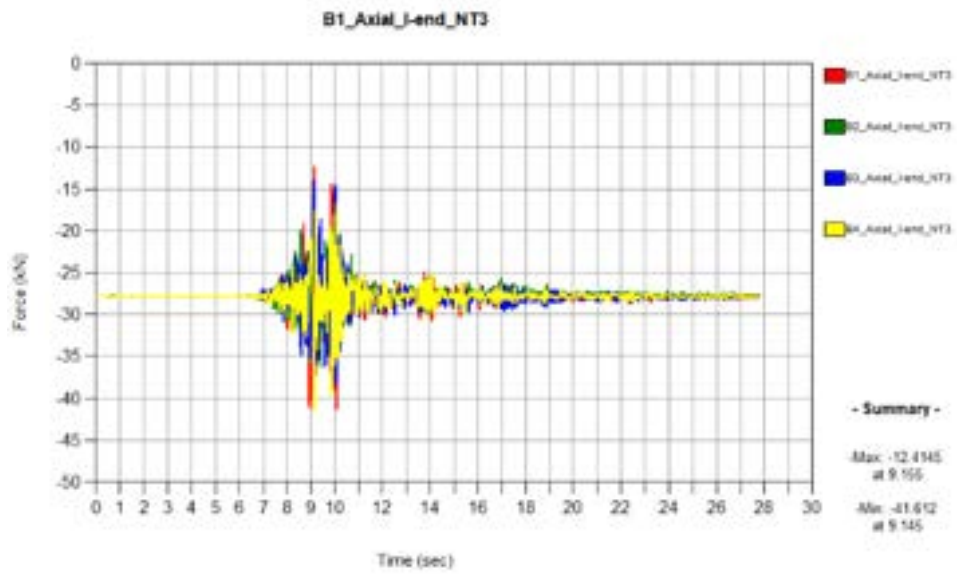


Figura 146. Sforzi normali nei pilastri per SLD

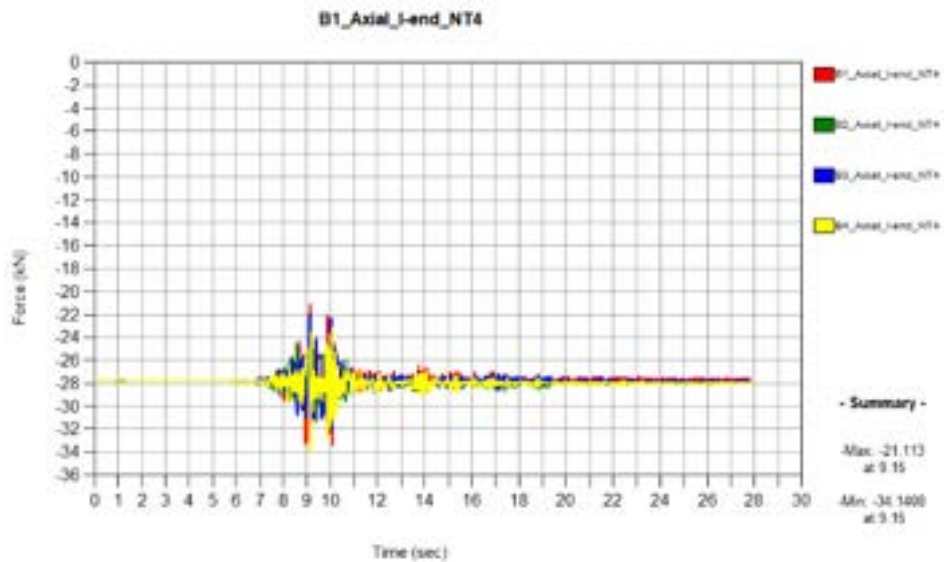


Figura 147. Sforzi normali nei pilastri per SLV

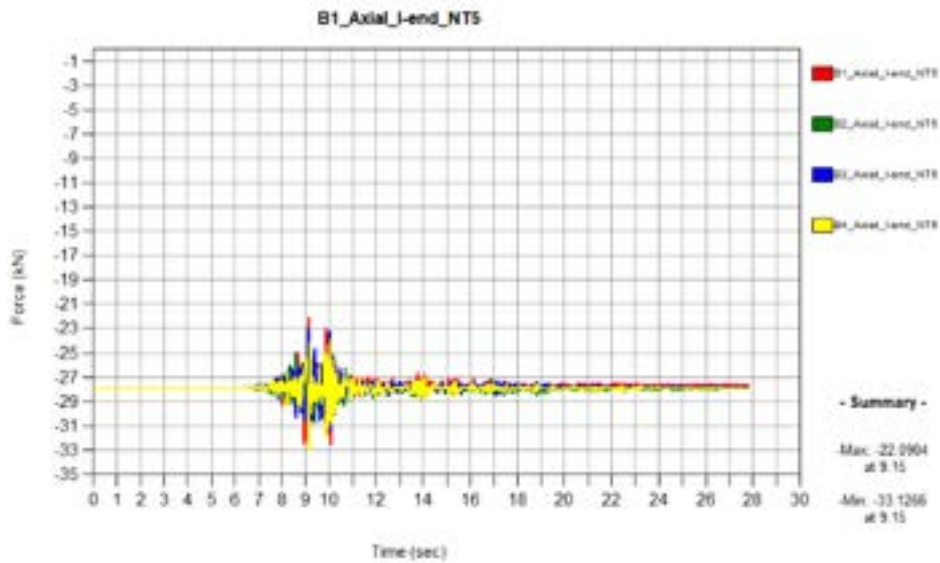


Figura 148. Sforzi normali nei pilastri per SLC

Per quanto riguarda lo stato delle cerniere plastiche, alla base dei pilastri si supera il secondo limite di snervamento per il terremoto non scalato, come mostrato in Figura 149 e Figura 150.

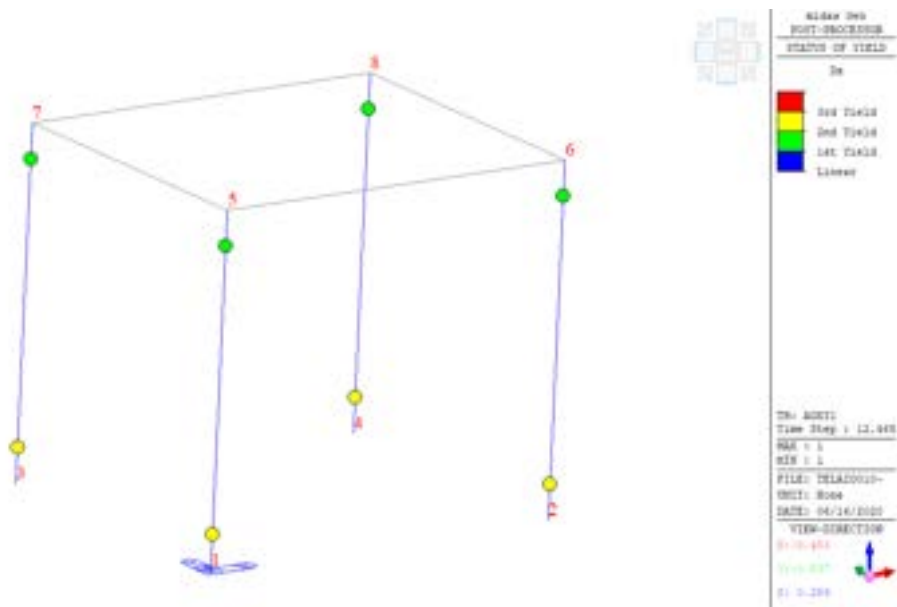


Figura 149. Stato delle cerniere plastiche sui pilastri a fine sisma (Sforzo normale)

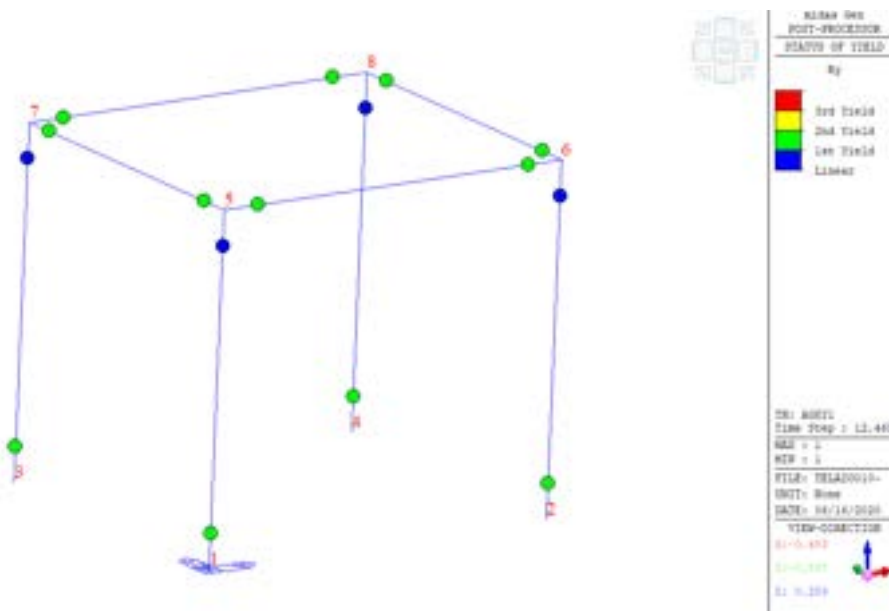


Figura 150. Stato delle cerniere plastiche sui pilastri a fine sisma (Momento)

Le curve momento-rotazione relative alla base di un pilastro per il terremoto a tutta ampiezza (rosso) e per i quattro stati limite considerati sono mostrate in Figura 151.

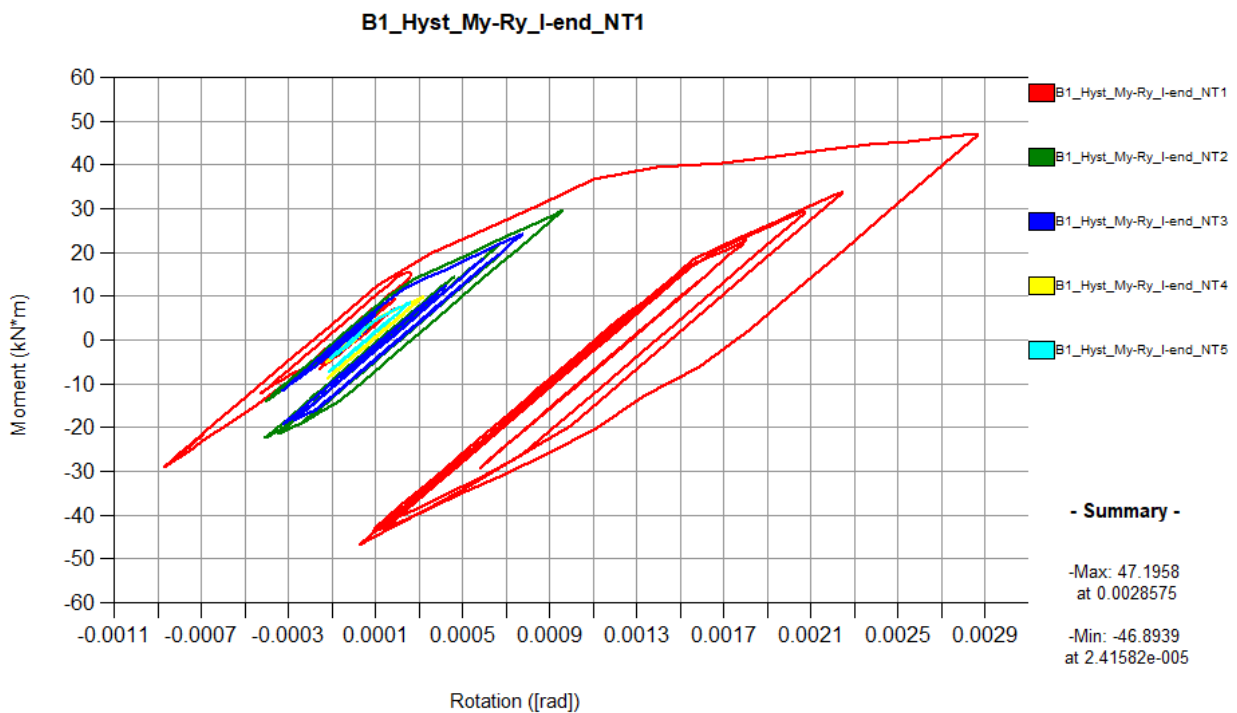


Figura 151. Curve Rotazione-Momento alla base di un pilastro

5.5 Configurazione finale del provino

Le analisi precedenti mostrano che utilizzando la soluzione con travi in spessore di solaio, lo spostamento massimo viene incrementato di circa il 38% nel caso di sisma corrispondente ad un $T_r=475$ anni. L'aggiunta della sola massa legata ai carichi variabili non determina un significativo aumento degli spostamenti. Una sintesi degli spostamenti massimi messi a confronto, per i casi esaminati, è riportata in Figura 152.

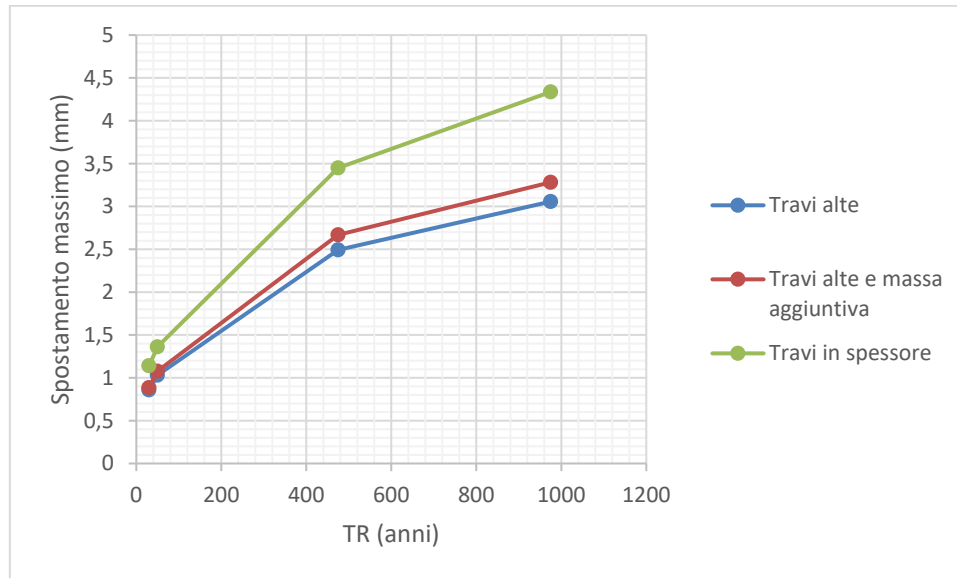


Figura 152. Confronto degli spostamenti massimi per le diverse configurazioni del provino analizzate

Le curve momento-rotazione ottenute per il terremoto non scalato alla base dei quattro pilastri mostrano un incremento di momento e rotazione massimi, comunque accettabili al fine della prova su tavola.

Considerato il fine delle prove, che riguarda il test di elementi di rivestimento delle facciate di edifici esistenti con elementi termicamente isolanti ad elevata capacità sismica, si è infine deciso di optare per la soluzione che garantisca lo spostamento di interpiano più elevato, ossia quella basata su travi in spessore di solaio.

6 Definizione del sistema di supporto

In questo paragrafo si riportano alcune soluzioni analizzate per quanto riguarda il sistema di supporto da utilizzare per collegare i pannelli di rivestimento al telaio e/o alla parete di tamponatura, posizionando lo strato di isolamento nell'intercapedine così generata.

6.1 Carichi e ipotesi di calcolo

Per quanto riguarda lo spessore dello strato di isolamento termico, esso è stato considerato pari a circa 30 cm, supportato da una struttura metallica in acciaio S355 o S275, composta da profilati a spessore sottile formati a freddo. È stata ipotizzata una densità pari a circa 350 N/m^3 per lo strato di isolamento, cui consegue un peso per unità di superficie di 105 N/m^2 . I pannelli sono fissati su profilati ad Ω verticali, con interasse 50 cm. Ogni profilato porta quindi un carico di 52.5 N/m .

In tre casi sono state considerate solamente le componenti orizzontali della accelerazione sismica applicate in testa ed al piede, scambiando le due orizzontali (CombX e CombY) ed analizzando quindi due combinazioni di carico, mentre negli altri casi è stata tenuta in conto anche la componente verticale.

L'azione sismica è stata dedotta attraverso l'analisi del telaio in c.a. descritta nei paragrafi precedenti, a cui la struttura è fissata. In dettaglio, dalla analisi del telaio in c.a. è stata valutata la risposta triassiale in un nodo in testa, in termini di accelerazione. La struttura di supporto della parete è stata quindi sottoposta, mediante analisi con integrazione al passo delle equazioni del moto, a due diverse terne di accelerogrammi applicate in testa e al piede. Non è stata considerata l'interazione dinamica tra la struttura di supporto e il telaio in cemento armato. Nelle analisi è stato assunto un rapporto di smorzamento del 5%.

Sono stati analizzati i seguenti casi:

- 1) Con sole componenti orizzontali della accelerazione sismica:
 - a)
 - Profilati Ω verticali e C orizzontali solo in corrispondenza dei piani.
 - Vincoli esterni (di collegamento con il telaio in c.a.) con la sola rotazione secondo Y consentita;
 - b)
 - Profilati Ω verticali e C orizzontali in corrispondenza dei piani e a due livelli intermedi.
 - Vincoli esterni (di collegamento con il telaio in c.a.) con la sola rotazione secondo Y consentita;
 - c)
 - Profilati Ω verticali e C orizzontali solo in corrispondenza dei piani.
 - Vincoli esterni (di collegamento con il telaio in c.a.) con la sola rotazione secondo Y consentita alla base mentre in testa è stato consentito anche lo spostamento verticale per la sola condizione di carico statico (aste verticali interamente compresse sotto carichi statici);

- 2) Con le tre componenti di accelerazione sismica:
 - a)
 - Profilati Ω verticali e C orizzontali solo in corrispondenza dei piani.
 - Vincoli esterni (di collegamento con il telaio in c.a.) con la sola rotazione secondo Y consentita;
 - b)
 - Profilati Ω verticali e C orizzontali in corrispondenza dei piani e a due livelli intermedi.
 - Vincoli esterni (di collegamento con il telaio in c.a.) con la sola rotazione secondo Y consentita;

- c)
- Profilati Ω verticali e C orizzontali solo in corrispondenza dei piani.
 - Vincoli esterni (di collegamento con il telaio in c.a.) con la sola rotazione secondo Y consentita alla base mentre in testa è stato consentito anche lo spostamento verticale per la sola condizione di carico statico (aste verticali interamente compresse sotto carichi statici);
- d)
- Profilati Ω verticali e C orizzontali in corrispondenza dei piani e a due livelli intermedi.
 - Vincoli esterni (di collegamento con il telaio in c.a.) con la sola rotazione secondo Y consentita alla base mentre in testa è stato consentito anche lo spostamento verticale per la sola condizione di carico statico (aste verticali interamente compresse sotto carichi statici).
- e)
- Profilati T verticali.
 - Vincoli esterni in testa ai profili a T verticali in modo da consentire lo spostamento verticale sotto carichi statici, mentre al piede gli spostamenti verticali sono sempre impediti.
 - Vincoli esterni sono stati inseriti anche in due nodi lungo lo sviluppo verticale di ciascun profilo in modo da impedire lo spostamento ortogonale al piano della parete.
 - Si considerano i profili vincolati ad una parete costituita da elementi piani di materiale ceramico.

6.2 Analisi e verifiche

6.2.1 Caso 1.a

Il primo sistema che si è deciso di studiare, riportato in Figura 153, è costituito da una struttura metallica in acciaio S275, composta da profilati a spessore sottile formati a freddo (a C orizzontali e a Ω verticali). I pannelli di rivestimento (in ceramica o HPL) sono fissati su profilati a Ω verticali, disposti con interasse pari a 50 cm.

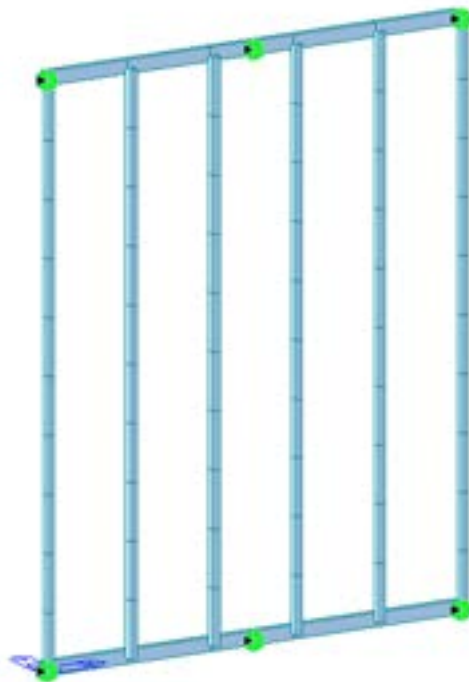


Figura 153. Struttura di supporto dei pannelli di isolamento

Le caratteristiche della sollecitazione massime e minime sono riportate nelle figure da Figura 154 a Figura 159. Sono state considerate due combinazioni di carico, ovvero applicando il sisma con la sua componente più intensa diretta secondo X o secondo Y.

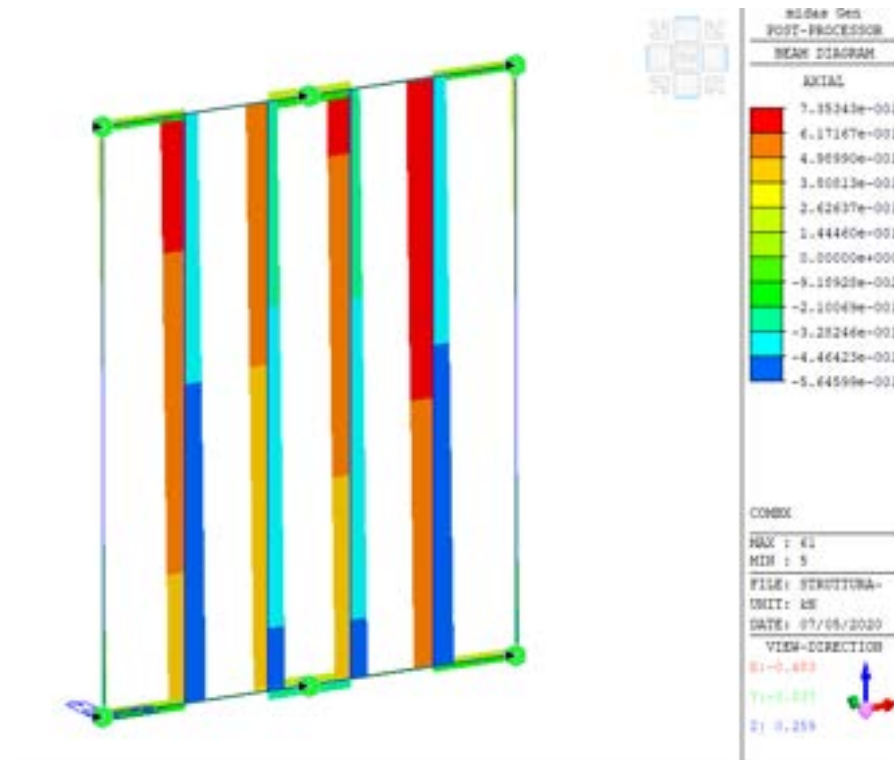


Figura 154. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X

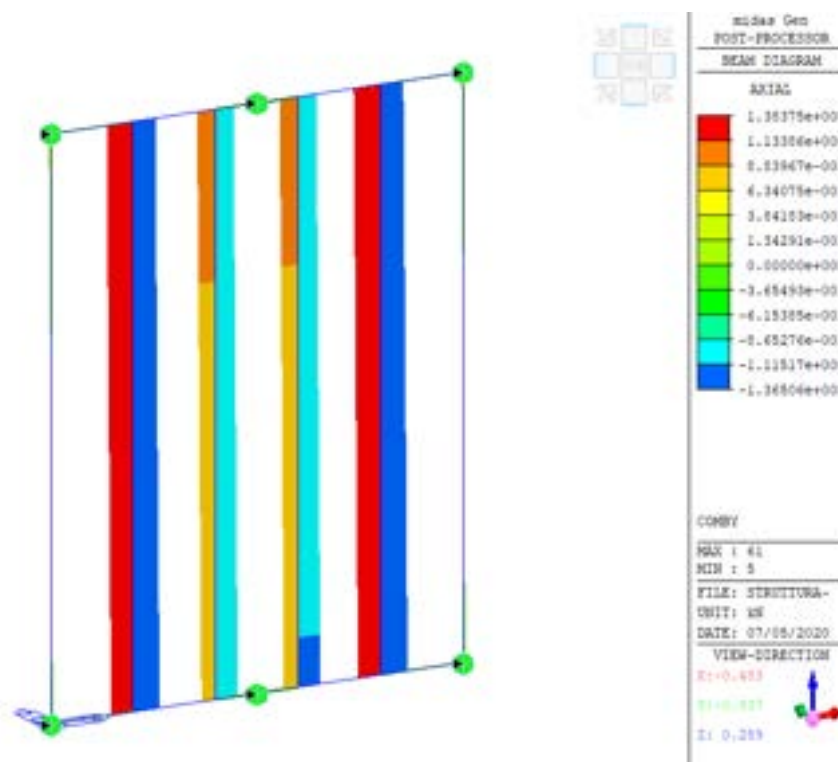


Figura 155. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y

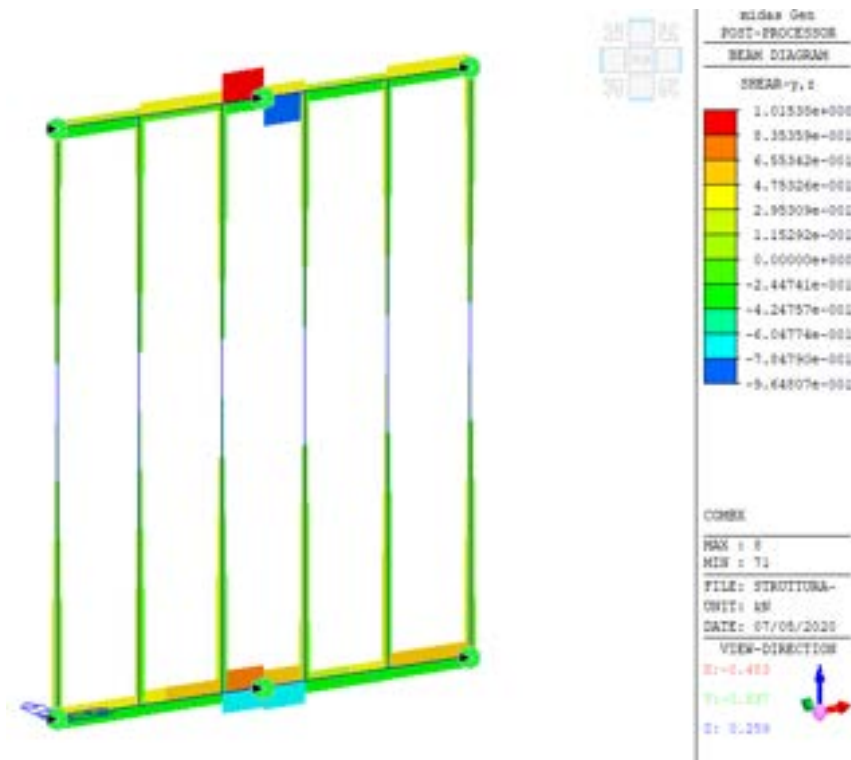


Figura 156. Sforzi di taglio massimo e minimo – Combinazione X

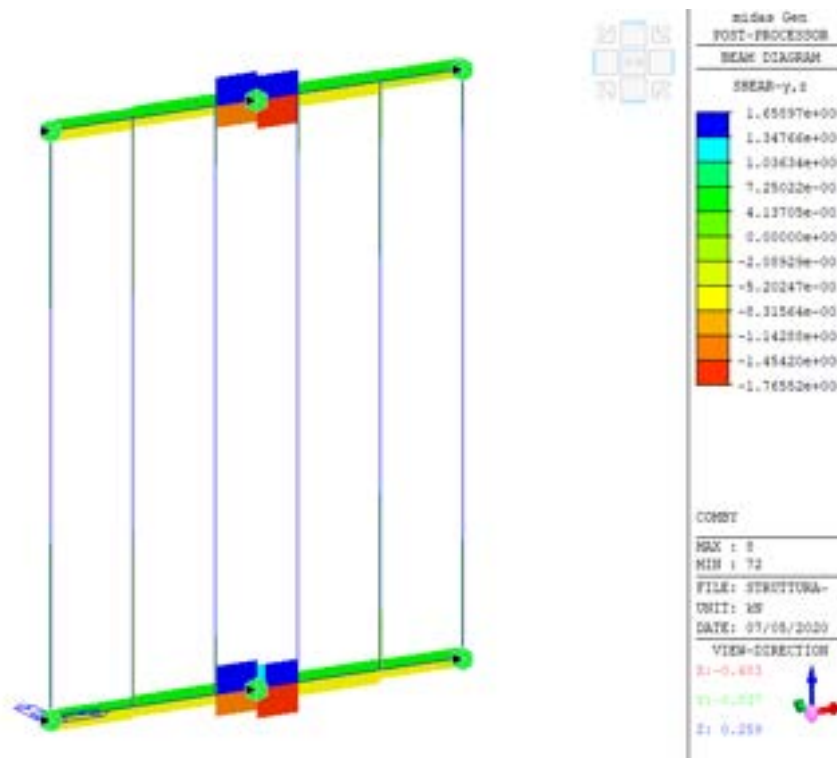


Figura 157. Sforzi di taglio massimo e minimo – Combinazione Y

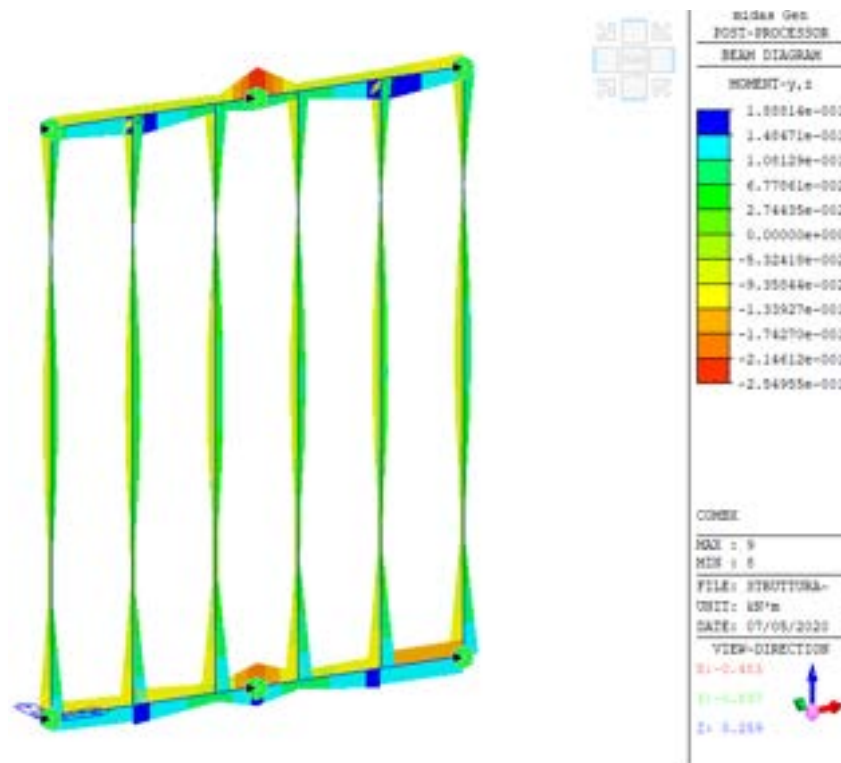


Figura 158. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X

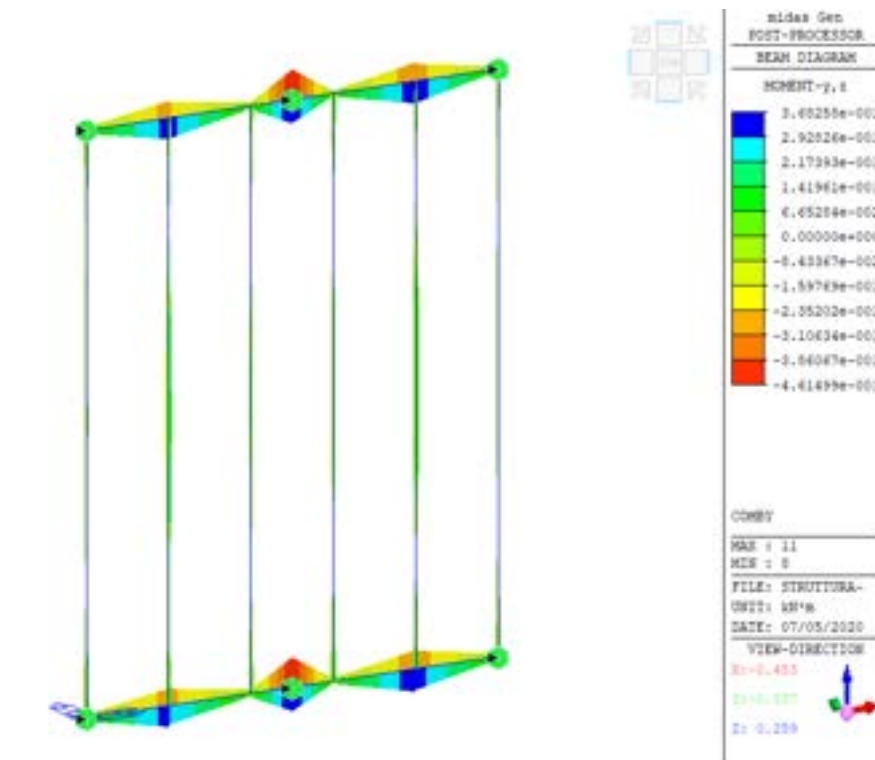
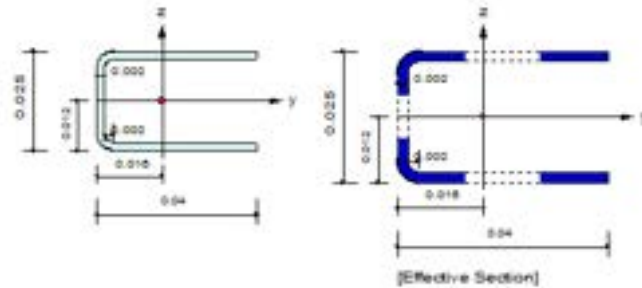


Figura 159. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y

Si riportano di seguito in Figura 160 e Figura 161 le verifiche strutturali, considerando il carico più gravoso, svolte sui profilati metallici con sezione ad omega. Si precisa che la sezione ad omega è stata calcolata senza considerare le due piegature alla base, possibilità non offerta dal programma di calcolo. Tale assunzione è considerata essere a favore di sicurezza. La sezione scelta è una 40x25x2 mm.

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 5
 Material S275 (No:1)
 ($F_y = 275000$, $E_s = 210000000$)
 Section Name OM-40X25X2 (No:3)
 (Built-up Section)
 Member Length : 3.20000



2. Member Forces

Axial Force $F_{ax} = -1.2561$ (LCB: 2-, POS:1/2)
 Bending Moments $M_y = -0.0256$, $M_z = -0.0984$
 End Moments $M_{y1} = -0.0448$, $M_{y2} = -0.0326$ (for Lb)
 $M_{y1} = -0.0448$, $M_{y2} = -0.0326$ (for L_y)
 $M_{z1} = -0.0736$, $M_{z2} = -0.0866$ (for Lz)
 Shear Forces $F_{yy} = 0.17369$ (LCB: 2+, POS:1)
 $F_{zz} = 0.19165$ (LCB: 1+, POS:1)

Depth	0.02800	Thickness	0.00200
Width	0.04000	Rounding	0.00000
Lip Depth	0.00900		
Area	0.00099	Area	0.00004
Cl ₁	0.00039	Cl ₂	0.00000
Cl ₃	0.00000	Cl ₄	0.00000
Y ₁ Cl	0.01547	Y ₂ Cl	0.01290
Y ₃ Cl	0.00000	Y ₄ Cl	0.00000
Y ₅ Cl	0.01088	Y ₆ Cl	0.01278

3. Design Parameters

Unbraced Lengths $L_y = 3.20000$, $L_z = 3.20000$, $L_b = 3.20000$
 Effective Length Factors $K_y = 1.00$, $K_z = 1.00$
 Moment Factor / Bending Coefficient $C_{my} = 0.00$, $C_{mz} = 0.00$, $C_{mLT} = 0.00$

Figura 160. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$$N_{Ed}/N_{C,Rd} = 1.2561/67.1650 = 0.019 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Bending Resistance

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.02560/0.60082 = 0.043 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.02560/0.60082 = 0.043 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.09854/0.46926 = 0.210 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.09854/0.72631 = 0.136 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Shear Resistance

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 0.19165/7.30348 = 0.026 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Combined Ratio

$$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.201 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.275 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000 \dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression)

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 1.25610/4.18041 = 0.300 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Bending)

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.10181/0.28345 = 0.359 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression+Bending)

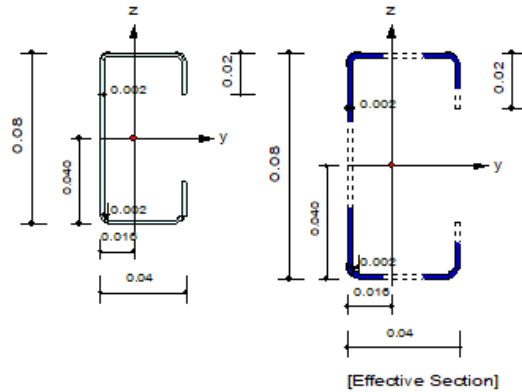
$$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.823 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Figura 161. Verifiche strutturali per la sezione

Per quanto riguarda invece il profilo a C orizzontale, si riportano in Figura 162 e Figura 163 le verifiche strutturali, considerando il carico più gravoso, svolte sui profilati metallici.

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 11
 Material S275 (No:1)
 (Fy = 275000, Es = 210000000)
 Section Name LC-80X40X2 (No:1)
 (Rolled : LC-80X40X2).
 Member Length : 0.25000



2. Member Forces

Axial Force Fxx = -0.0738 (LCB: 2-, POS:J)
 Bending Moments My = -0.4584, Mz = -0.0336
 End Moments Myi = -0.0656, Myj = -0.4584 (for Lb)
 Myi = -0.0656, Myj = -0.4584 (for Ly)
 Mzi = -0.0034, Mzj = -0.0336 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = -0.1456 (LCB: 2-, POS:1/2)
 Fzz = 1.65240 (LCB: 2+, POS:J)

Depth	0.08000	Thickness	0.00200
Width	0.04000	Rounding	0.00200
Lip Depth	0.02000		
Area	0.00037	Asz	0.00022
Cyb	0.00270	Czb	0.00000
Iyy	0.00000	Izz	0.00000
Ybar	0.01593	Zbar	0.04000
Syy	0.00001	Szz	0.00000
ry	0.03115	rz	0.01509

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 0.25000, Lz = 0.25000, Lb = 0.25000
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient Cmy = 0.00, Cmz = 0.00, CmLT = 0.00

Figura 162. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$$N_{Ed}/N_{C,Rd} = 0.074/118.480 = 0.001 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Bending Resistance

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.45850/2.66185 = 0.172 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.45850/2.91823 = 0.157 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.03365/1.28739 = 0.026 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.03365/1.97495 = 0.017 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Shear Resistance

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 1.6524/24.7683 = 0.067 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Combined Ratio

$$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.175 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.199 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd}) \cdot ((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000 \dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression)

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0.074/101.885 = 0.001 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Bending)

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.45974/2.45814 = 0.187 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression+Bending)

$$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.265 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Figura 163. Verifiche strutturali per la sezione

La struttura è stata nuovamente analizzata e verificata considerando i profili in alluminio 3003-H18. In questo caso i profili ottenuti sono 45x30x3 mm per le aste verticali e 80x40x2 mm per quelle orizzontali. Mettendo a confronto le due soluzioni, emerge un utilizzo di 43kg di acciaio nel primo caso e di 23 kg di alluminio nel secondo.

6.2.2 Caso 1.b

Le analisi e le verifiche strutturali sono state effettuate anche considerando la presenza di collegamenti orizzontali, come indicato in Figura 164, vincolando la struttura solo al piede ed in testa al telaio in c.a. Anche in questo caso sono state considerate due combinazioni di carico, ovvero il sistema è stato applicato con la sua componente più intensa diretta secondo X o secondo Y.



Figura 164. Struttura con collegamenti orizzontali

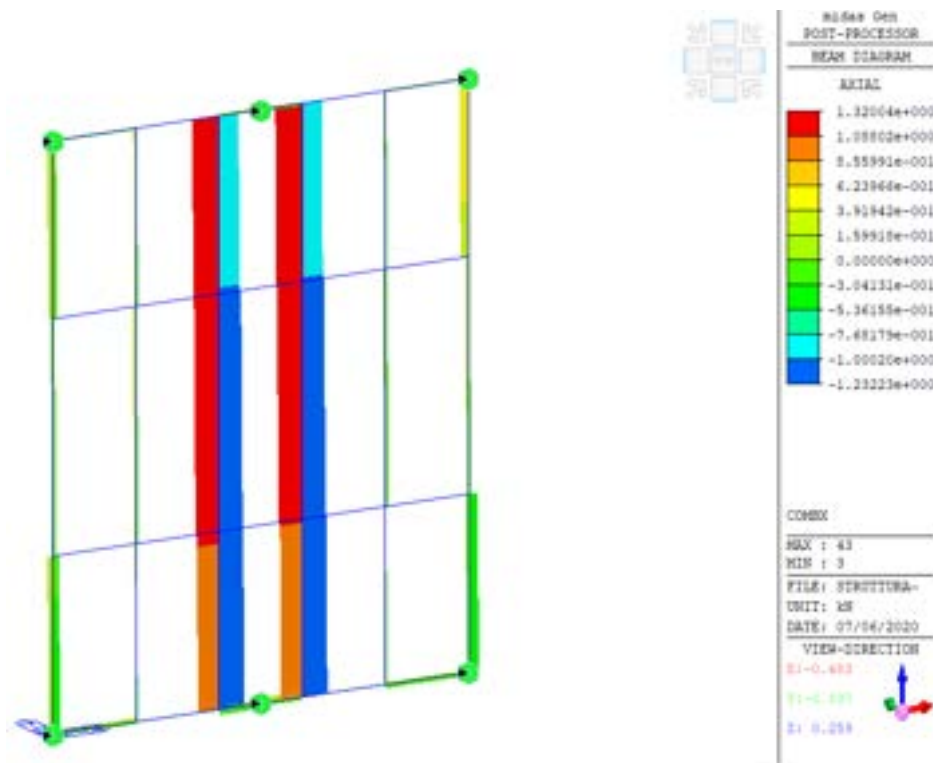


Figura 165. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X

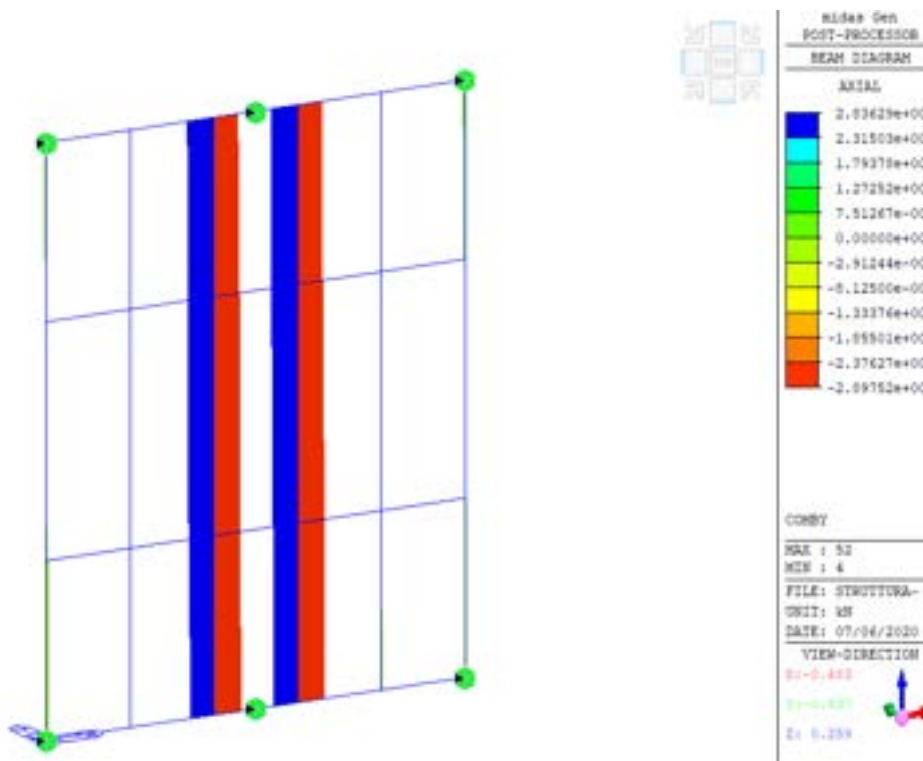


Figura 166. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y

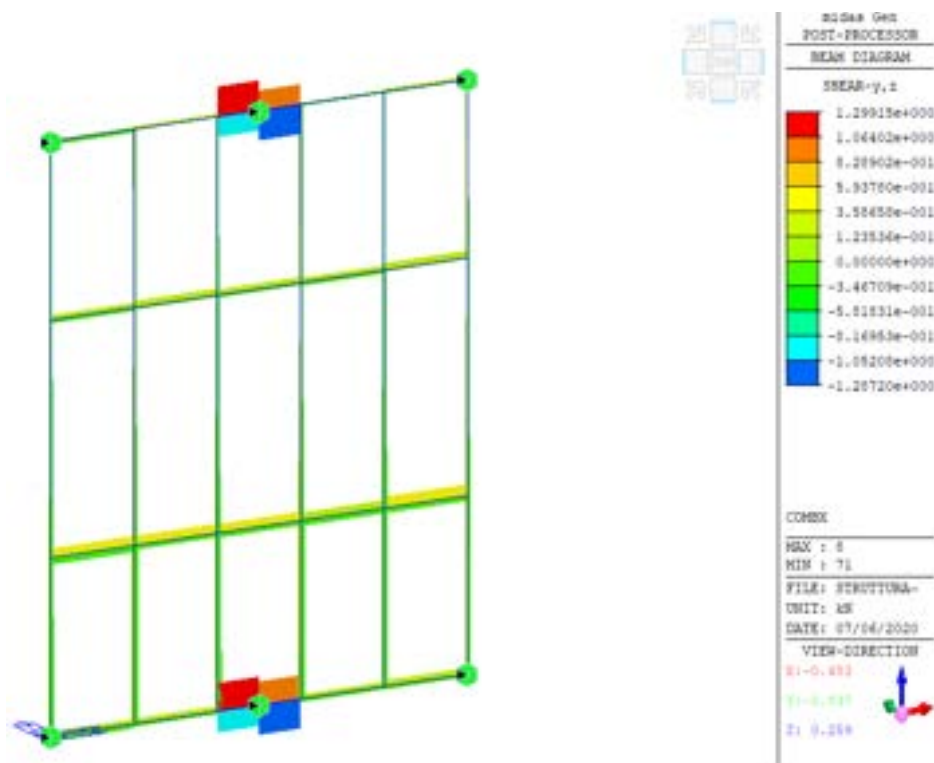


Figura 167. Tagli massimo e minimo – Combinazione X

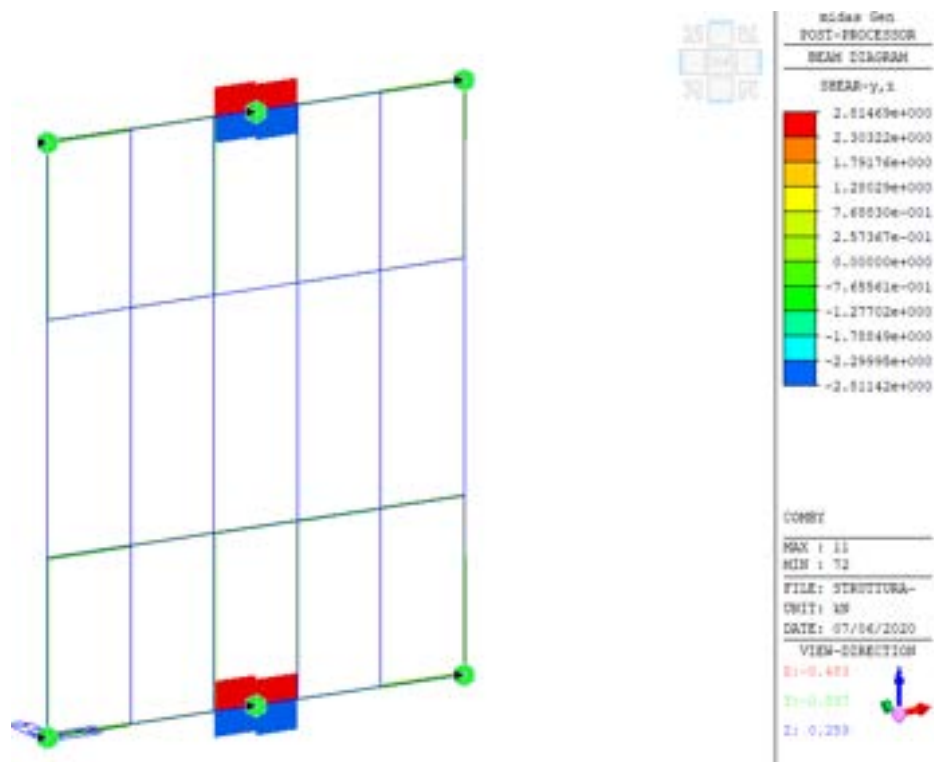


Figura 168. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y

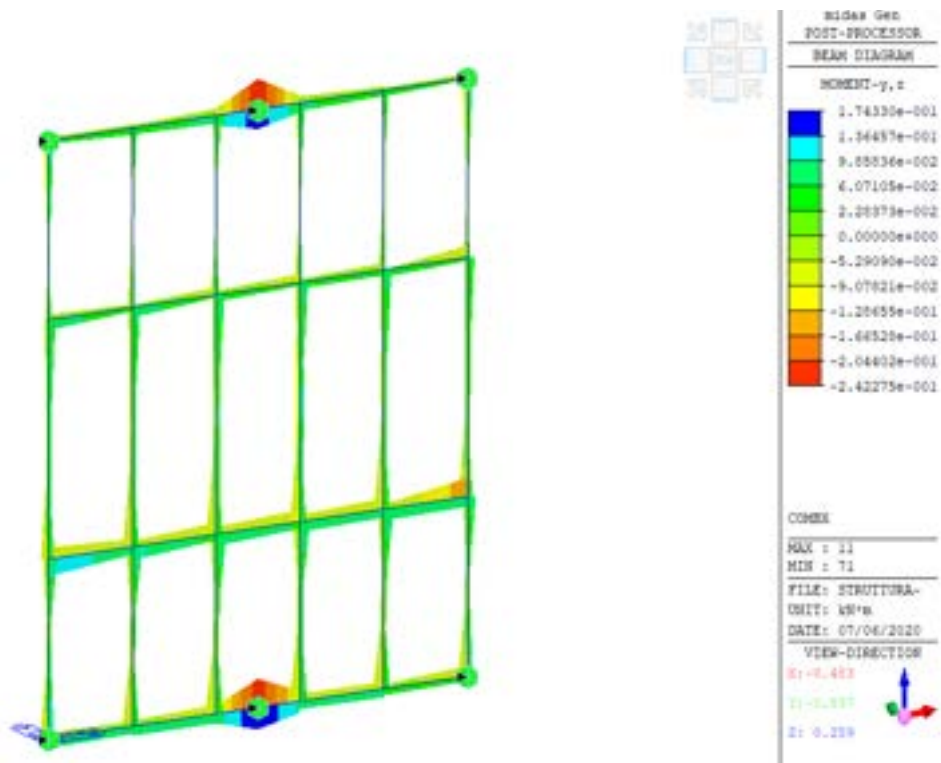


Figura 169. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X

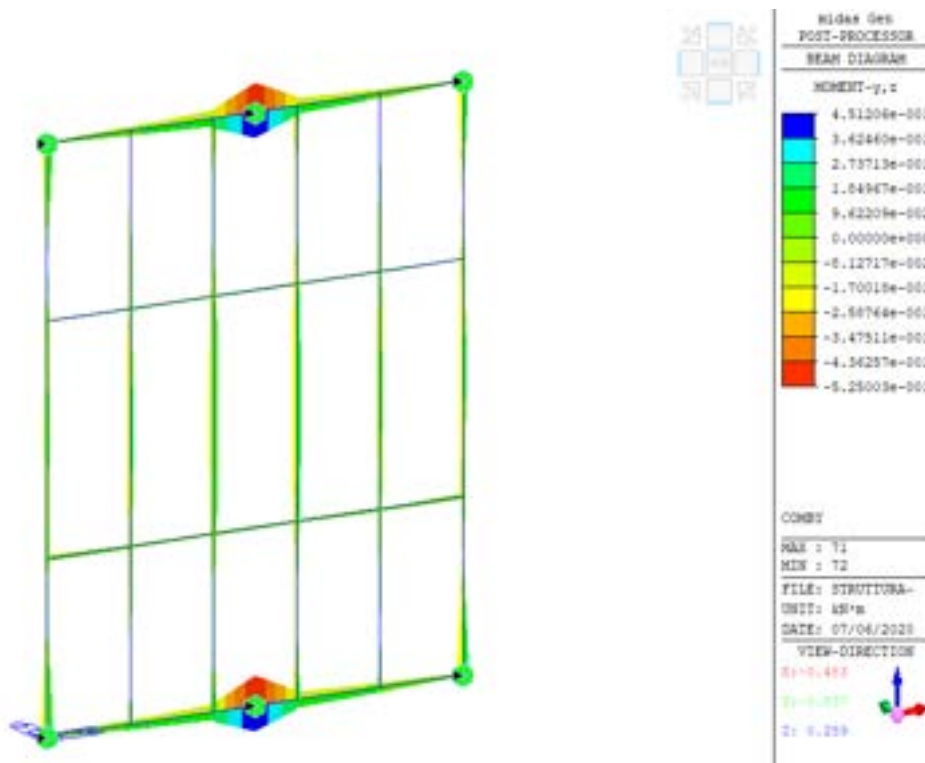
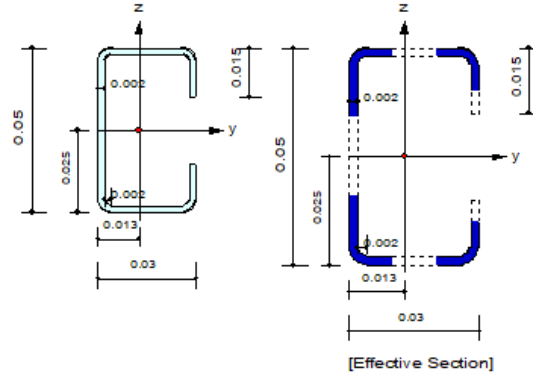


Figura 170. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y

Le verifiche strutturali per le condizioni di carico più severe sono riportate nelle figure da Figura 171 a Figura 174. I profili orizzontali utilizzati sono 50x30x2 mm, mentre i profili verticali sono 40x25x1.5 mm. Il peso dell'acciaio utilizzato è pari a circa 42 kg.

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 11
 Material S275 (No:1)
 (Fy = 275000, Es = 210000000)
 Section Name LC-50X30X2 (No:1)
 (Rolled : LC-50X30X2).
 Member Length : 0.25000



2. Member Forces

Axial Force Fxx = -0.0895 (LCB: 2-, POS:J)
 Bending Moments My = -0.5250, Mz = -0.0487
 End Moments Myi = -0.1574, Myj = -0.5250 (for Lb)
 Myi = -0.1574, Myj = -0.5250 (for Ly)
 Mzi = -0.0146, Mzj = -0.0487 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = -0.2635 (LCB: 2-, POS:1/2)
 Fzz = 2.81469 (LCB: 2+, POS:J)

Depth	0.05000	Thickness	0.00200
Width	0.03000	Rounding	0.00200
Lip Depth	0.01500		
Area	0.00025	Asz	0.00014
Oyb	0.00113	Ozb	0.00030
Iyy	0.00000	Izz	0.00000
Ybar	0.01279	Zbar	0.02500
Syy	0.00000	Szz	0.00000
ry	0.01924	rz	0.01154

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 0.25000, Lz = 0.25000, Lb = 0.25000
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient Cmy = 0.00, Cmz = 0.00, CmLT = 0.00

Figura 171. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance
 $N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.0895/85.4800 = 0.001 < 1.000$ O.K

Bending Resistance
 $M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.52500/1.35020 = 0.389 < 1.000$ O.K
 $M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.52500/1.35020 = 0.389 < 1.000$ O.K
 $M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.04873/0.72249 = 0.067 < 1.000$ O.K
 $M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.04873/0.98052 = 0.050 < 1.000$ O.K

Shear Resistance
 $V_{Ed}/V_{Rd} = 2.8147/15.2420 = 0.185 < 1.000$ O.K

Combined Ratio
 $R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.440 < 1.000$ O.K
 $R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.457 < 1.000$ O.K
 $R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000$.. O.K

Buckling Resistance (Compression)
 $N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0.0895/71.3943 = 0.001 < 1.000$ O.K

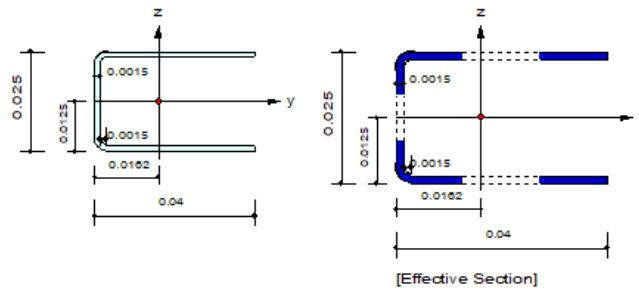
Buckling Resistance (Bending)
 $M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.52726/1.17144 = 0.450 < 1.000$ O.K

Buckling Resistance (Compression+Bending)
 $R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.533 < 1.000$ O.K

Figura 172. Verifiche strutturali per la sezione

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 46
 Material S275 (No:1)
 (Fy = 275000, Es = 210000000)
 Section Name OM-40X25X1.5 (No:3)
 (Built-up Section).
 Member Length : 1.28000



2. Member Forces

Axial Force Fxx = -2.7975 (LCB: 2-, POS:1/2)
 Bending Moments My = -0.0052, Mz = -0.1452
 End Moments Myi = -0.0294, Myj = -0.0172 (for Ly)
 Myi = -0.0294, Myj = -0.0172 (for Ly)
 Mzi = -0.0946, Mzj = -0.0953 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = 0.11709 (LCB: 2+, POS:I)
 Fzz = -0.1666 (LCB: 1-, POS:I)

Depth	0.02500	Thickness	0.00150
Width	0.04000	Rounding	0.00150
Lip Depth	0.00000		
Area	0.00015	Asz	0.00003
Cyb	0.00052	Czb	0.00020
Iyy	0.00000	Izz	0.00000
Yber	0.01615	Zber	0.01250
Syy	0.00000	Szz	0.00000
ry	0.01079	rz	0.01287

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 1.28000, Lz = 1.28000, Lb = 1.28000
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient Cmy = 0.00, Cmz = 0.00, CmLT = 0.00

Figura 173. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 2.7975/49.3200 = 0.057 < 1.000$ O.K

Bending Resistance

$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.00519/0.45758 = 0.011 < 1.000$ O.K

$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.00519/0.45758 = 0.011 < 1.000$ O.K

$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.14570/0.33983 = 0.429 < 1.000$ O.K

$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.14570/0.53753 = 0.271 < 1.000$ O.K

Shear Resistance

$V_{Ed}/V_{Rd} = 0.16658/5.59669 = 0.030 < 1.000$ O.K

Combined Ratio

$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.349 < 1.000$ O.K

$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.507 < 1.000$ O.K

$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})((2V_{Ed}/V_w/R_d) - 1)^2 = 0.000 < 1.000$.. O.K

Buckling Resistance (Compression)

$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 2.7975/11.2312 = 0.249 < 1.000$ O.K

Buckling Resistance (Bending)

$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.14580/0.31645 = 0.461 < 1.000$ O.K

Buckling Resistance (Compression+Bending)

$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.867 < 1.000$ O.K

Figura 174. Verifiche strutturali per la sezione

6.2.3 Caso 1.c

La soluzione 1.c descritta in questo paragrafo differisce dalla 1.a poiché i vincoli alla traslazione verticale sono posizionati solo alla base e dunque in questo modello le aste verticali risultano interamente compresse sotto i carichi statici. Anche in questo caso, come in precedenza, sono state considerate due combinazioni di carico, ovvero il sisma è stato applicato con la sua componente più intensa diretta secondo X o secondo Y.

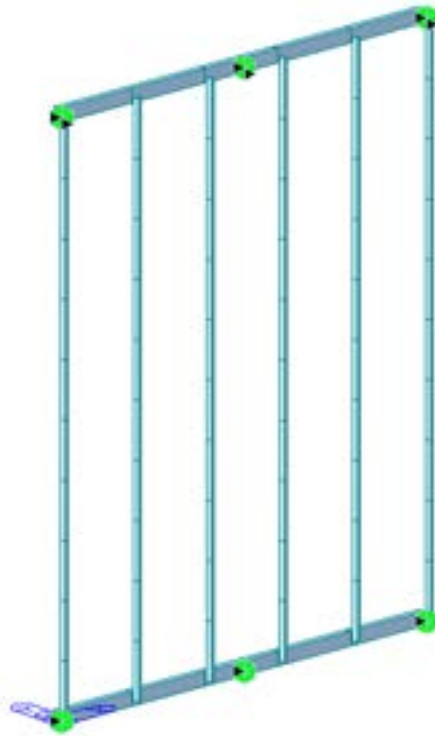


Figura 175. Struttura con collegamenti verticali

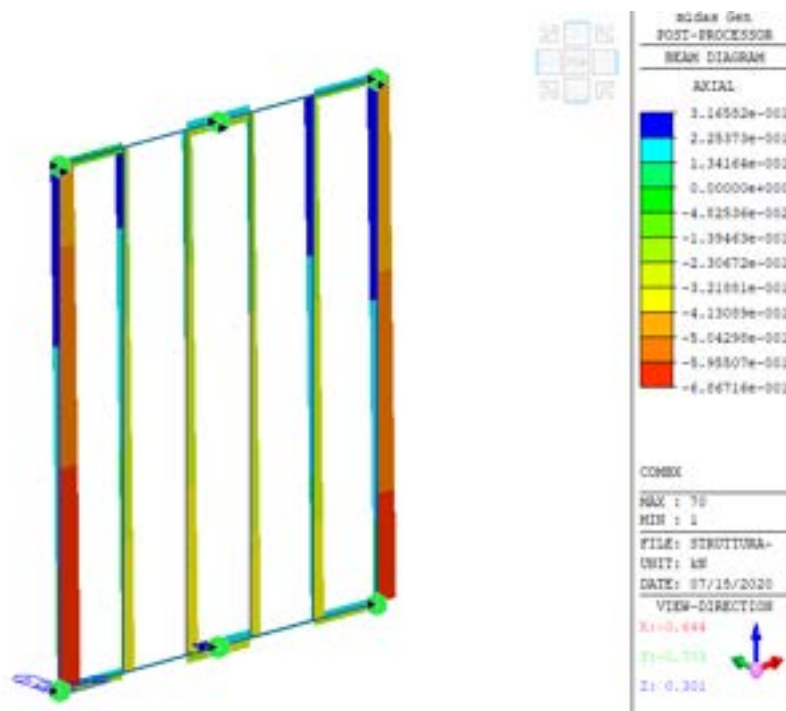


Figura 176. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X

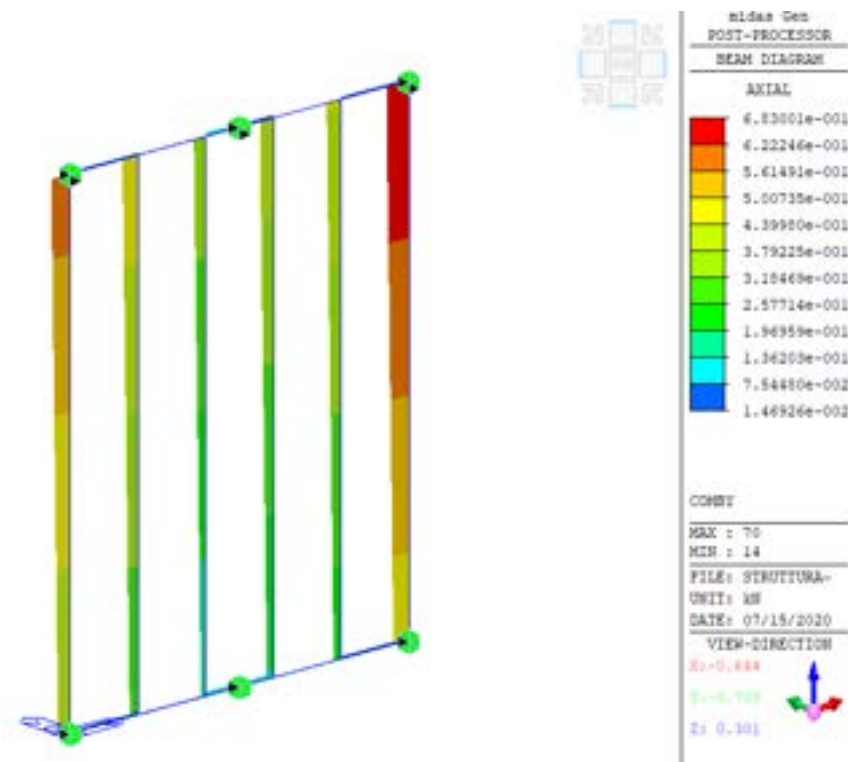


Figura 177. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y

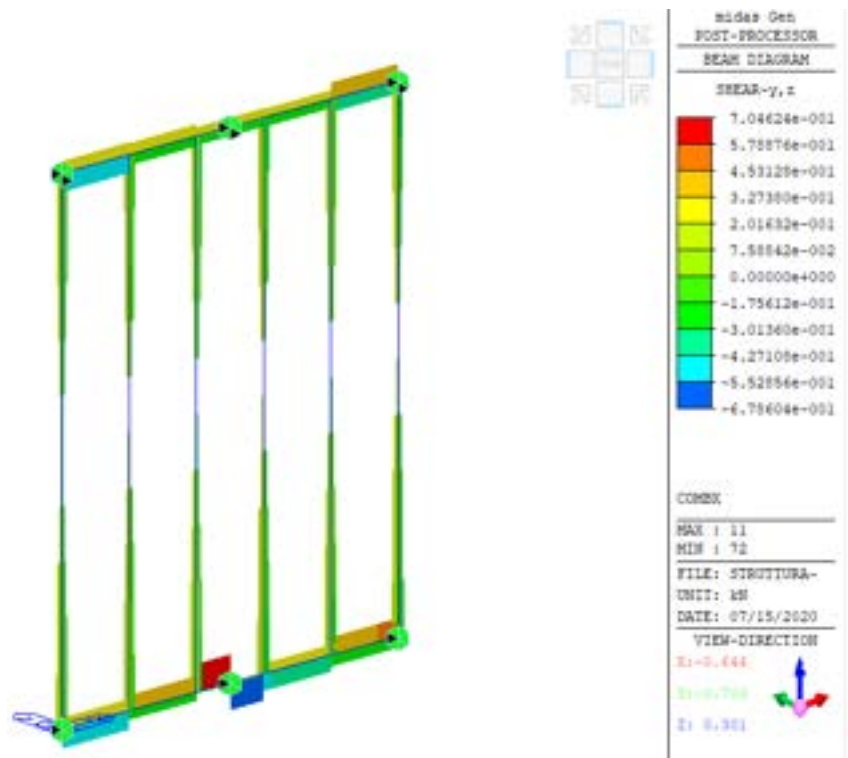


Figura 178. Tagli massimo e minimo – Combinazione X

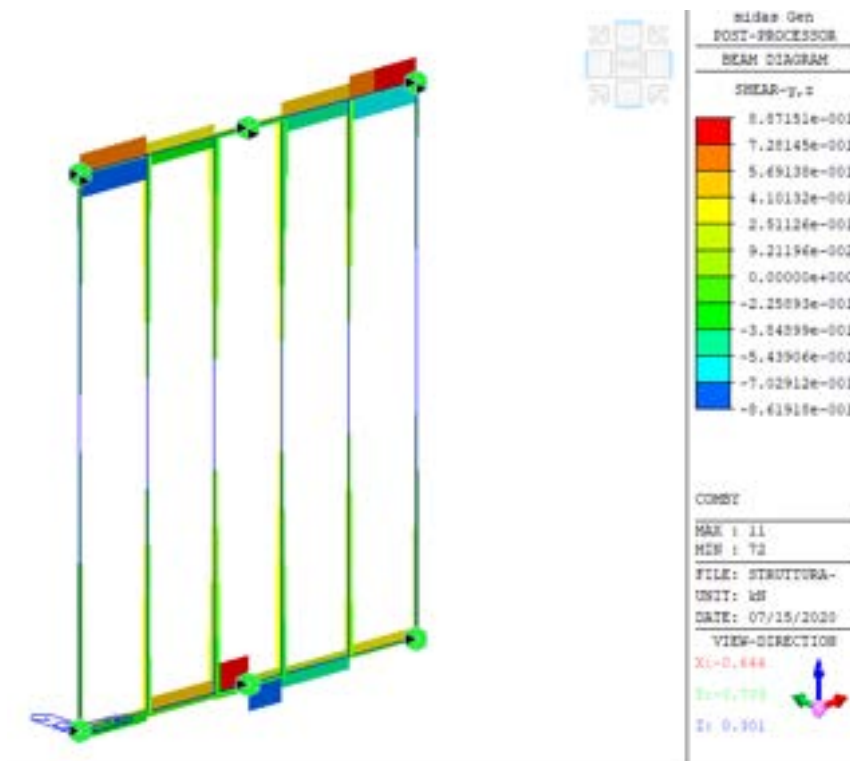


Figura 179. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y

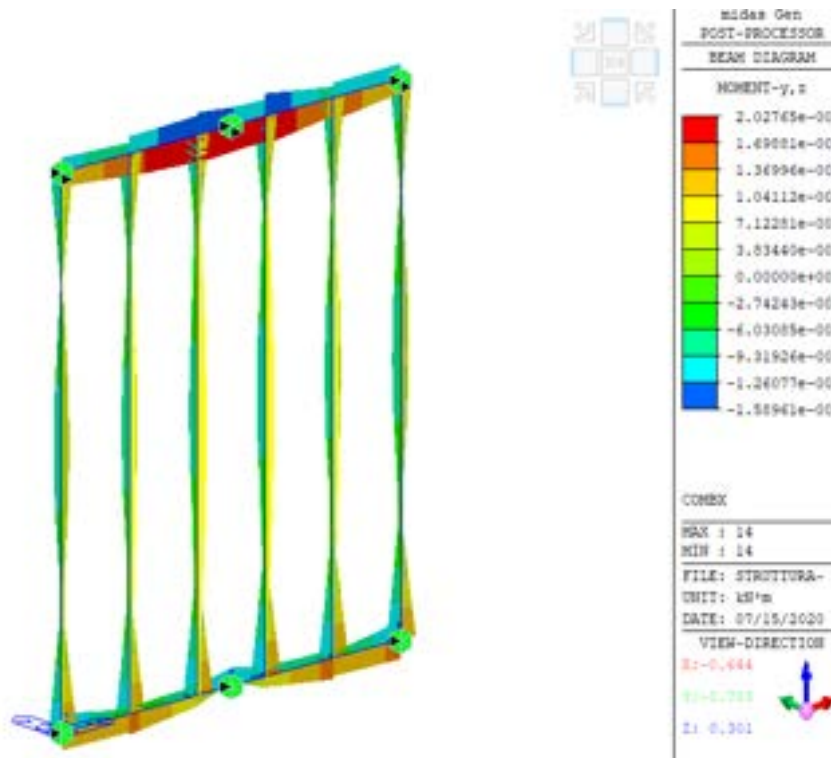


Figura 180. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X

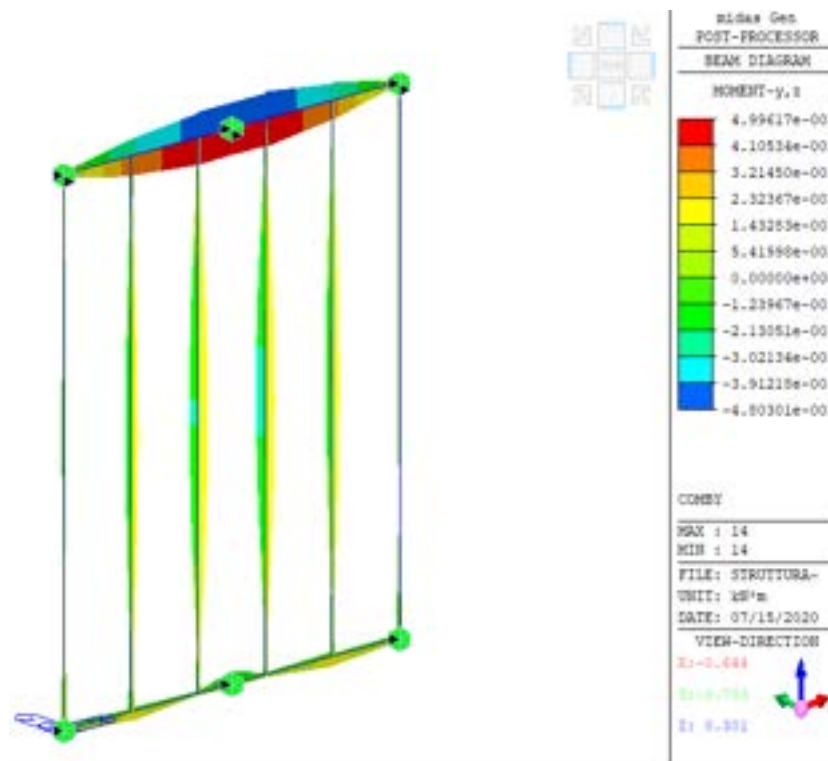


Figura 181. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y

Le verifiche risultano soddisfatte per gli stessi profili utilizzati per il caso 1.b. I profili utilizzati sono 50x30x2, orizzontali, e 40x25x1.5 verticali. Il peso dell'acciaio utilizzato è pari circa 42 kg.

6.2.4 Caso 2.a

Nel caso 2.a descritto in questa sezione i vincoli sono localizzati nei punti indicati in verde nella Figura 182 e sono tali da consentire solo la rotazione secondo Y.

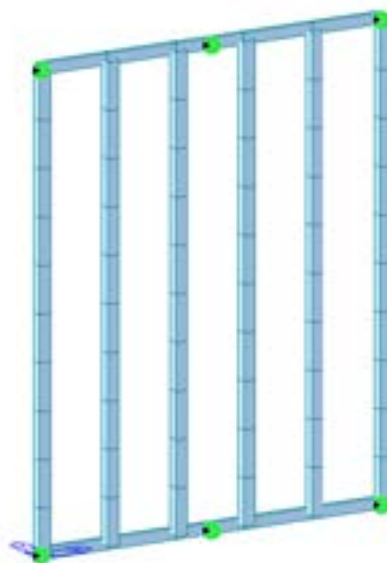


Figura 182. Struttura di supporto dei pannelli di isolamento

Le caratteristiche della sollecitazione massime e minime sono riportate nelle figure da Figura 183 a Figura 188. Sono state considerate due combinazioni di carico, con componente maggiore del sisma secondo X o secondo Y.

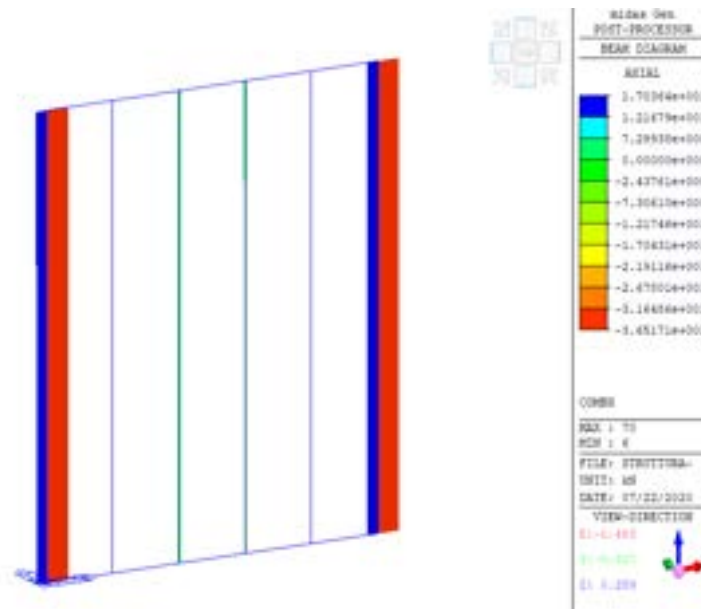


Figura 183. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X

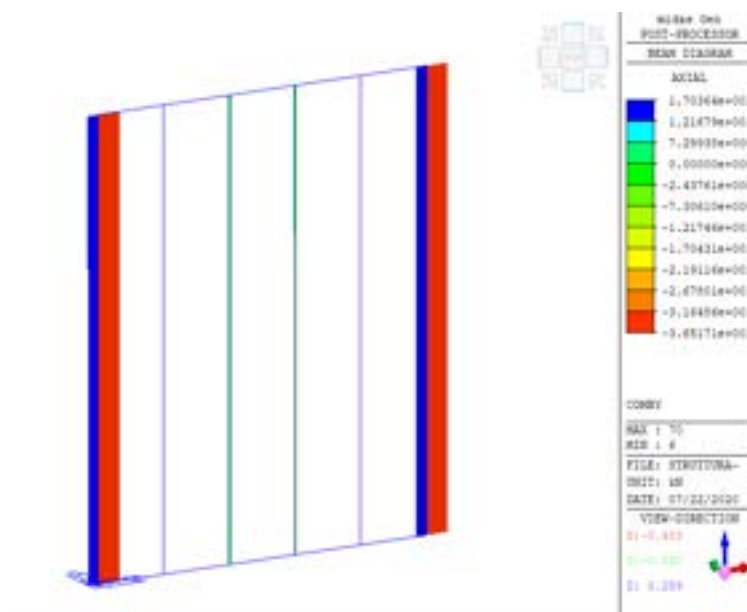


Figura 184. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y

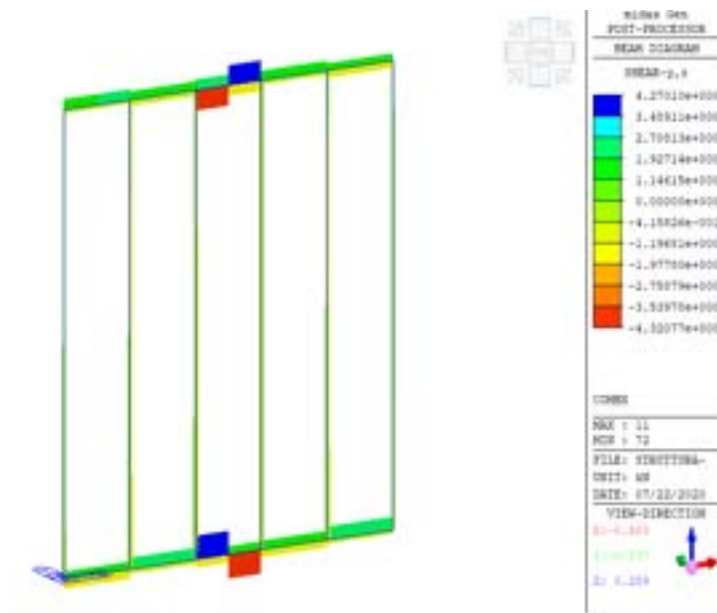


Figura 185. Sforzi di taglio massimo e minimo – Combinazione X

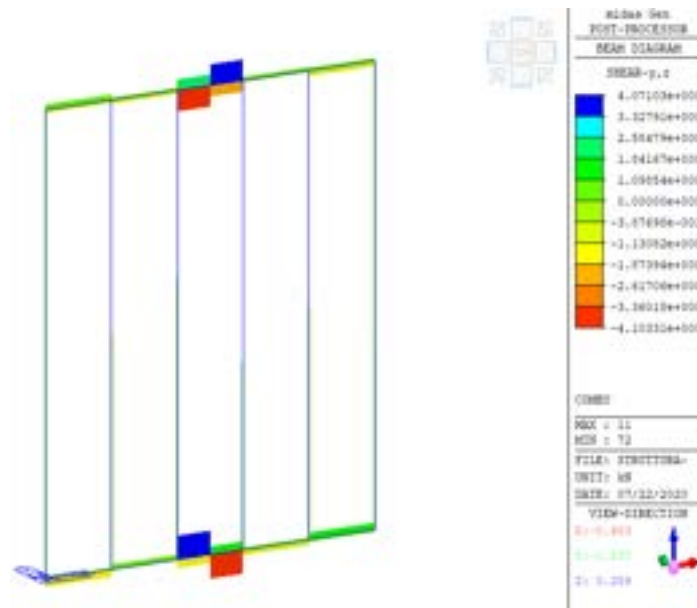


Figura 186. Sforzi di taglio massimo e minimo – Combinazione Y

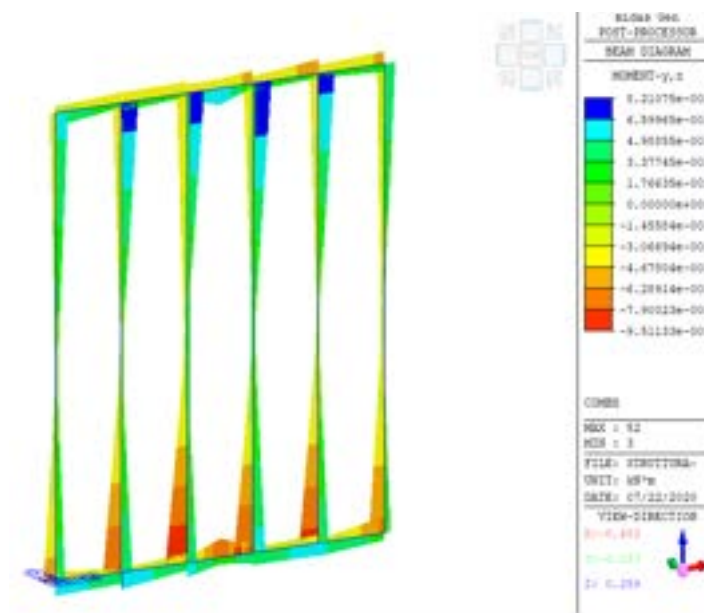


Figura 187. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X

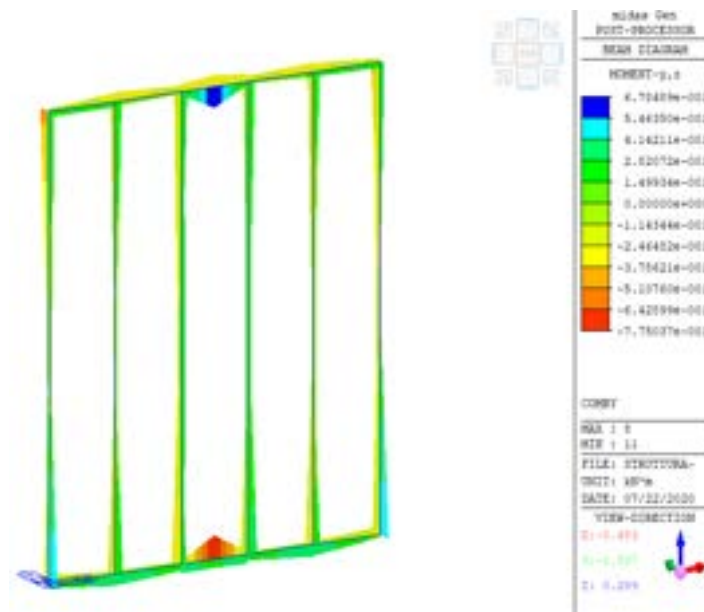
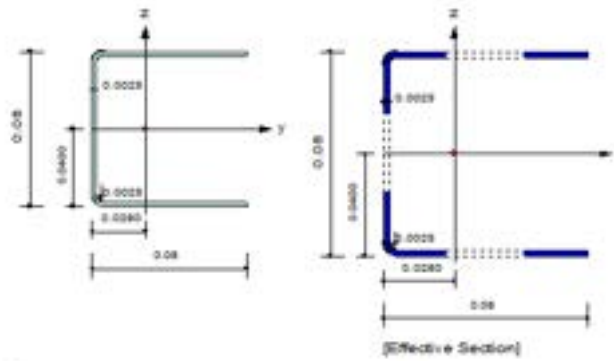


Figura 188. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y

La sezione ad omega è stata verificata senza considerare le due piegature alla base, possibilità non offerta dal programma di calcolo. La verifica di instabilità condiziona la scelta della sezione per i profili verticali, che risulta relativamente grande del tipo 80x80x2.5 mm con l'uso di acciaio S355. Si riportano in Figura 190 e Figura 192 le verifiche strutturali per tale sezione.

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 6
 Material S355 (No 1)
 ($F_y = 355000$, $E_s = 210000000$)
 Section Name CM-80X80X2.5 (No 3)
 (Built-up Section)
 Member Length 3.20000



2. Member Forces

Axial Force $F_{ax} = -36.517$ (LCB: 1-, POS:1)
 Bending Moments $M_y = -0.6696$, $M_z = -0.1494$
 End Moments $M_{y1} = -0.6696$, $M_{y2} = -0.3043$ (for L_b)
 $M_{y1} = -0.6696$, $M_{y2} = -0.3043$ (for L_y)
 $M_{z1} = -0.1494$, $M_{z2} = -0.1686$ (for L_z)
 Shear Forces $F_{yy} = 0.33916$ (LCB: 2+, POS:3/4)
 $F_{zz} = -0.4388$ (LCB: 1-, POS:1)

Depth	0.08000	Thickness	0.00250
Web	0.08000	Flanging	0.00250
Lip Depth	0.00800		
Area	0.00098	Area	0.00019
Out	0.00374	Out	0.00198
In	0.00000	In	0.00000
Ybar	0.02851	Zbar	0.04000
Iyy	0.00002	Izz	0.00001
Iy	0.03413	Iz	0.00624

3. Design Parameters

Unbraced Lengths $L_y = 3.20000$, $L_z = 3.20000$, $L_b = 3.20000$
 Effective Length Factors $K_y = 1.00$, $K_z = 1.00$
 Moment Factor / Bending Coefficient $C_{my} = 0.00$, $C_{mz} = 0.00$, $C_{mLT} = 0.00$

Figura 189. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$$N_{Ed}/N_{C,Rd} = 36.517/232.187 = 0.157 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Bending Resistance

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.6696/6.74116 = 0.099 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.6696/6.74116 = 0.099 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.16268/3.02144 = 0.054 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.16268/5.97822 = 0.027 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Shear Resistance

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 0.4388/39.7109 = 0.011 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Combined Ratio

$$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.303 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.330 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd}) \cdot ((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000 \dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression)

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 36.517/53.3995 = 0.684 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Bending)

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.68908/3.83718 = 0.180 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression+Bending)

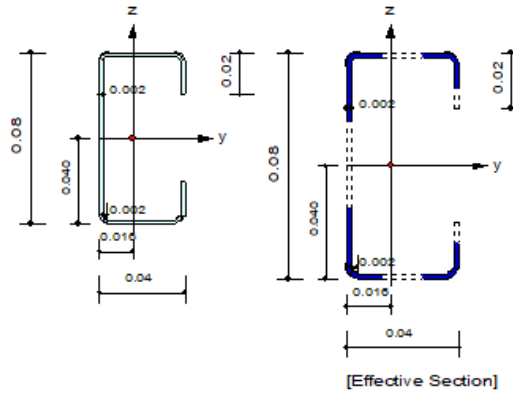
$$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.991 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Figura 190. Verifiche strutturali per la sezione

Per quanto riguarda invece la sezione a C dei profili orizzontali, Figura 132 e Figura 133 riportano le verifiche strutturali eseguite su una sezione del tipo 80x40x2 mm.

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 11
 Material S355 (No:1)
 (Fy = 355000, Es = 210000000)
 Section Name LC-80X40X2 (No:1)
 (Rolled : LC-80X40X2).
 Member Length : 0.25000



2. Member Forces

Axial Force Fxx = -0.7190 (LCB: 1-, POS:J)
 Bending Moments My = -0.7454, Mz = -0.0149
 End Moments Myi = -0.1741, Myj = -0.7454 (for Lb)
 Myi = -0.1741, Myj = -0.7454 (for Ly)
 Mzi = -0.0187, Mzj = -0.0149 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = -0.1656 (LCB: 2-, POS:1/2)
 Fzz = 4.27010 (LCB: 1+, POS:J)

Depth	0.08000	Thickness	0.00200
Width	0.04000	Rounding	0.00200
Lip Depth	0.02000		
Area	0.00037	Asz	0.00022
Cyb	0.00270	Czb	0.00000
Iyy	0.00000	Izz	0.00000
Ybar	0.01593	Zbar	0.04000
Syy	0.00001	Szz	0.00000
ry	0.03115	rz	0.01509

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 0.25000, Lz = 0.25000, Lb = 0.25000
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient Cmy = 0.00, Cmz = 0.00, CmLT = 0.00

Figura 191. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance
 $N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.719/151.440 = 0.005 < 1.000$ O.K

Bending Resistance
 $M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.75114/2.17839 = 0.345 < 1.000$ O.K
 $M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.75114/3.29685 = 0.228 < 1.000$ O.K
 $M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.01535/1.49093 = 0.010 < 1.000$ O.K
 $M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.01535/2.45882 = 0.006 < 1.000$ O.K

Shear Resistance
 $V_{Ed}/V_{Rd} = 4.2701/31.9737 = 0.134 < 1.000$ O.K

Combined Ratio
 $R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.240 < 1.000$ O.K
 $R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.361 < 1.000$ O.K
 $R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd}) / ((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000$.. O.K

Buckling Resistance (Compression)
 $N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0.719/114.077 = 0.006 < 1.000$ O.K

Buckling Resistance (Bending)
 $M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.75130/2.03806 = 0.369 < 1.000$ O.K

Buckling Resistance (Compression+Bending)
 $R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.467 < 1.000$ O.K

Figura 192. Verifiche strutturali per la sezione

Si osserva che il rispetto delle verifiche alla instabilità delle aste porta ad ottenere dei profili metallici con dimensioni in sezione relativamente grandi, che portano ad ottenere un peso di circa 100 kg. Inoltre in questo caso è stato utilizzato un acciaio S355.

6.2.5 Caso 2.b

In questa sezione viene studiata la configurazione descritta al paragrafo precedente, ma con l'aggiunta dei collegamenti orizzontali, come indicato in Figura 193.



Figura 193. Struttura con collegamenti orizzontali

Le caratteristiche della sollecitazione massime e minime ottenute dalle analisi numeriche sono riportate nelle figure da Figura 194 a Figura 199. Coerentemente con quanto descritto in precedenza, sono state considerate due combinazioni di carico, con componente maggiore del sisma secondo X o secondo Y.

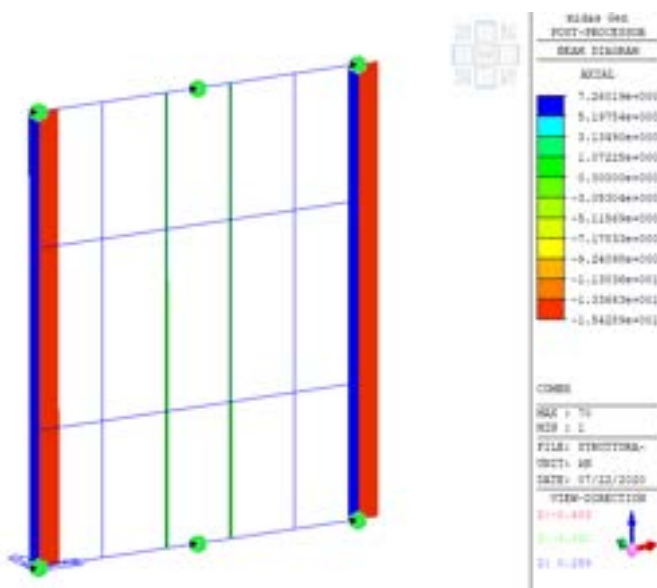


Figura 194. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X

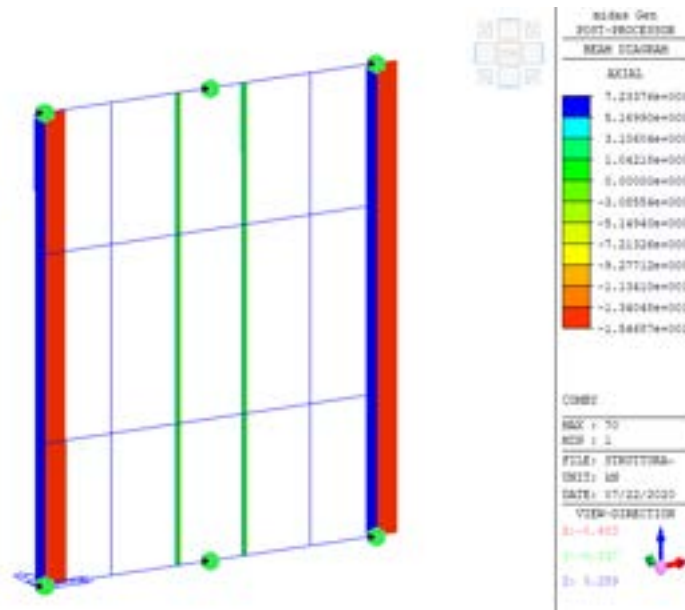


Figura 195. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y

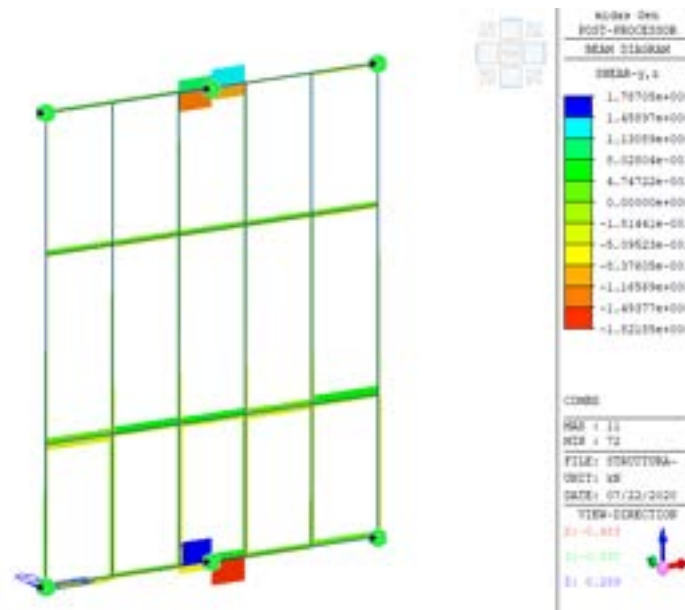


Figura 196. Tagli massimo e minimo – Combinazione X

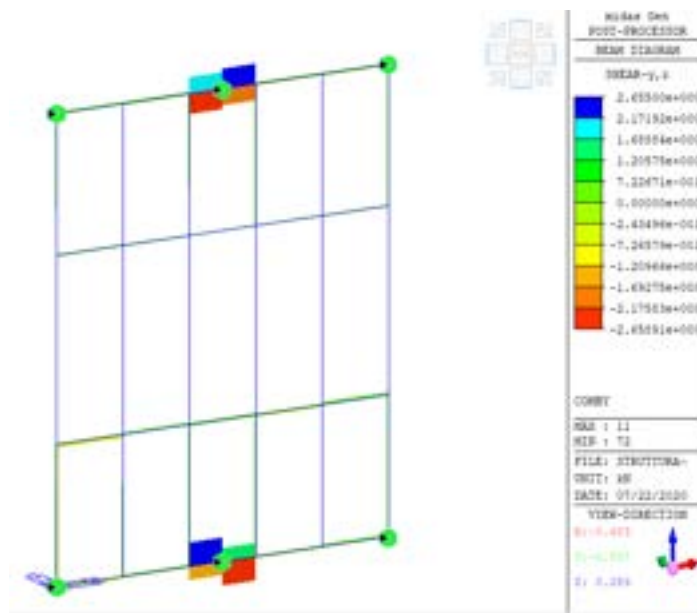


Figura 197. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y

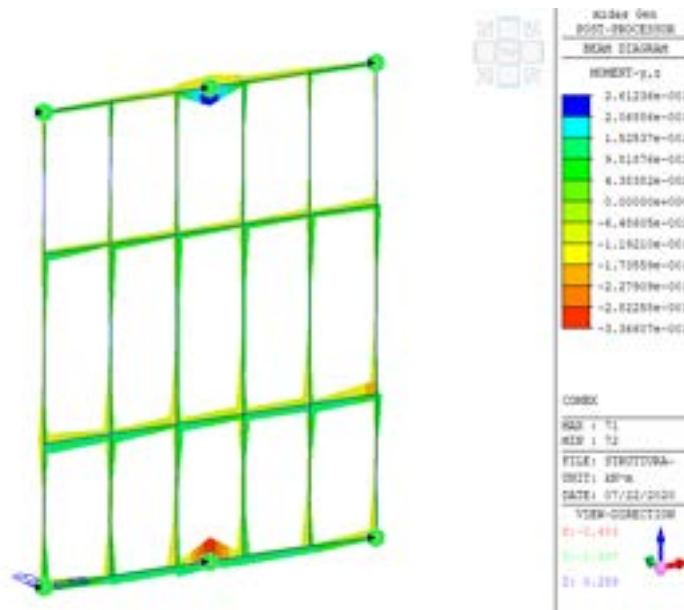


Figura 198. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X

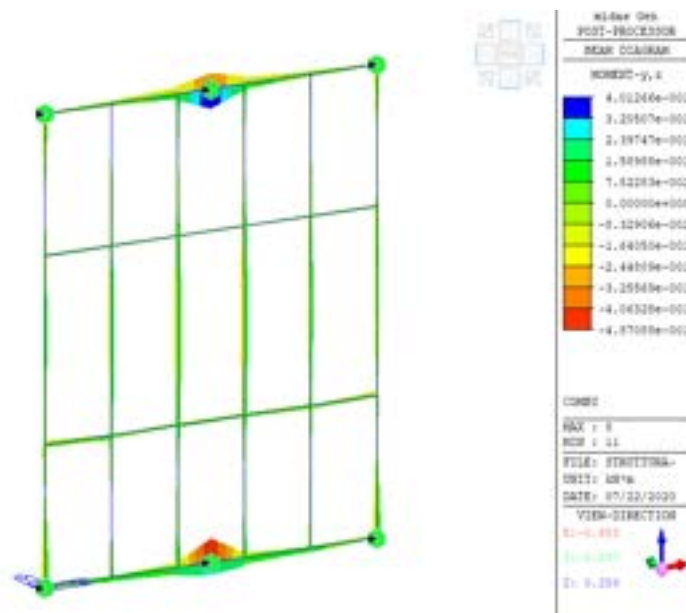
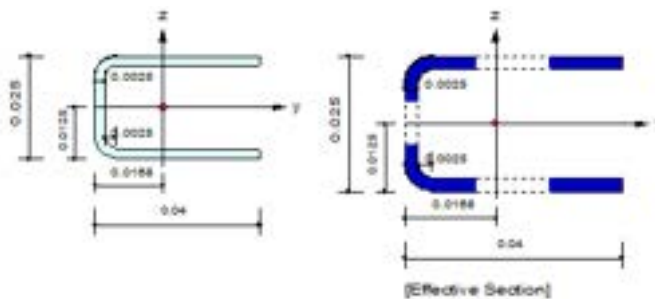


Figura 199. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y

Le verifiche per le combinazioni di carico più gravose sono riportate di seguito. In particolare, le verifiche per i profili verticali a Ω 40x25x2.5 mm sono riportate in Figura 200 e Figura 201, mentre le verifiche per i profili orizzontali a C 50x30x2 mm sono riportate in Figura 202 e Figura 203. L'acciaio considerato è del tipo S275 e il peso totale del sistema che ne risulta è pari a circa 55.29 kg.

1. Design Information

Design Code	Eurocode3-1-3.06
Unit System	kN, m
Member No	6
Material	S275 (No:1) ($F_y = 275000$, $E_s = 210000000$)
Section Name	OM-40X25X2.5 (No:3) (Built-up Section)
Member Length	: 0.96000



2. Member Forces

Axial Force	$F_{xx} = -15.319$ (LCB: 2-, POS:1)
Bending Moments	$M_y = -0.0588$, $M_z = -0.1942$
End Moments	$M_{yi} = -0.0588$, $M_{yj} = -0.0077$ (for L_b) $M_{yi} = -0.0588$, $M_{yj} = -0.0077$ (for L_y) $M_{zi} = -0.1942$, $M_{zj} = -0.0409$ (for L_z)
Shear Forces	$F_{yy} = -0.2673$ (LCB: 2-, POS:1/4) $F_{zz} = -0.2403$ (LCB: 1-, POS:1/4)

Depth	0.02800	Thickness	0.00250
Width	0.04000	Flange	0.00250
Web Depth	0.00900		
Area	0.00024	Age	0.00000
Cyl	0.00048	Cal	0.00000
Iy	0.00000	It	0.00000
IyR	0.01678	IzR	0.01280
Iw	0.00000	Ist	0.00000
Iy	0.01034	Iz	0.01280

3. Design Parameters

Unbraced Lengths	$L_y = 0.96000$, $L_z = 0.96000$, $L_b = 0.96000$
Effective Length Factors	$K_y = 1.00$, $K_z = 1.00$
Moment Factor / Bending Coefficient	$C_{my} = 0.00$, $C_{mz} = 0.00$, $C_{mLT} = 0.00$

Figura 200. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 15.3193/83.1250 = 0.184 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Bending Resistance

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.05883/0.71721 = 0.082 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.05883/0.71721 = 0.082 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.19535/0.58950 = 0.331 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.19535/0.89186 = 0.219 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Shear Resistance

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 0.26729/8.93089 = 0.030 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Combined Ratio

$$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.525 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.637 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression)

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 15.3193/34.9298 = 0.439 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Bending)

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.20402/0.55316 = 0.369 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

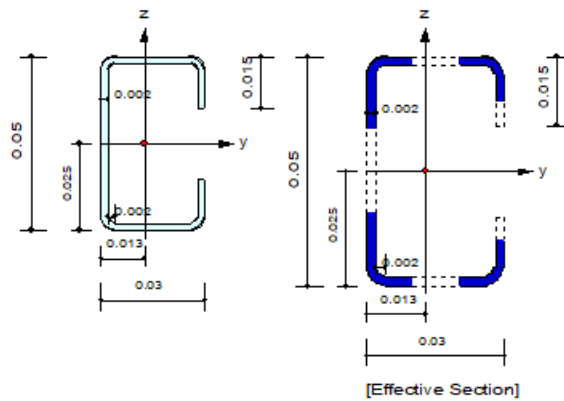
Buckling Resistance (Compression+Bending)

$$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.967 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Figura 201. Verifiche strutturali per la sezione

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 11
 Material S275 (No:1)
 (F_y = 275000, E_s = 210000000)
 Section Name LC-50X30X2 (No:1)
 (Rolled : LC-50X30X2).
 Member Length : 0.25000



2. Member Forces

Axial Force F_{xx} = -0.3339 (LCB: 1-, POS:J)
 Bending Moments M_y = -0.3366, M_z = -0.0117
 End Moments M_{yi} = -0.0411, M_{yj} = -0.3366 (for Lb)
 M_{yi} = -0.0411, M_{yj} = -0.3366 (for L_y)
 M_{zi} = -0.0100, M_{zj} = -0.0117 (for Lz)
 Shear Forces F_{yy} = -0.2107 (LCB: 2-, POS:1/2)
 F_{zz} = 2.65500 (LCB: 2+, POS:J)

Depth	0.05000	Thickness	0.00200
Width	0.03000	Rounding	0.00200
Lip Depth	0.01500		
Area	0.00025	A _{sz}	0.00014
C _{ye}	0.00113	C _{zb}	0.00030
I _{yy}	0.00000	I _{zz}	0.00000
Y _{bar}	0.01279	Z _{bar}	0.02500
S _{yy}	0.00000	S _{zz}	0.00000
r _y	0.01924	r _z	0.01154

3. Design Parameters

Unbraced Lengths L_y = 0.25000, L_z = 0.25000, L_b = 0.25000
 Effective Length Factors K_y = 1.00, K_z = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient C_{my} = 0.00, C_{mz} = 0.00, C_{mLT} = 0.00

Figura 202. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$$N_{Ed}/N_{C,Rd} = 0.3339/85.4800 = 0.004 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Bending Resistance

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.33787/0.88643 = 0.381 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.33787/1.21860 = 0.277 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.01175/0.69433 = 0.017 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.01175/0.96703 = 0.012 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Shear Resistance

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 2.6550/15.2420 = 0.174 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Combined Ratio

$$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.295 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.403 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000 \dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression)

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0.3339/62.3457 = 0.005 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Bending)

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.33808/0.77618 = 0.436 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression+Bending)

$$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.530 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Figura 203. Verifiche strutturali per la sezione

6.2.6 Caso 2.c

Nel modello analizzato nella presente sezione (Figura 204) le aste verticali sono interamente compresse sotto i carichi statici. Infatti, i vincoli esterni (di collegamento con il telaio in c.a.) consentono la sola rotazione secondo Y mentre in testa è stato consentito anche lo spostamento verticale per la sola condizione di carico statico.

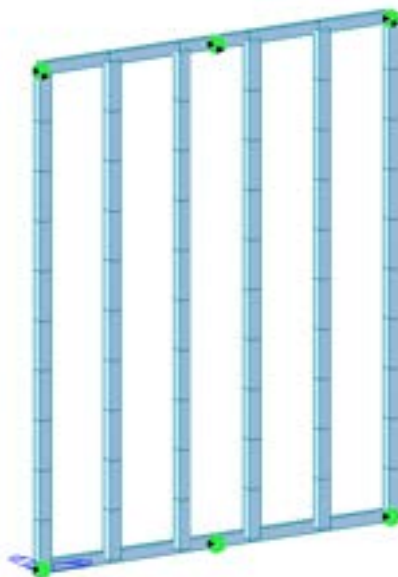


Figura 204. Struttura con collegamenti orizzontali

Le caratteristiche della sollecitazione massime e minime ottenute dalle analisi numeriche sono riportate nelle figure da Figura 205 a Figura 209. Analogamente a quanto descritto in precedenza, sono state considerate due combinazioni di carico, con componente maggiore del sisma secondo X o secondo Y.

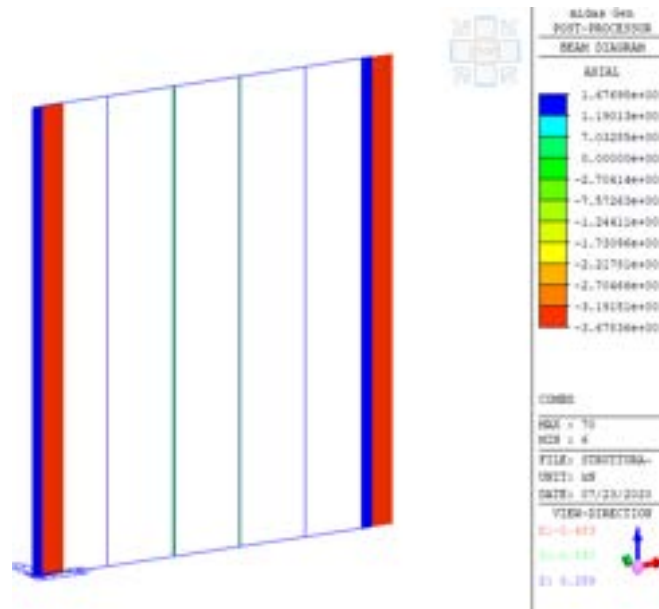


Figura 205. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X e Y

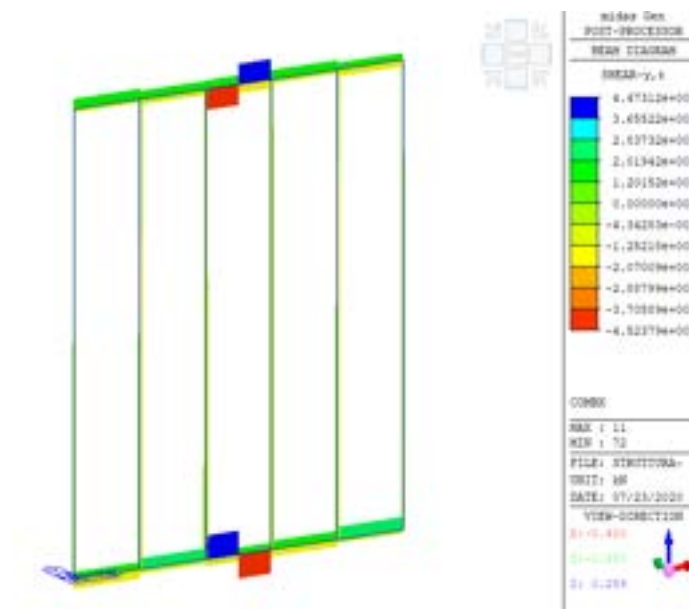


Figura 206. Tagli massimo e minimo – Combinazione X

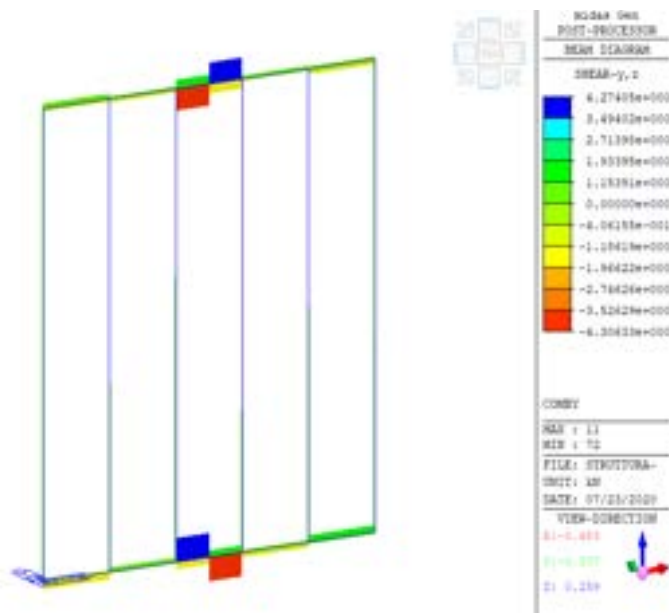


Figura 207. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y

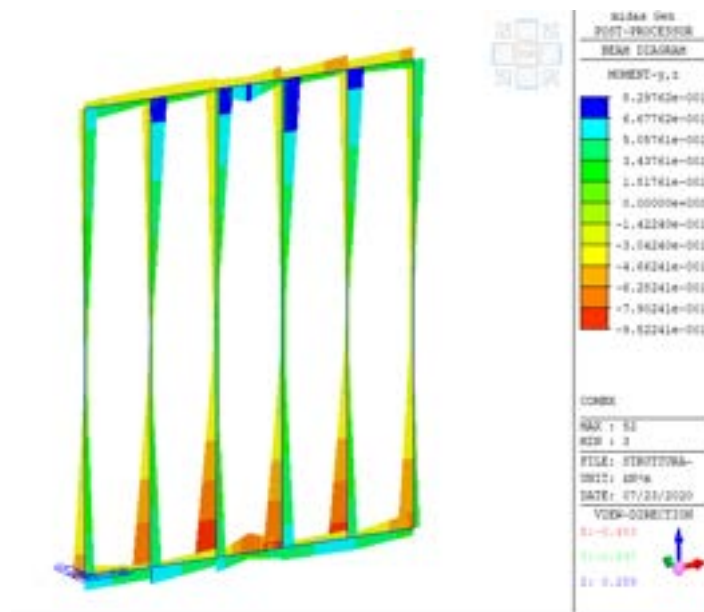


Figura 208. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X

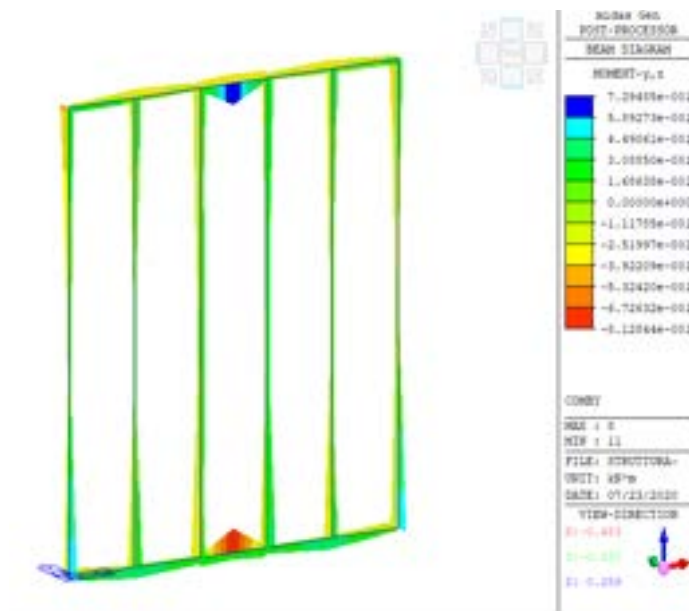
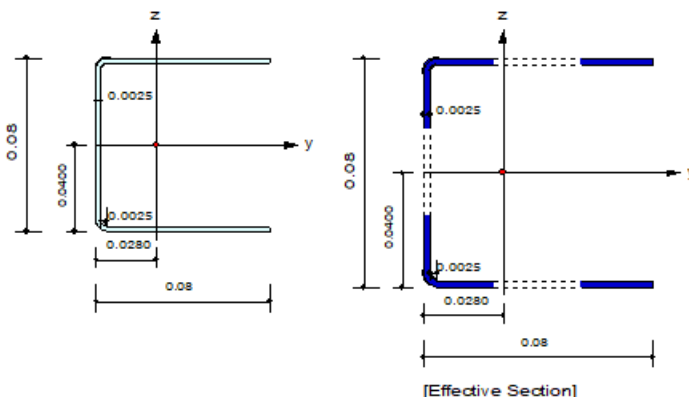


Figura 209. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y

Le verifiche per le condizioni di carico più gravose sono riportate nelle figure da Figura 210 a Figura 213. Sono stati utilizzati gli stessi profilati del caso 2.a. L'acciaio (S355) utilizzato è circa 100 kg.

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 6
 Material S355 (No:1)
 (Fy = 355000, Es = 210000000)
 Section Name OM-80X80X2.5 (No:3)
 (Built-up Section).
 Member Length : 3.20000



2. Member Forces

Axial Force Fxx = -36.784 (LCB: 1-, POS:I)
 Bending Moments My = -0.6755, Mz = -0.1494
 End Moments Myi = -0.6755, Myj = -0.2998 (for Lb)
 Myi = -0.6755, Myj = -0.2998 (for Ly)
 Mzi = -0.1494, Mzj = -0.1686 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = 0.33916 (LCB: 2+, POS:3/4)
 Fzz = -0.4421 (LCB: 1-, POS:I)

Depth	0.08000	Thickness	0.00250
Width	0.08000	Rounding	0.00250
Lip Depth	0.00000		
Area	0.00058	Asz	0.00019
Oyb	0.00374	Ozb	0.00109
Iyy	0.00000	Izz	0.00000
Ybar	0.02801	Zbar	0.04000
Syy	0.00002	Szz	0.00001
ry	0.03415	rz	0.02824

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 3.20000, Lz = 3.20000, Lb = 3.20000
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient Cmy = 0.00, Cnz = 0.00, CmLT = 0.00

Figura 210. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$$N_{Ed}/N_{C,Rd} = 36.784/232.187 = 0.158 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Bending Resistance

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.67554/6.74116 = 0.100 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.67554/6.74116 = 0.100 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.16278/3.02144 = 0.054 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.16278/5.97822 = 0.027 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Shear Resistance

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 0.4421/39.7109 = 0.011 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Combined Ratio

$$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.305 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.332 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression)

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 36.7836/53.3995 = 0.689 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Bending)

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.69488/3.85069 = 0.180 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

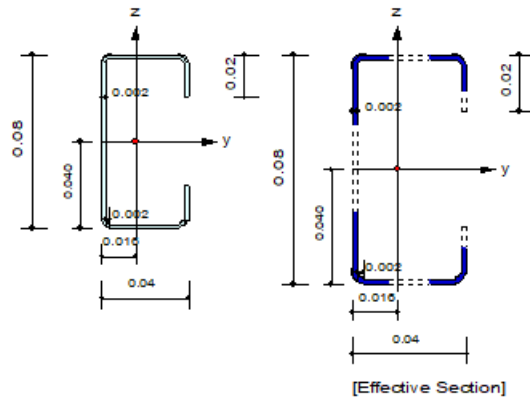
Buckling Resistance (Compression+Bending)

$$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.996 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Figura 211. Verifiche strutturali per la sezione

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 11
 Material S355 (No:1)
 ($F_y = 355000$, $E_s = 210000000$)
 Section Name LC-80X40X2 (No:1)
 (Rolled : LC-80X40X2).
 Member Length : 0.25000



2. Member Forces

Axial Force $F_{xx} = -0.7154$ (LCB: 1-, POS:J)
 Bending Moments $M_y = -0.7832$, $M_z = -0.0149$
 End Moments $M_{yi} = -0.1612$, $M_{yj} = -0.7832$ (for Lb)
 $M_{yi} = -0.1612$, $M_{yj} = -0.7832$ (for Ly)
 $M_{zi} = -0.0186$, $M_{zj} = -0.0149$ (for Lz)
 Shear Forces $F_{yy} = -0.1652$ (LCB: 2-, POS:1/2)
 $F_{zz} = 4.47312$ (LCB: 1+, POS:J)

Depth	0.08000	Thickness	0.00200
Width	0.04000	Rounding	0.00200
Lip Depth	0.02000		
Area	0.00037	Asz	0.00022
Oyb	0.00270	Ozb	0.00060
Iyy	0.00000	Izz	0.00000
Ybar	0.01593	Zbar	0.04000
Syy	0.00001	Szz	0.00000
ry	0.03115	rz	0.01569

3. Design Parameters

Unbraced Lengths $L_y = 0.25000$, $L_z = 0.25000$, $L_b = 0.25000$
 Effective Length Factors $K_y = 1.00$, $K_z = 1.00$
 Moment Factor / Bending Coefficient $C_{my} = 0.00$, $C_{mz} = 0.00$, $C_{mLT} = 0.00$

Figura 212. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$$N_{Ed}/N_{C,Rd} = 0.715/151.440 = 0.005 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Bending Resistance

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.78898/2.16438 = 0.365 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.78898/3.28997 = 0.240 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.01539/1.48725 = 0.010 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.01539/2.45628 = 0.006 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Shear Resistance

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 4.4731/31.9737 = 0.140 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Combined Ratio

$$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.252 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.381 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression)

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0.715/113.885 = 0.006 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Bending)

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.78913/2.02515 = 0.390 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression+Bending)

$$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.488 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Figura 213. Verifiche strutturali per la sezione

6.2.7 Caso 2.d

Nello schema strutturale descritto in questa sezione le aste verticali sono interamente compresse sotto i carichi statici, come per il caso 2.c, ma sono stati aggiunti anche i collegamenti orizzontali (Figura 214).



Figura 214. Struttura con collegamenti orizzontali

Le caratteristiche della sollecitazione massime e minime ottenute dalle analisi numeriche sono riportate nelle figure da Figura 215 a Figura 221. Sono state considerate due combinazioni di carico, con componente maggiore del sisma secondo X o secondo Y.

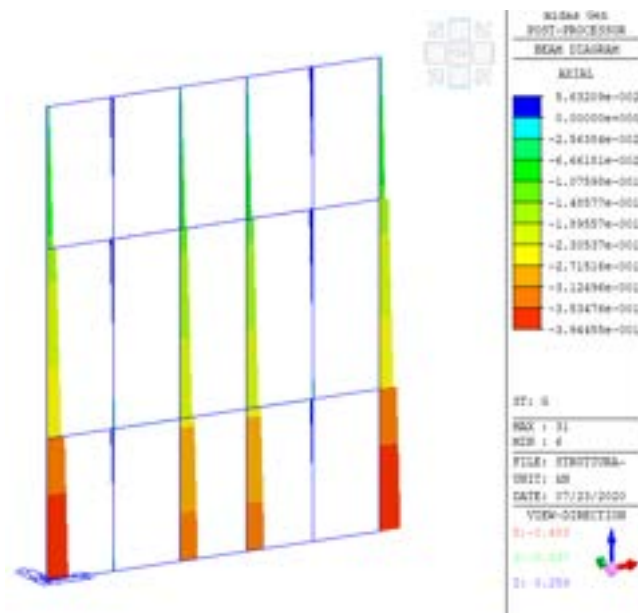


Figura 215. Sforzi normali sotto carichi statici

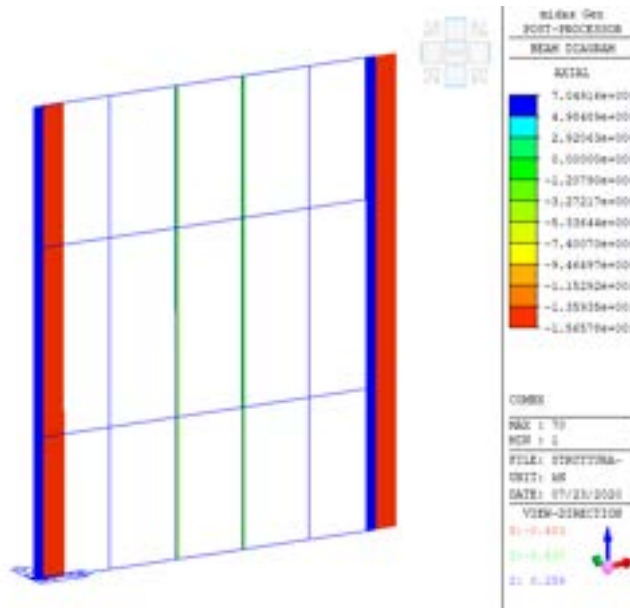


Figura 216. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X

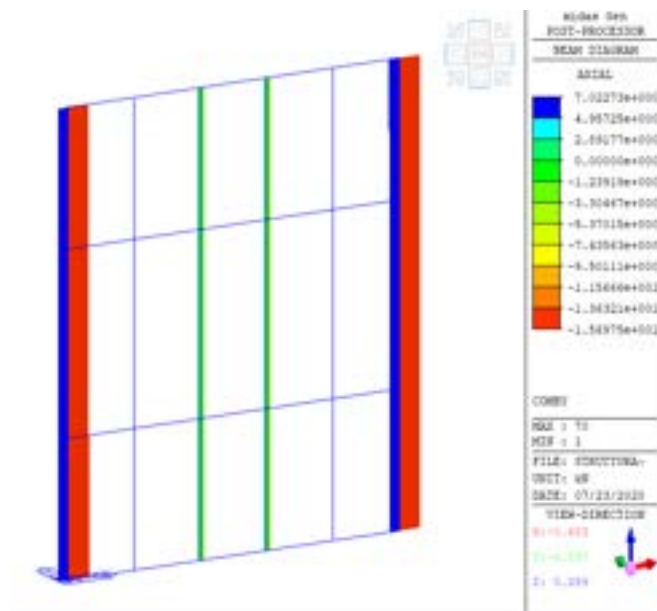


Figura 217. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y

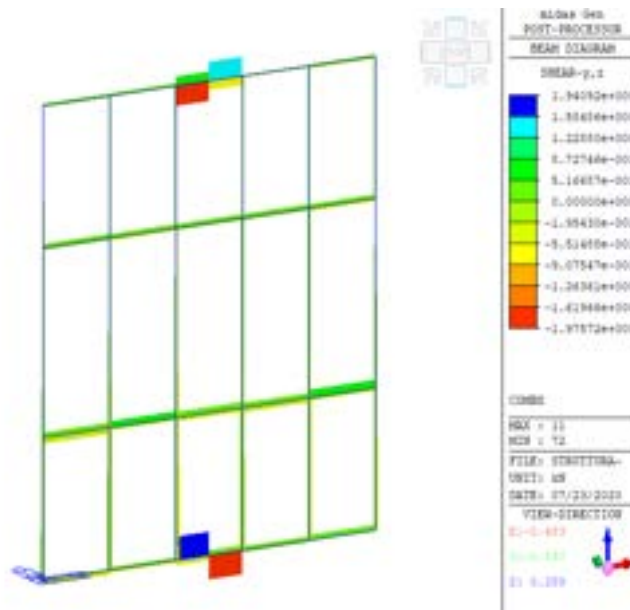


Figura 218. Tagli massimo e minimo – Combinazione X

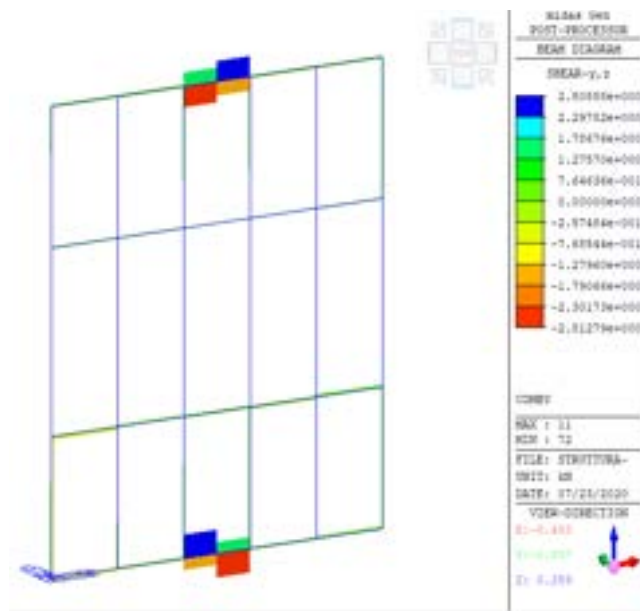


Figura 219. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y

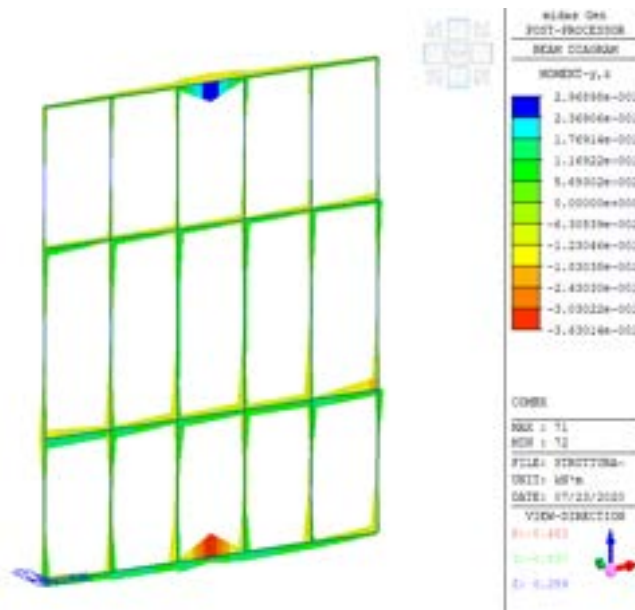


Figura 220. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X

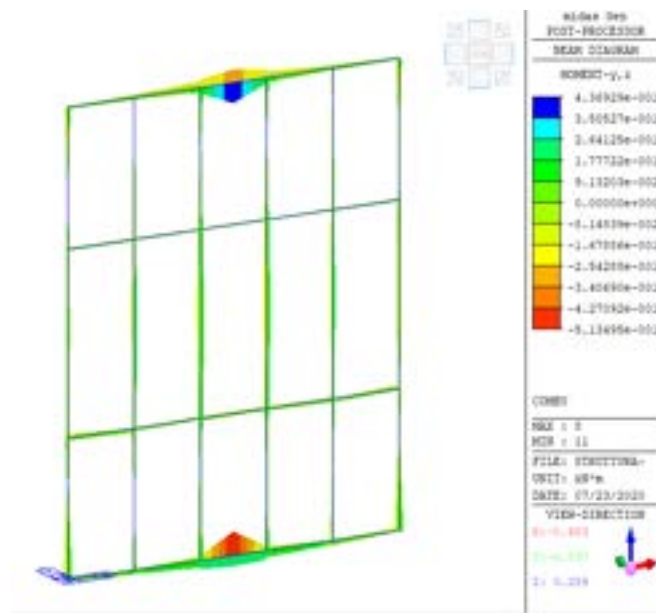
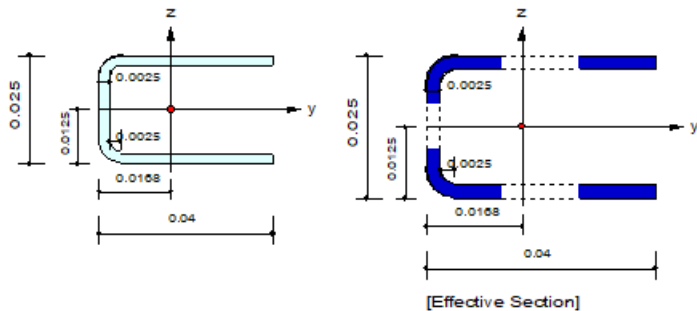


Figura 221. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y

Le verifiche per le situazioni peggiori sono riportate nelle figure da Figura a 222 a Figura 5. I profili orizzontali utilizzati sono 50x30x2 mm, mentre i profili verticali hanno una sezione 40x25x2.5 mm. L'acciaio utilizzato è del tipo S275 e la massa totale del sistema di profili che ne risulta è pari a circa 55.29 kg.

1. Design Information

Design Code Eurocode3-1-3:06
 Unit System kN, m
 Member No 6
 Material S275 (No:1)
 ($F_y = 275000$, $E_s = 210000000$)
 Section Name OM-40X25X2.5 (No:3)
 (Built-up Section).
 Member Length : 0.96000



2. Member Forces

Axial Force $F_{xx} = -15.548$ (LCB: 2-, POS:1)
 Bending Moments $M_y = -0.0607$, $M_z = -0.1962$
 End Moments $M_{yi} = -0.0607$, $M_{yj} = -0.0058$ (for L_b)
 $M_{yi} = -0.0607$, $M_{yj} = -0.0058$ (for L_y)
 $M_{zi} = -0.1962$, $M_{zj} = -0.0398$ (for L_z)
 Shear Forces $F_{yy} = -0.2706$ (LCB: 2-, POS:1/4)
 $F_{zz} = -0.2442$ (LCB: 1-, POS:1/4)

Depth	0.02500	Thickness	0.00250
Width	0.04000	Rounding	0.00250
Lip Depth	0.00000		
Area	0.00024	Asz	0.00005
I_{yb}	0.00048	I_{zb}	0.00020
I_{yy}	0.00000	I_{zz}	0.00000
Y_{bar}	0.01679	Z_{bar}	0.01250
S_{yy}	0.00000	S_{zz}	0.00000
r_y	0.01034	r_z	0.01263

3. Design Parameters

Unbraced Lengths $L_y = 0.96000$, $L_z = 0.96000$, $L_b = 0.96000$
 Effective Length Factors $K_y = 1.00$, $K_z = 1.00$
 Moment Factor / Bending Coefficient $C_{my} = 0.00$, $C_{mz} = 0.00$, $C_{mLT} = 0.00$

Figura 222. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance

$$N_{Ed}/N_{C,Rd} = 15.5482/83.1250 = 0.187 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Bending Resistance

$$M_{Cy,Ed} / M_{Cy,Rd,comp} = 0.06072/0.71721 = 0.085 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{Cy,Ed} / M_{Cy,Rd,tens} = 0.06072/0.71721 = 0.085 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{Cz,Ed} / M_{Cz,Rd,comp} = 0.19742/0.58950 = 0.335 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$M_{Cz,Ed} / M_{Cz,Rd,tens} = 0.19742/0.89186 = 0.221 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Shear Resistance

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 0.27056/8.93089 = 0.030 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Combined Ratio

$$R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.533 < 1.000 \dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.646 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

$$R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000 \dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Compression)

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 15.5482/34.9298 = 0.445 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Buckling Resistance (Bending)

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.20655/0.55426 = 0.373 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

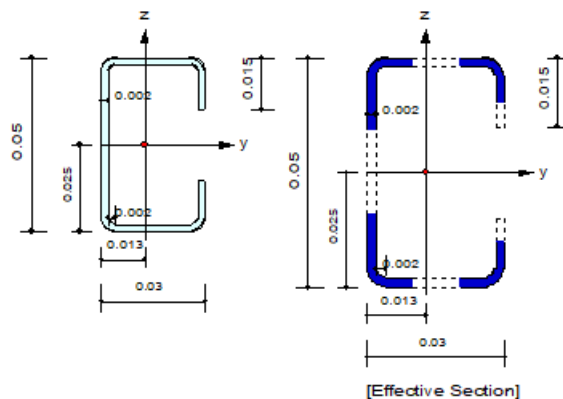
Buckling Resistance (Compression+Bending)

$$R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.977 < 1.000 \dots\dots\dots \text{O.K}$$

Figura 223. Verifiche strutturali per la sezione

1. Design Information

Design Code	Eurocode3-1-3:06
Unit System	kN, m
Member No	11
Material	S275 (No:1) ($F_y = 275000$, $E_s = 210000000$)
Section Name	LC-50X30X2 (No:1) (Rolled : LC-50X30X2).
Member Length	: 0.25000



2. Member Forces

Axial Force	$F_{xx} = -0.3337$ (LCB: 1-, POS:J)
Bending Moments	$M_y = -0.3630$, $M_z = -0.0112$
End Moments	$M_{yi} = -0.0291$, $M_{yj} = -0.3630$ (for Lb) $M_{yi} = -0.0291$, $M_{yj} = -0.3630$ (for Ly) $M_{zi} = -0.0105$, $M_{zj} = -0.0112$ (for Lz)
Shear Forces	$F_{yy} = -0.2147$ (LCB: 2-, POS:1/2) $F_{zz} = 2.80888$ (LCB: 2+, POS:J)

Depth	0.05000	Thickness	0.00200
Width	0.03000	Rounding	0.00200
Lip Depth	0.01500		
Area	0.00025	Asz	0.00014
O _{ye}	0.00113	O _{zb}	0.00030
I _{yy}	0.00000	I _{zz}	0.00000
Y _{bar}	0.01279	Z _{bar}	0.02500
S _{yy}	0.00000	S _{zz}	0.00000
r _y	0.01924	r _z	0.01154

3. Design Parameters

Unbraced Lengths	$L_y = 0.25000$, $L_z = 0.25000$, $L_b = 0.25000$
Effective Length Factors	$K_y = 1.00$, $K_z = 1.00$
Moment Factor / Bending Coefficient	$C_{my} = 0.00$, $C_{mz} = 0.00$, $C_{mLT} = 0.00$

Figura 224. Caratteristiche geometriche della sezione e carichi agenti su di essa

4. Checking Results

Axial Resistance
 $N_{Ed}/N_{C,Rd} = 0.3337/85.4800 = 0.004 < 1.000$ O.K

Bending Resistance
 $M_{y,Ed} / M_{y,Rd,comp} = 0.36439/0.85218 = 0.428 < 1.000$ O.K
 $M_{y,Ed} / M_{y,Rd,tens} = 0.36439/1.20486 = 0.302 < 1.000$ O.K
 $M_{z,Ed} / M_{z,Rd,comp} = 0.01127/0.68775 = 0.016 < 1.000$ O.K
 $M_{z,Ed} / M_{z,Rd,tens} = 0.01127/0.96324 = 0.012 < 1.000$ O.K

Shear Resistance
 $V_{Ed}/V_{Rd} = 2.8089/15.2420 = 0.184 < 1.000$ O.K

Combined Ratio
 $R_{T+M} = -N_{Ed}/N_{t,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd,tens} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd,tens} = 0.320 < 1.000$ O.K
 $R_{C+M} = -N_{Ed}/N_{c,Rd} + (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/M_{y,Rd,comp} + (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})/M_{z,Rd,comp} = 0.449 < 1.000$ O.K
 $R_{V+N+M} = -N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + (1 - M_{f,Rd}/M_{pl,rd})((2V_{Ed}/V_{w,Rd}) - 1)^2 = 0.000 < 1.000$.. O.K

Buckling Resistance (Compression)
 $N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0.3337/61.6577 = 0.005 < 1.000$ O.K

Buckling Resistance (Bending)
 $M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0.36456/0.74676 = 0.488 < 1.000$ O.K

Buckling Resistance (Compression+Bending)
 $R_{(comp+bend)} = [N_{Ed}/N_{b,Rd}]^{0.8} + [M_{Ed}/M_{b,Rd}]^{0.8} = 0.579 < 1.000$ O.K

Figura 225. Verifiche strutturali per la sezione

6.2.8 Caso 2.e

Per il caso 2.e è stata considerata la struttura rappresentata in Figura 226, costituita da profili a T verticali vincolati in testa in modo da consentire lo spostamento verticale sotto carichi statici, mentre al piede gli spostamenti verticali sono sempre impediti. Il codice di calcolo consente di definire diversi “Boundary Groups” da assegnare alle fasi di carico. In due nodi lungo lo sviluppo verticale di ciascun profilo sono stati inseriti dei vincoli sullo spostamento ortogonale al piano del pannello.

Il materiale strutturale è alluminio con tensione di rottura di 190 MPa. I profilati sono stati caricati con il peso ipotizzato per i pannelli. Sono state considerate tutte le componenti di accelerazione sismica (come per i casi 2.a, 2.b, 2.c e 2.d).

La struttura è stata sottoposta, mediante analisi con integrazione al passo delle equazioni del moto, a due diverse terne di accelerogrammi applicate ai nodi in testa e al piede, valutate sulla base della risposta del telaio in c.a.

Nelle analisi è stato considerato un rapporto di smorzamento del 5%. Per tenere in considerazione la rigidità nel piano dei pannelli sono stati inseriti degli elementi finiti piani con comportamento a membrana di spessore 5 mm, con modulo elastico di 60 GPa, tipico di un materiale ceramico.

Una vista del modello implementato è riportata in Figura 226.

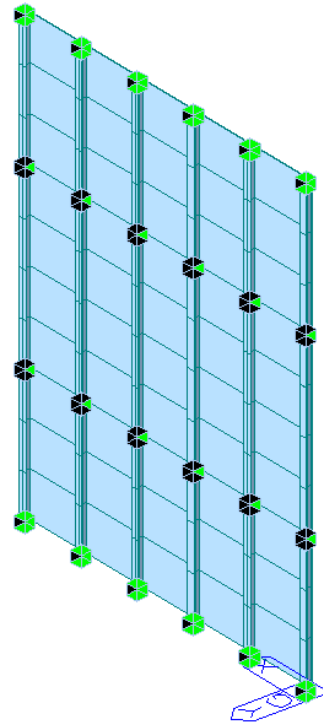


Figura 226. Struttura con profili verticali a T e dettaglio

Le caratteristiche della sollecitazione massime e minime ottenute dalle analisi numeriche sono riportate nelle figure da Figura 227 a Figura 232. Sono state considerate due combinazioni di carico, con componente maggiore del sisma secondo X o secondo Y.

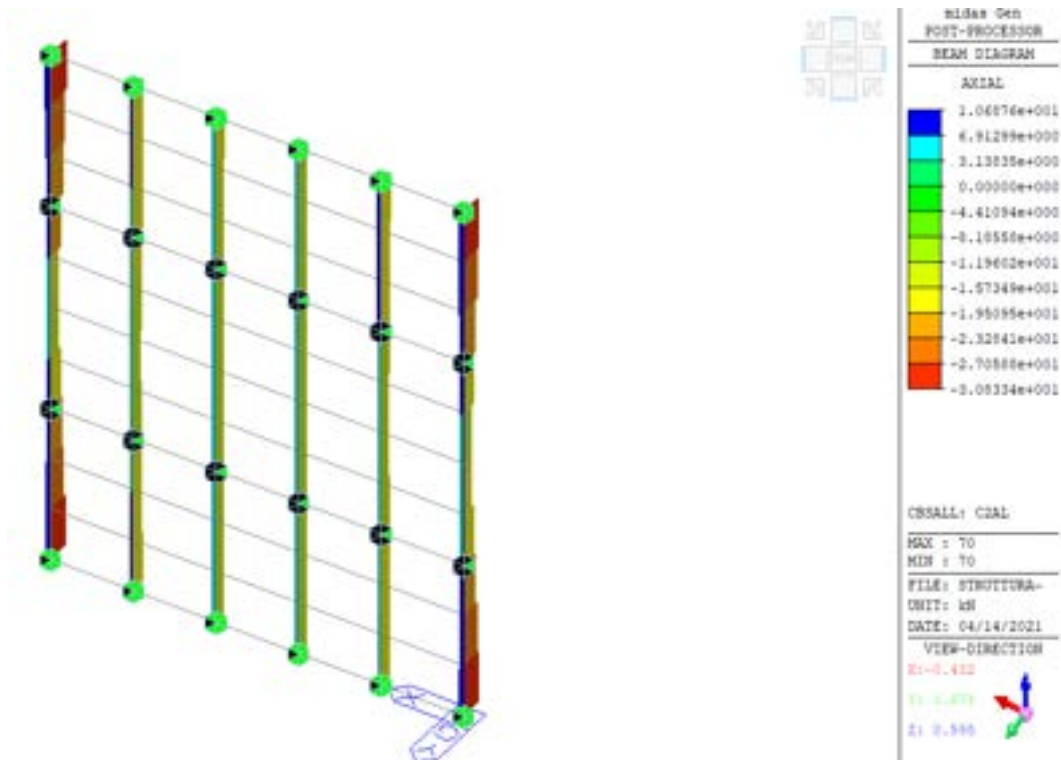


Figura 227. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione X

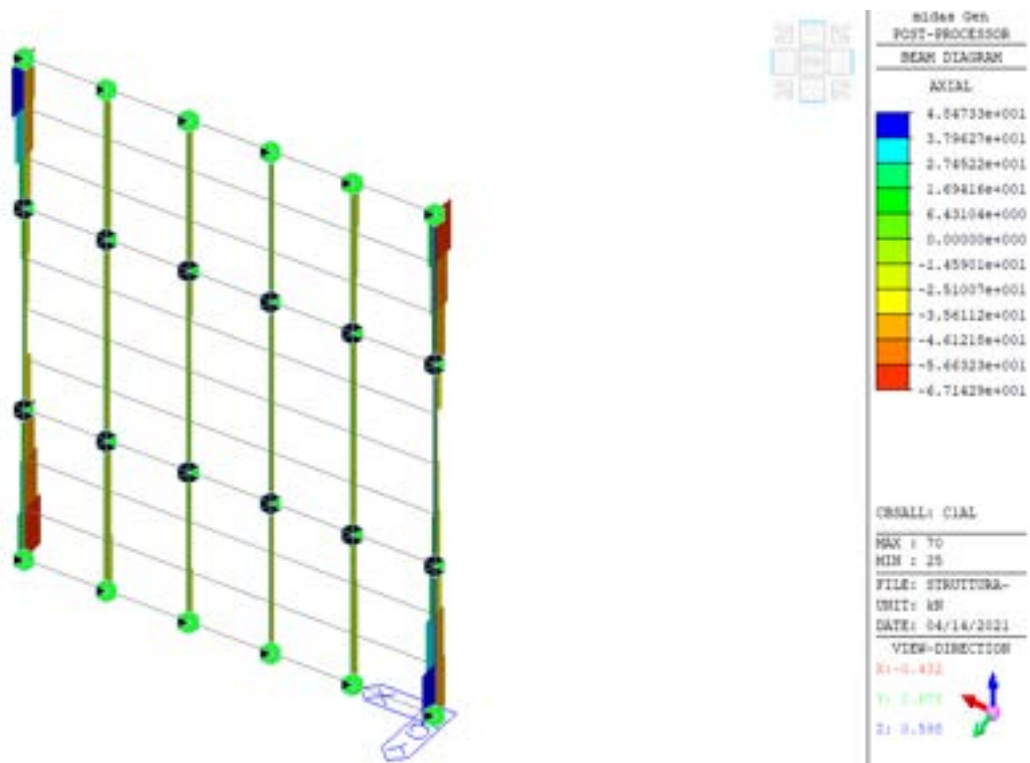


Figura 228. Sforzi normali massimo e minimo – Combinazione Y

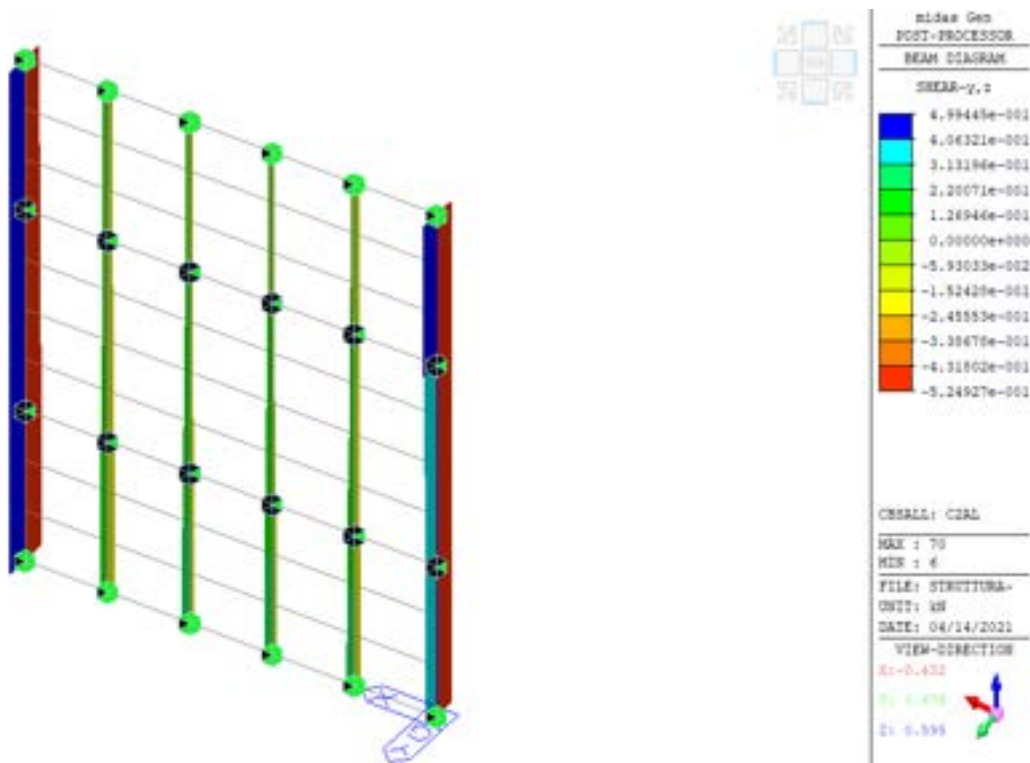


Figura 229. Tagli massimo e minimo – Combinazione X

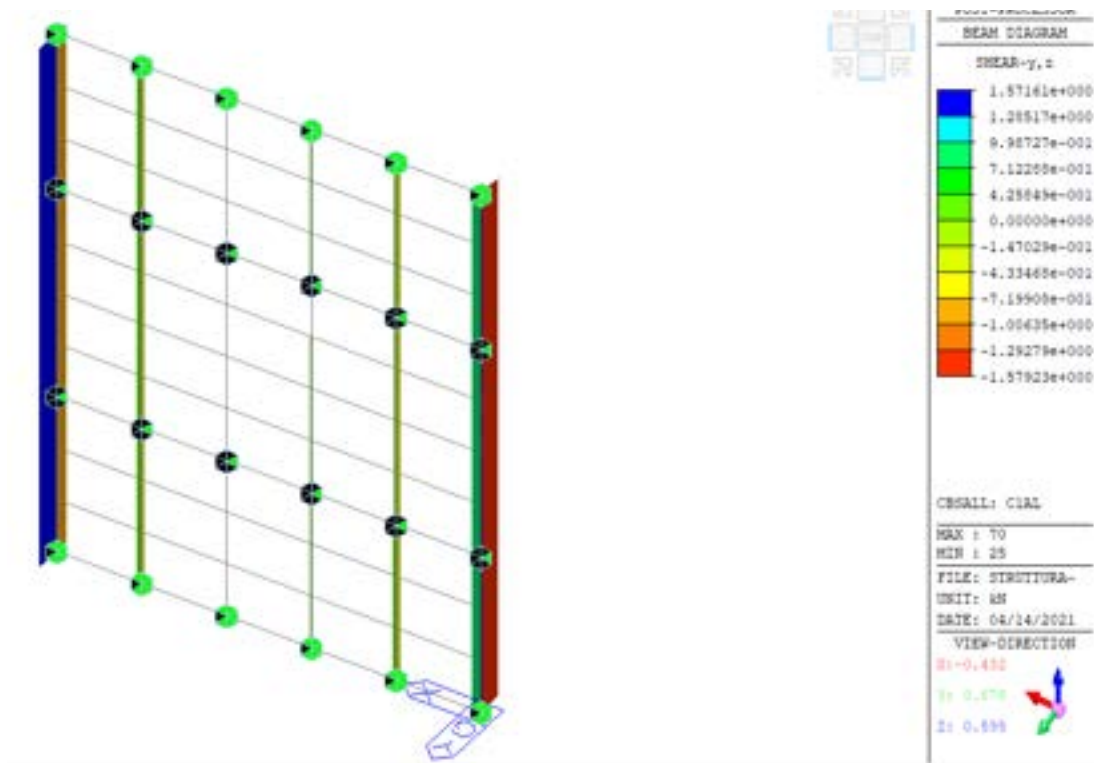


Figura 230. Tagli massimo e minimo – Combinazione Y

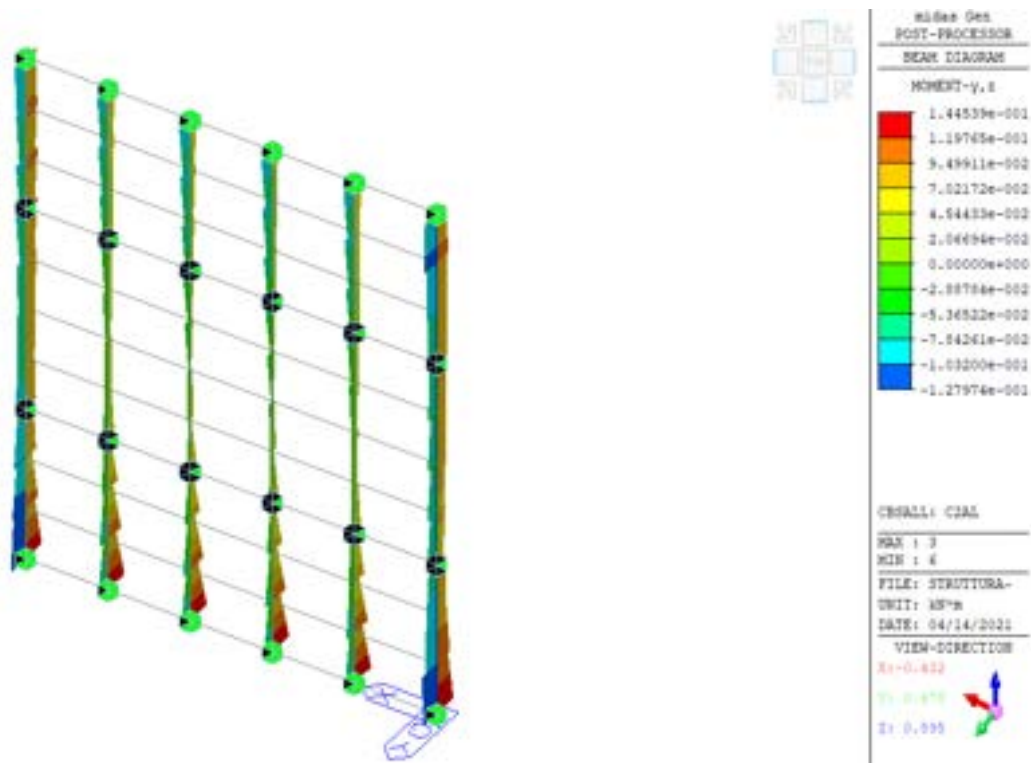


Figura 231. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione X

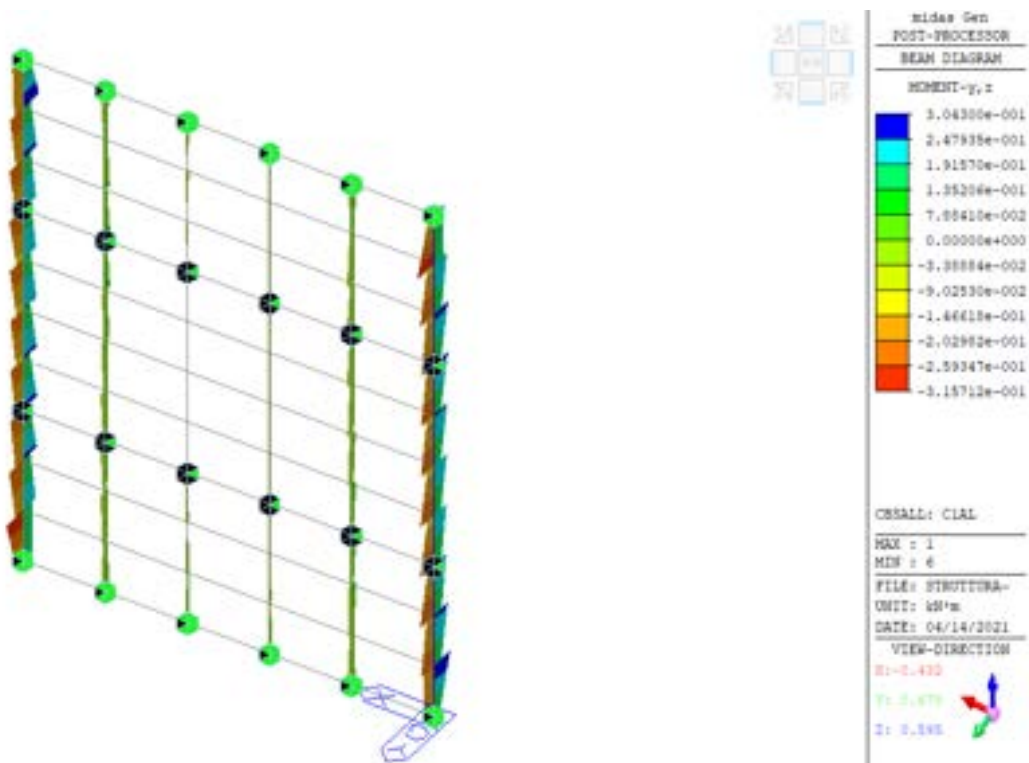
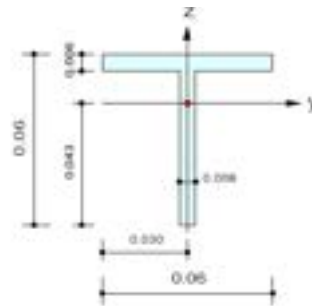


Figura 232. Momenti flettenti massimo e minimo – Combinazione Y

La verifica è ottenuta con sezioni 60x60x6 mm (vedi Figura ra 233), cui corrisponde un peso del materiale strutturale di 34.8 kg.

1. Design Information

Design Code Eurocode3.05
 Unit System kN, m
 Member No 6
 Material Al (No.1)
 ($F_y = 235000$, $E_s = 69637000$)
 Section Name T (No.2)
 (Rolled : T)
 Member Length : 0.96000



2. Member Forces

Axial Force $F_{xx} = -67.051$ (LCB: 1-, POS: 1/4)
 Bending Moments $M_y = -0.2718$, $M_z = -0.0023$
 End Moments $M_{yi} = -0.1400$, $M_{yj} = -0.3157$ (for Lb)
 $M_{yi} = -0.1400$, $M_{yj} = -0.2371$ (for Ly)
 $M_{zi} = 0.00000$, $M_{zj} = -0.0030$ (for Lz)
 Shear Forces $F_{yy} = 0.00945$ (LCB: 1+, POS: 1/4)
 $F_{zz} = 1.55088$ (LCB: 1+, POS: J)

Depth	0.06000	Web Thick	0.00600
Top F Width	0.06000	Top F Thick	0.00600
Area	0.00068	Asz	0.00036
Cyb	0.00092	Czb	0.00045
Iyy	0.00000	Izz	0.00000
Ybar	0.03000	Zbar	0.04279
Wely	0.00001	Welz	0.00000
rY	0.01847	rz	0.01262

3. Design Parameters

Unbraced Lengths $L_y = 0.96000$, $L_z = 0.32000$, $L_b = 0.32000$
 Effective Length Factors $K_y = 1.00$, $K_z = 1.00$
 Equivalent Uniform Moment Factors $C_{my} = 0.85$, $C_{mz} = 0.85$, $C_{mLT} = 1.00$

4. Checking Result

Slenderness Ratio

$KL/r = 69.3 < 200.0$ (Memb:19, LCB: 3) O.K.

Axial Resistance

$N_{Ed}/\text{MIN}[N_{c,Rd}, N_{b,Rd}] = 67.0509/90.4569 = 0.741 < 1.000$ O.K.

Bending Resistance

$M_{Edy}/M_{Rdy} = 0.27177/2.30831 = 0.118 < 1.000$ O.K.

$M_{Edz}/M_{Rdz} = 0.00227/1.38321 = 0.002 < 1.000$ O.K.

Combined Resistance

$R_{MNRd} = \text{MAX}[M_{Edy}/M_{Ny,Rd}, M_{Edz}/M_{Nz,Rd}]$

$R_{BiM} = (M_{Edy}/M_{Ny,Rd})^{\alpha} + (M_{Edz}/M_{Nz,Rd})^{\beta}$

$R_{byN} = N_{Ed}/(A \cdot f_y / \gamma_{M0})$, $R_{byM} = M_{Edy}/M_{y,Rd} + M_{Edz}/M_{z,Rd}$

$R_{cLT1} = N_{Ed}/(X_{iy} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1})$

$R_{bLT1} = (k_{yy} \cdot M_{Edy}) / (X_{iLT} \cdot W_{ply} \cdot f_y / \gamma_{M1}) + (k_{yz} \cdot M_{Edz}) / (W_{plz} \cdot f_y / \gamma_{M1})$

$R_{cLT2} = N_{Ed}/(X_{iz} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1})$

$R_{bLT2} = (K_{zy} \cdot M_{Edy}) / (X_{iLT} \cdot W_{ply} \cdot f_y / \gamma_{M1}) + (K_{zz} \cdot M_{Edz}) / (W_{plz} \cdot f_y / \gamma_{M1})$

$R_{max} = \text{MAX}[R_{MNRd}, R_{BiM}, (R_{byN} + R_{byM}), \text{MAX}(R_{cLT1} + R_{bLT1}, R_{cLT2} + R_{bLT2})] = 0.857 < 1.000$ O.K.

Shear Resistance

$V_{Edy}/V_{y,Rd} = 0.000 < 1.000$ O.K.

$V_{Edz}/V_{z,Rd} = 0.032 < 1.000$ O.K.

Figura 233. Caratteristiche geometriche e verifiche strutturali della sezione a T

6.3 Criteri per la scelta del sistema di supporto

Le analisi e verifiche effettuate hanno considerato diverse condizioni di vincolo delle aste verticali, con aste totalmente in compressione sotto carico statico oppure con aste compresse nella parte inferiore e tese superiormente.

È stata valutata la presenza di elementi di collegamento orizzontali, che riducendo la lunghezza libera di inflessione delle aste verticali, permettono di ottenere un migliore comportamento nei confronti delle verifiche di instabilità. Inoltre, è stata considerata anche una configurazione (2.e) per la quale il collegamento orizzontale fra i profili viene realizzato mediante un elemento strutturale con comportamento membranale, che vuole modellare il comportamento di un rivestimento ceramico, ad esempio.

Sono stati anche considerate tre diverse tipologie di sezione (a omega, a C e a T) e tre materiali costitutivi (acciaio S275, acciaio S355 e alluminio 3003-H18).

Per tutte le configurazioni analizzate è stata valutata la risposta dinamica considerando o meno la componente verticale del sisma. La Tabella 33 riassume le analisi eseguite e i risultati in termini di peso del sistema di supporto.

Tabella 33. Sistemi di supporto e relativo peso

# Caso	Materiale	Sezione aste verticali [mm]	Sezione Aste orizzontali [mm]	Vincoli allo spostamento verticale	Componenti sisma	Peso (kg)
1.a	Acciaio S275	Ω 40x25x2	C ai piani 40x80x2	In testa e al piede	X-Y	43
1.a bis	Alluminio 3003-H18	Ω 45x30x3	C ai piani 80x40x2	In testa e al piede	X-Y	23
1.b	Acciaio S275	Ω 40x25x1.5	C ai piani e a 2 livelli intermedi 50x30x2	In testa e al piede	X-Y	42
1.c	Acciaio S275	Ω 40x25x1.5	C ai piani 50x30x2	Al piede	X-Y	42
2.a	Acciaio S355	Ω 80x80x2.5	C ai piani 80x40x2	In testa e al piede	X-Y-Z	100
2.b	Acciaio S275	Ω 40x25x1.5	C ai piani e a 2 livelli intermedi 50x30x2	In testa e al piede	X-Y-Z	55
2.c	Acciaio S355	Ω 80x80x2.5	C ai piani 80x40x2	Al piede	X-Y-Z	100
2.d	Acciaio S275	Ω 40x25x2.5	C ai piani e a 2 livelli intermedi 50x30x2	Al piede	X-Y-Z	55
2.e	Alluminio 3003-H18	T 60x60x6	Assenti – Sono presenti pannelli di irrigidimento e vincoli fuori piano	Al piede	X-Y-Z	35

Come si può osservare dalla Tabella 33, quando si considerano le sole componenti orizzontali del sisma il peso del sistema di supporto ottenuto non varia molto al variare delle condizioni di vincolo e della presenza/assenza dei collegamenti orizzontali. Ad ogni modo, il peso del sistema di supporto viene circa dimezzato quando si adottano profili in alluminio (si riduce di un fattore 0.53 nel caso 1.a bis).

Quando invece si considera anche la componente verticale del sisma le analisi mostrano che, in assenza di collegamenti intermedi, gli spessori da utilizzare subiscono un notevole incremento e, conseguentemente, anche il peso del sistema di supporto aumenta. Tale incremento è principalmente dovuto all'insorgere del fenomeno di instabilità che coinvolge i profili verticali. Infatti, quando vengono introdotti elementi di collegamento orizzontali (casi 2.b, 2.c) o la membrana (2.e), le dimensioni dei profili si riducono significativamente così come la massa del sistema. I collegamenti orizzontali infatti riducono la luce libera di inflessione dei montanti, migliorandone le prestazioni nei confronti del *buckling*.

È importante osservare che il caso 2.e vuole analizzare una configurazione ottimizzata basata sui risultati ottenuti dalle analisi dei casi precedenti. Infatti, il caso 2.e implementa i collegamenti orizzontali utilizzando un elemento strutturale con comportamento membranale collegato ai montanti. Così facendo, si è potuto utilizzare un profilo con una sezione più pratica per le lavorazioni (sezione a T) in alluminio e con spessore ridotto. Queste considerazioni hanno portato ad ottenere un peso di soli 35 kg per il caso 2.e, che costituisce il valore minimo fra tutti i casi analizzati che considerano tutte e tre le componenti del sisma. La configurazione 2.e sembra quindi rappresentare una sintesi del *design* ottimale per la sottostruttura.

Dalle analisi effettuate, emergono quindi le seguenti considerazioni:

- la componente verticale del sisma è un'azione critica per il dimensionamento dei profili e deve quindi essere tenuta in conto;
- è necessario predisporre un sistema di collegamento orizzontale fra i profili verticali per irrigidire la struttura nel suo piano ed evitare l'instabilità dei profili verticali;
- utilizzare l'alluminio comporta un leggero incremento delle dimensioni dei profili, ma porta comunque ad una notevole riduzione del peso complessivo del sistema;
- vincolare tutti i profili verticali in più punti, invece che solo alla testa e al piede, consentirebbe di evitare l'uso dei profili a C e contribuire a ridurre il peso complessivo della struttura.

Sulla base delle precedenti considerazioni, è stata fatta una ricerca di mercato per analizzare le soluzioni disponibili che potessero soddisfare i requisiti richiesti e sono state individuate le soluzioni descritte in dettaglio nel paragrafo 7.

7 Realizzazione del provino

7.1 Costruzione del provino

Il provino utilizzato per le prove su tavole vibranti è stato costruito presso la Hall sismica del laboratorio SSPT-MET-DISPREV presso l'edificio F65 del Centro Ricerche ENEA di Casaccia. Il manufatto in c.a. è stato realizzato secondo quanto descritto al paragrafo 5.1. Le travi di coronamento in testa ai pilastri sono state effettuate in spessore di solaio, al fine di ridurre la rigidità del manufatto. I materiali utilizzati per la costruzione del provino sono riassunti in Tabella 34.

Tabella 34. Materiali impiegati per la realizzazione del provino

Materiale	Tipologia
Calcestruzzo	C25/30
Acciaio da carpenteria	B450C
Laterizio	Blocchi Poroton P600 25x30x19 cm percentuale di foratura $\leq 60\%$
Malta	M5

La costruzione del manufatto è iniziata disponendo i ferri di armatura del cordolo di fondazione e predisponendo i casseri in legno per contenere il getto di calcestruzzo, come mostrato in Figura 234. In tale figura vengono anche mostrati i tubolari a perdere inseriti per poter in seguito alloggiare le travi di acciaio necessarie alla movimentazione del provino sulla tavola vibrante. In Figura 235 viene invece mostrato il posizionamento dei ferri longitudinali dei pilastri effettuato prima del getto della trave di fondazione.



Figura 234. Realizzazione della trave di fondazione: casseri e ferri di armatura per la trave di fondazione



Figura 235. Realizzazione della trave di fondazione: vista dei ferri longitudinali dei pilastri

Una vista più dettagliata dei ferri longitudinali e delle staffe utilizzate per la trave di fondazione è riportata in Figura 236, mentre Figura 7 mostra in dettaglio il nodo fra pilastro e trave di fondazione prima di effettuare il getto di calcestruzzo.



Figura 236. Realizzazione della trave di fondazione: vista dei ferri longitudinali e delle staffe



Figura 237. Realizzazione della trave di fondazione: vista del nodo trave-pilastro

Una volta completato il getto della trave di fondazione, i lavori di costruzione del manufatto sono proseguiti predisponendo i casseri per il getto dei quattro pilastri (vedi Figura 238), della trave in spessore di solaio (vedi Figura 239) e del solaio stesso. Una vista delle armature utilizzate per realizzare il solaio e dei laterizi utilizzati è mostrata in Figura 240.



Figura 238. Realizzazione dei pilastri e del solaio: vista dei casseri dei pilastri



Figura 239. Realizzazione dei pilastri e del solaio: vista dei casseri della trave in spessore



Figura 240. Realizzazione dei pilastri e del solaio: vista delle armature del solaio

In Figura 241, invece, vengono mostrate le barre filettate che saranno parzialmente annegate nel getto del solaio e che serviranno ad ancorare le piastre di acciaio che realizzano il sovraccarico sul solaio in fase di test su tavola vibrante.



Figura 241. Realizzazione dei pilastri e del solaio: vista delle bare filettate che emergono dal solaio

Una volta trascorso il tempo di maturazione del calcestruzzo armato, si è proceduto alla rimozione dei casseri e si è ottenuta la struttura mostrata in Figura 242.



Figura 242. Manufatto in cemento armato

Sul telaio in cemento armato mostrato in Figura 242 si sono quindi realizzate due tamponature, come mostrato in Figura 243. Il manufatto mostrato in quest'ultima è stato quindi sollevato mediante il carro ponte del laboratorio e posizionato sulla tavola vibrante.



Figura 243. Manufatto in cemento armato completo di tamponature in laterizio

7.2 Allestimento del provino

Al fine di ottimizzare i tempi delle prove sperimentali su tavola vibrante, massimizzando la quantità di risultati ottenuti, il provino è stato allestito con tre diverse soluzioni di facciata. Tutte le soluzioni proposte sono allineate con gli obiettivi del presente progetto, poiché si tratta di soluzioni a secco di rapida installazione, economiche ed energeticamente efficienti, quindi, particolarmente adatte per essere utilizzate nella riqualificazione degli edifici che caratterizzano il panorama nazionale. Inoltre, avendo ottenuto buoni risultati sia dalle simulazioni numeriche di sottostrutture sia in acciaio che in alluminio, è stato scelto l'alluminio come materiale del sistema realizzato in laboratorio essendo più leggero e non essendo vulnerabile rispetto ai fenomeni di ossidazione. Le soluzioni adottate sono le seguenti:

- parete ovest: sottostruttura in alluminio ancorata sia alla tamponatura in laterizio sia al cemento armato che sostiene un rivestimento esterno costituito da lastre in gres porcellanato a basso spessore. Le lastre sono vincolate alla sottostruttura mediante un sistema a graffe; fra il rivestimento esterno e la tamponatura è stato inserito anche uno strato di isolante termico;
- parete est: sottostruttura in alluminio ancorata sia alla tamponatura in laterizio sia al cemento armato che sostiene un rivestimento esterno costituito da pannelli in HPL (High Pressure decorative Laminate). Le lastre sono vincolate alla sottostruttura mediante un sistema a rivetti; fra il rivestimento esterno e la tamponatura è stato inserito anche uno strato di isolante termico;
- parete nord: sottostruttura in alluminio ancorata solo alla struttura in cemento armato (sistema *floor to floor*) che sostiene un rivestimento esterno costituito da lastre di grande formato in gres porcellanato a basso spessore. Le lastre sono vincolate alla sottostruttura mediante un sistema a incollaggio strutturale più ancoraggio meccanico retrolastra denominato "S1 Magnum"; fra il rivestimento esterno e la tamponatura a secco è stato inserito anche uno strato di isolante termico;
- parete sud: tale parete è stata lasciata aperta per consentire l'ispezione del manufatto.

Una vista in pianta del provino e di come ogni parete è stata allestita è mostrata in Figura 244.

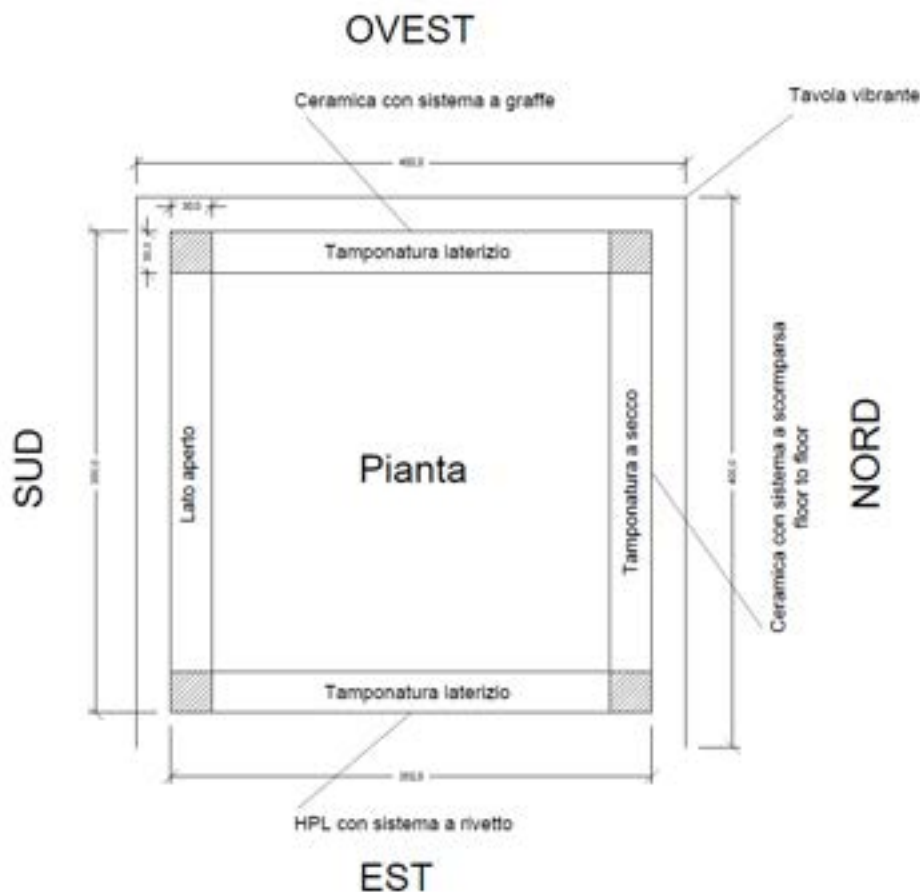


Figura 244. Vista in pianta del provino: allestimento delle pareti

La scelta di allestire le pareti come mostrato in Figura 244 è dovuta al fatto che i sistemi utilizzati risultano essere quelli maggiormente diffusi sul mercato nazionale. Inoltre, la configurazione di Figura 244 consente mediante una sola campagna di prove sperimentali di caratterizzare il comportamento al sisma di tutti e tre i sistemi precedentemente descritti, senza dover interrompere le prove per smontare e riallestire il provino. Infine, è importante osservare che il sistema *floor to floor* consente al contempo di studiare il comportamento delle lastre ceramiche di grande formato, oggi sempre più utilizzate, unitamente al loro sistema di ancoraggio alla sola parte strutturale. Tale sistema risulta essere particolarmente interessante nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici, poiché consente la demolizione di una tamponatura energeticamente poco efficiente, la sua ricostruzione rapida con un sistema a secco e l'installazione della facciata senza necessità di ancorare la sottostruttura alla nuova tamponatura a secco installata.

Tutte le soluzioni di facciata descritte sono state realizzate in stretta collaborazione con aziende leader nei rispettivi settori, al fine di testare soluzioni quanto più possibile vicine a quelle che si realizzano in opera. In particolare, le diverse tipologie di sottostruttura in alluminio sono state realizzate con la collaborazione di ETANCO Si.Cop. [4], azienda specializzata nel settore dei fissaggi e degli accessori per le coperture e le facciate sia tradizionali che ventilate. ETANCO Si.Cop [4] ha anche provveduto a fornire al laboratorio tavole vibranti quanto necessario a installare le sottostrutture in alluminio, fornendo anche supporto tecnico per la corretta posa in opera dei profili.

I rivestimenti ceramici e i sistemi di connessione ceramica-struttura metallica, invece, sono stati forniti da FLORIM S.p.A. S.B. [5], azienda leader mondiale nella produzione di gres porcellanato. Le caratteristiche

tecniche di tale materiale sono riportate in [6] per le lastre di spessore 6 mm utilizzate per allestire le pareti nord ed ovest.

A differenza delle pareti ovest e nord, sulla parete est il rivestimento esterno installato è costituito da pannelli in HPL (High Pressure decorative Laminate). In particolare, sono stati utilizzati i pannelli Max Compact Exterior qualità F prodotti da FunderMax GmbH [7] e forniti da Inpek S.r.l. [8], azienda nota in ambito nazionale ed internazionale per la distribuzione, la ricerca e la commercializzazione di pannelli architettonici per facciate ventilate e rivestimenti esterni. La stratigrafia dei pannelli HPL utilizzati è mostrata in maniera schematica in Figura 245, mentre il loro montaggio mediante rivettatura su una sottostruttura in alluminio è mostrato in Figura 246(a). La Figura 246(b), invece, mostra che i pannelli vengono montati predisponendo almeno un punto fisso per ciascuno, mentre i punti scorrevoli consentono piccoli movimenti e dilatazioni del pannello stesso, in modo da non sottoporlo ad uno stato di sforzo da essi potenzialmente causato.

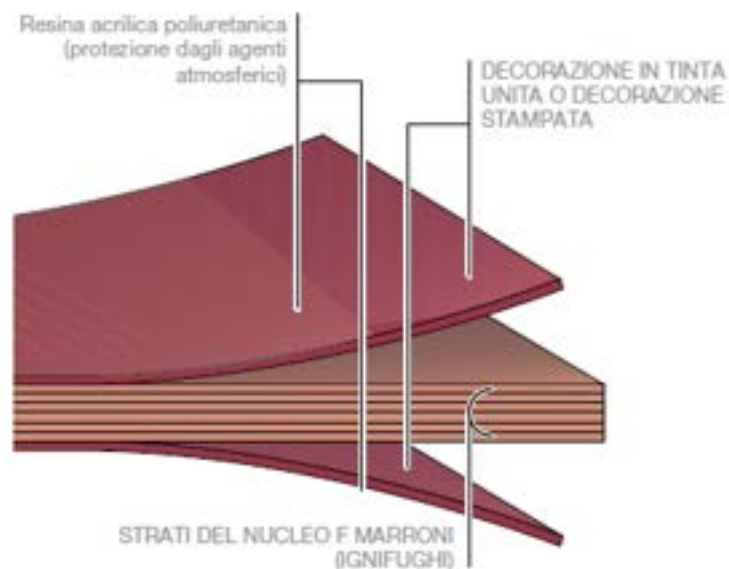


Figura 245. Pannello HPL Max Compact Exterior qualità F utilizzato nella parete est [8]

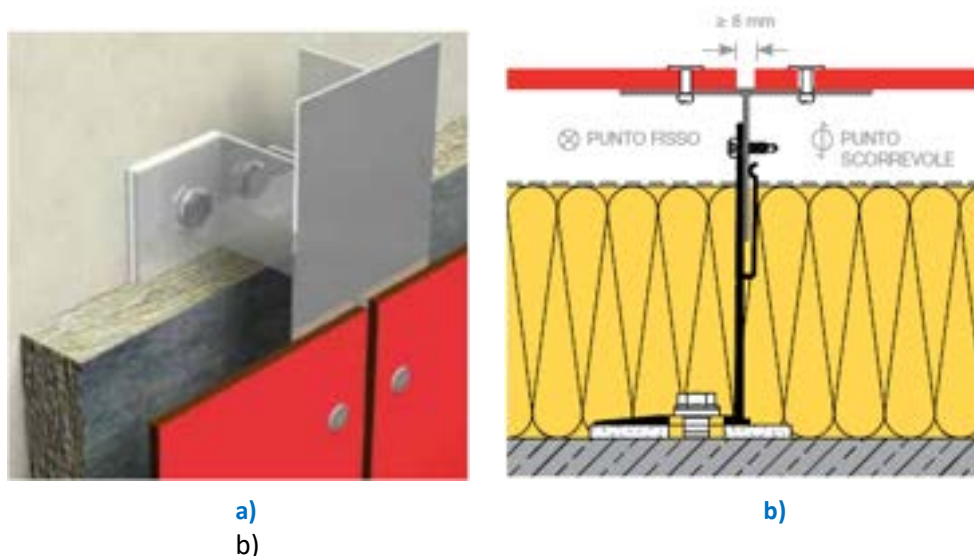


Figura 246. Montaggio dei pannelli in HPL tramite rivetti su una sottostruttura in alluminio [8]

I pannelli in HPL mostrati in Figura 245 vengono forniti di serie con nucleo ignifugo, superficie resistente ai raggi UV e agli agenti atmosferici [8] e per questo sono particolarmente adatti ad essere utilizzati per rivestire

in maniera durevole le facciate degli edifici. La protezione agli agenti atmosferici è garantita da resine acrilico-poliuretatiche con doppio indurimento applicate con presse meccaniche mediante l'azione combinata di pressione e calore. Inoltre, dal punto di vista della sostenibilità ambientale, i pannelli in HPL Max Compact Exterior sono costituiti per il 65% in peso da fibre naturali ricavate dal legno, opportunamente trasformato in carta *kraft* [8]. Il legno utilizzato può essere quello derivante dagli scarti di lavorazione delle segherie, che viene quindi recuperato per realizzare i pannelli in HPL. Per quanto riguarda lo smaltimento, i trucioli di lavorazione non sono nocivi per la salute e lo smaltimento termico in impianti adeguati non comporta l'immissione di sostanze velenose nell'ambiente [8].

La sottostruttura in alluminio è stata ancorata al provino utilizzando tasselli forniti da Friulsider S.p.A., azienda di primaria importanza nel panorama internazionale nel campo dei fissaggi di sicurezza, presente nel mercato da oltre 50 anni. In particolare, il fissaggio fra la sottostruttura e le parti in cemento armato è stato realizzato mediante tasselli pesanti del tipo FM-753 crack A4 di dimensioni M10x90 mm [9]. Le caratteristiche di tale tassello sono riportate in Figura 247 e in Tabella 35.

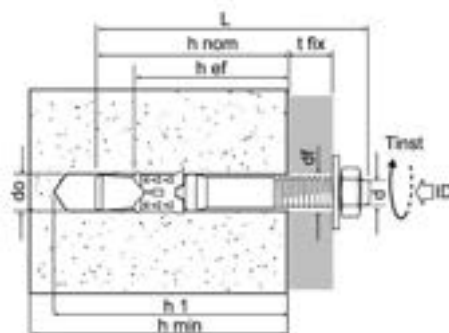


Figura 247. Caratteristiche geometriche del tassello pesante FM-753 crack A4 [9]

Tabella 35. Caratteristiche del tassello pesante FM-753 crack A4 [9]

Tipo dxL	Tfix [mm]	do [mm]	h1 [mm]	hnom [mm]	hef [mm]	df [mm]	hmin [mm]	Tinst [Nm]
M10x90	10	10	80	67	60	12	120	40

Per quanto riguarda invece il fissaggio dei profili in alluminio alla tamponatura in laterizio, sono stati utilizzati tasselli chimici (Friulsider Injection System KEM H [10]) con barre filettate del tipo M10x110 mm (dxL in Figura 248).

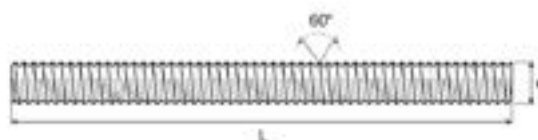


Figura 248. Caratteristiche geometriche della barra filettata utilizzata per il tassello chimico [10]

I tasselli chimici sono stati utilizzati nelle pareti ovest ed est, dove è presente la tamponatura in laterizio, mentre sulla parete nord sono stati utilizzati solo i tasselli meccanici ancorati al calcestruzzo armato.

I paragrafi a partire dal 7.3 descrivono nel dettaglio le caratteristiche di ogni soluzione di facciata adottata e mostrano alcune immagini delle fasi di installazione, oltre alle viste delle pareti finite.

7.3 Allestimento del provino: parete ovest, ceramica con sistema a graffe

La parete ovest del manufatto è stata allestita con una soluzione di parete finita esternamente con delle lastre in ceramica fornite da FLORIM S.p.A. S.B. [6] (vedi paragrafo 7.2). Le lastre in ceramica sono fissate alla sottostruttura in alluminio, fornita da ETANCO Si.Cop, mediante un sistema a graffe. Gli ancoraggi della sottostruttura al cemento armato sono stati realizzati mediante tasselli meccanici pesanti del tipo FM-753 crack A4 di dimensioni M10x90 mm, mentre gli ancoraggi alla tamponatura in laterizio sono stati realizzati mediante tasselli chimici M10x110 mm (vedi paragrafo 7.2). I disegni tecnici esecutivi che mostrano una vista di prospetto e laterale della parete ovest sono riportati in Figura 249.

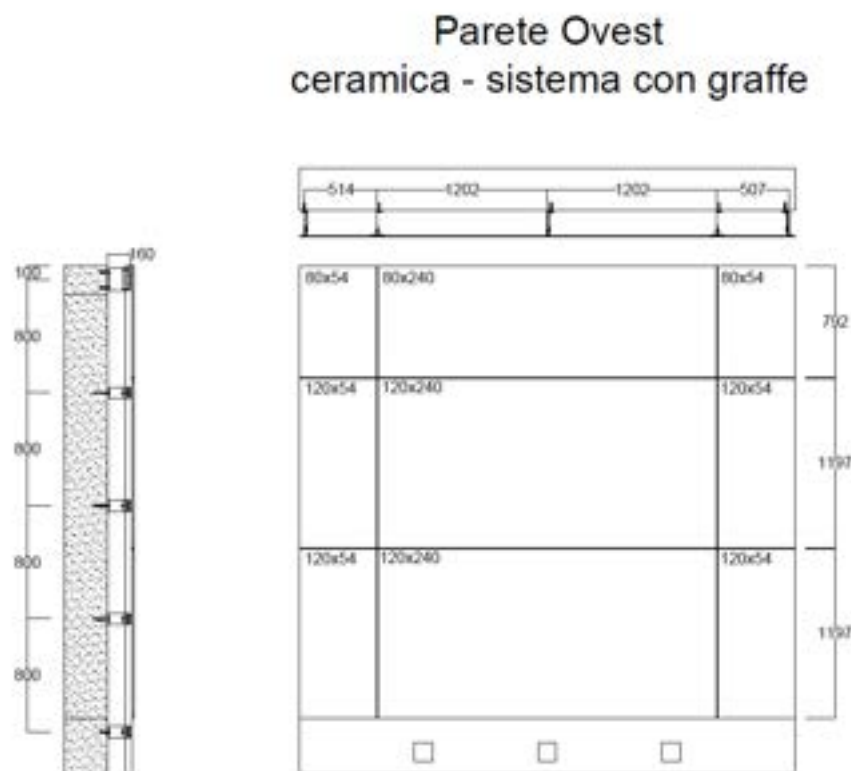


Figura 249. Disegno esecutivo della facciata della parete ovest: ceramica-sistema con graffe

La sottostruttura della parete ovest si compone di profili in alluminio ad L e a T, assemblati come mostrato schematicamente in Figura 250 (a) e (b).

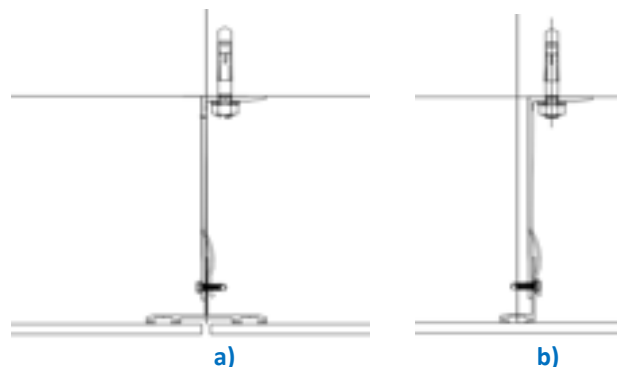


Figura 250. Disegno esecutivo facciata della parete ovest: dettaglio giunzione profili a T (a) e ad L (b)

Il sistema con cui la parete ovest è stata allestita si compone, nel dettaglio, delle seguenti parti:

- profilo alluminio a L 26/54 mm spessore 2 mm;
- profilo alluminio a T 94/54 mm spessore 2 mm;
- staffa alluminio 160x160 mm (ancorata alla trave di sommità in cemento armato);
- staffa alluminio 80x160 mm (ancorata al laterizio e alla trave di fondazione);
- vite autoperforante inox A2 5.5x25 mm;
- tassello pesante inox A4 M10x90 crack (utilizzato per gli ancoraggi meccanici al cemento armato);
- barretta in inox A2 M10x110 (utilizzato per gli ancoraggi chimici al laterizio);
- bussola retinata in plastica 15x85, foro 16 mm (utilizzata per gli ancoraggi chimici al laterizio);
- chimico ibrido senza stirene 420 ml;

Alcune viste che mostrano l'installazione dei profili verticali in alluminio sulla parete ovest sono riportate in Figura 251 (a) e (b), mentre la Figura 193 mostra un dettaglio dell'ancoraggio del profilo verticale alla tamponatura in laterizio e alla trave di fondazione.



a)



b)

Figura 251. Parete ovest: viste del sistema di facciata in costruzione



Figura 252. Parete ovest: ancoraggio dei profili metallici verticali

In Figura 253 invece viene mostrata la fase di installazione del rivestimento ceramico. In tale figura si osserva che, dopo l'installazione della sottostruttura in alluminio, è stato anche installato uno strato di isolante termico.



Figura 253. Parete ovest: posa dell'isolante e installazione delle lastre ceramiche di rivestimento

Un dettaglio del sistema a griffe che vincola le lastre in gres porcellanato alla sottostruttura è riportato in Figura 254, nella quale sono anche visibili i *markers* sferici utilizzati dal sistema 3Dvision del laboratorio per il monitoraggio degli spostamenti durante i test su tavola vibranti (vedi paragrafo 8.3).

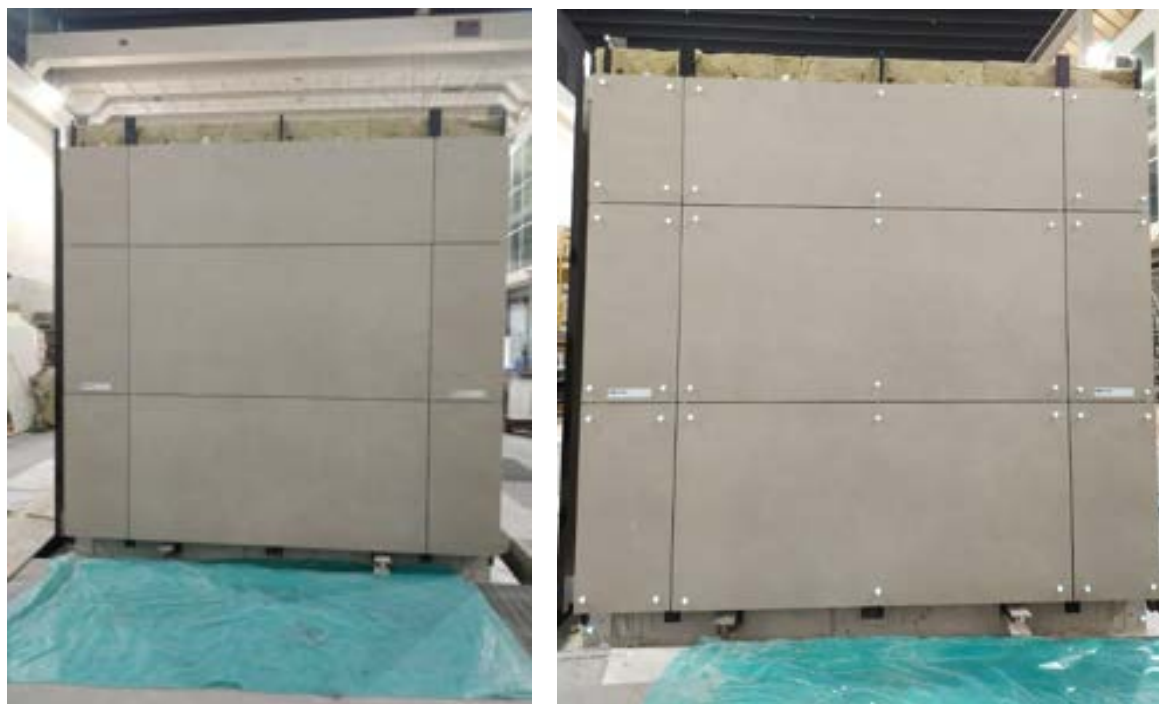


a)

b)

Figura 254. Parete ovest: dettaglio del sistema a graffe e posizionamento dei markers

Una vista della parete ovest finita è riportata in Figura 255 (a), mentre in Figura 255 (b) si evidenziano le posizioni dei markers utilizzati per il monitoraggio degli spostamenti durante le prove su tavola vibrante. In questa figura i markers risultano ben visibili in bianco poiché riflettono la luce del flash fotografico.



a)

b)

Figura 255. Parete ovest: vista della parete finita (a) e dei markers utilizzati per le prove (b)

7.4 Allestimento del provino: parete est, HPL con sistema a vista con rivetto

La parete est del manufatto è stata allestita con una soluzione di parete finita esternamente con pannelli in HPL del tipo Max Compact Exterior qualità F prodotti da FunderMax GmbH e forniti da Inpek S.r.l. [8] (vedi paragrafo 7.2). Gli ancoraggi della sottostruttura in alluminio al cemento armato sono stati realizzati anche in questo caso mediante tasselli meccanici pesanti del tipo FM-753 crack A4 di dimensioni M10x90 mm, mentre gli ancoraggi alla tamponatura in laterizio sono stati realizzati mediante tasselli chimici M10x110 mm (vedi paragrafo 7.2)). I disegni tecnici esecutivi che mostrano una vista di prospetto e laterale della parete est sono riportati in Figura 256.



Figura 256. Disegno esecutivo facciata della parete est: HPL-sistema a vista con rivetto

In questo caso, a differenza del sistema a griffe descritto per la parete ovest (vedi paragrafo 7.3), il fissaggio dei pannelli in HPL alla sottostruttura in alluminio è stato realizzato mediante rivettatura, come mostrato nei disegni tecnici di dettaglio in Figura 257 (a) e (b).

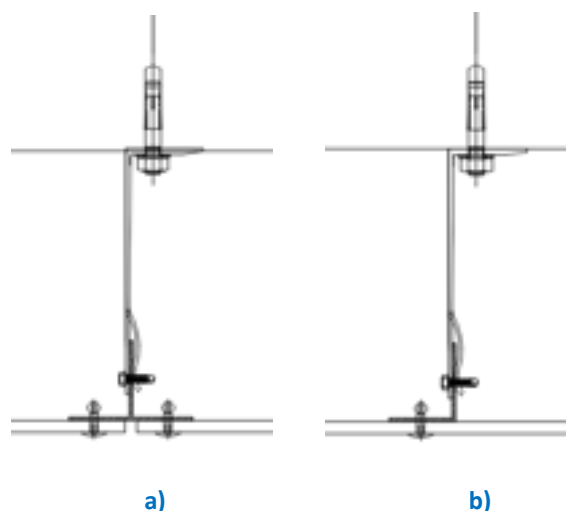


Figura 257. Disegno esecutivo facciata della parete est: dettaglio rivettatura profili a T (a) e ad L (b)

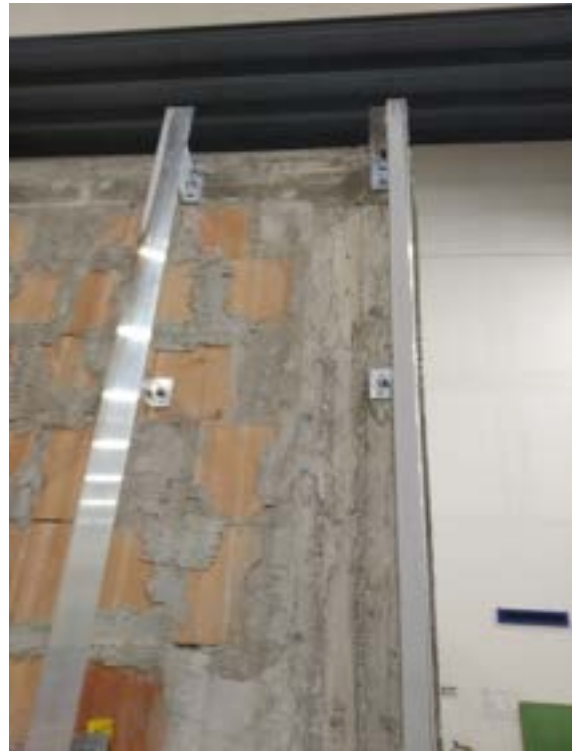
Il sistema con cui la parete est è stata allestita si compone, nel dettaglio, delle seguenti parti:

- profilo alluminio a L 3.3 m 50/42 spessore 2 mm;
- profilo alluminio a T 3.3 m 80/52 spessore 2 mm;
- staffa alluminio 160x160 mm;
- staffa alluminio 80x160 mm;
- vite autoperforante inox A2 5.5x25 mm;
- tassello pesante inox A4 M10x90 crack (utilizzato per gli ancoraggi meccanici al cemento armato);
- barretta in inox A2 M10x110 (utilizzato per gli ancoraggi chimici al laterizio);
- chimico ibrido senza stirene 420 ml;
- rivetto 4.8x18 alluminio/inox testa larga 16 mm;
- boccia in neoprene diametro 9.2 mm per rivetti;

Alcune viste che mostrano l'installazione dei profili verticali in alluminio sulla parete est sono riportate in Figura 258 (a) e (b).



a)



b)

Figura 258. Parete est: installazione dei profili verticali (a) e vista di dettaglio dei loro ancoraggi (b)

La Figura 259 (a) mostra il dettaglio dell'ancoraggio della staffa in alluminio al pilastro in cemento armato, mentre la Figura 259 (b) come si presenta tale dettaglio una volta interposto lo strato di isolante termico.



a)



b)

Figura 259. Parete est: dettaglio dell'ancoraggio della staffa al c.a. (a) e posa dell'isolante (b)

La fase di installazione dei pannelli in HPL sulla sottostruttura in alluminio è mostrata in Figura 260, mentre in Figura 261 (a) e (b) vengono mostrati in dettaglio i rivetti in opera secondo una vista frontale e dal retro, rispettivamente.



Figura 260. Parete est: installazione dei pannelli in HPL



a)

b)

b)

Figura 261. Rivettatura pannelli HPL: vista da dietro (a) e da davanti (b)

Una vista della parete est finita è riportata in Figura 262(a), mentre in Figura 262(b) si evidenziano le posizioni dei *markers* utilizzati per il monitoraggio degli spostamenti durante le prove su tavola vibrante. In figura i *markers* risultano ben visibili in bianco poiché riflettono la luce del *flash* fotografico.



Figura 262. Parete est: vista della parete finita (a) e dei *markers* utilizzati per le prove (b)

7.5 Allestimento del provino: parete nord, ceramica con sistema a scomparsa S1 Magnum su sistema floor to floor

La parete nord del manufatto, come nel caso della parete ovest, è stata allestita con una soluzione di parete finita esternamente con delle lastre in ceramica fornite da FLORIM S.p.A. S.B. [6] (vedi paragrafo 7.2), ma in questo caso sono state adottate lastre ceramiche di grande formato ed è quindi anche stata modificata completamente la sottostruttura in alluminio che le sostiene. Nella parete nord, infatti si è deciso di adottare il sistema brevettato FLORIM denominato “FLORIM MAGNUM S1” montato su un sistema *floor to floor* di ETANCO Si.Cop. [4].

Il kit per rivestimenti esterni di facciata “FLORIM MAGNUM S1” consiste in un sistema di rivestimento esterno, fissato meccanicamente alla sottostruttura, che può essere ancorata a facciate esterne sia di edifici esistenti che di nuova costruzione [11]. Gli elementi di rivestimento risultano fissati meccanicamente alla sottostruttura mediante uno speciale sistema di ancoraggio (agganci di ritenuta in acciaio inossidabile click-up) alloggiati in una fresatura apposita realizzata sulla parte posteriore delle lastre di rivestimento [11]. Il sistema di facciata “FLORIM MAGNUM S1” consiste nei componenti elencati in Tabella 36, mentre ne viene mostrata una vista tridimensionale in Figura 263.

Tabella 36. Componenti del sistema FLORIM MAGNUM S1 [11]

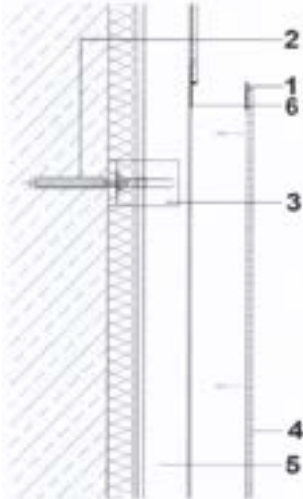
<ol style="list-style-type: none"> 1. Aggancio di ritenuta click-up-F6 2. Ancoraggio al supporto 3. Staffa 4. Lastra ceramica di rivestimento 5. Profilo verticale 6. Placca intermedia di sicurezza PL-CLICK 04-BK 	
---	--



Figura 263. Render 3D del sistema FLORIM MAGNUM S1 [11]

Fra le lastre in gres porcellanato e il montante in alluminio è interposto un doppio cordone adesivo con funzione antivibrante, mentre sul retro di ogni lastra ceramica è installata una rete di sicurezza. L’adesivo strutturale impiegato è denominato “SikaTack – Panel System” ed è un poliuretano monocomponente di consistenza pastosa adatto ad essere utilizzato per giunti strutturali in facciate ventilate [12]. L’adesivo polimerizza con l’esposizione all’umidità atmosferica. Alcuni dati tecnici che caratterizzano il prodotto sono riportati in Tabella 37.

Tabella 37. Caratteristiche dell'adesivo strutturale SikaTack [12]

Base Chimica	Poliuretano monocomponente
Meccanismo di indurimento	Polimerizzazione con umidità atmosferica
Densità	1.1 kh/l
Tixotropia	Buona
Temperatura di applicazione	5-40 °C
Tempo di formazione pelle	35 minuti
Durezza shore A	45
Resistenza a trazione	2.5Mpa
Allungamento a rottura	500%
Resistenza alla propagazione di taglio	7 N/mm
Temperatura di servizio	-40 – 90

Poiché in questo caso l'ancoraggio avviene solo in corrispondenza delle travi in cemento armato, sono stati utilizzati solo i tasselli meccanici pesanti del tipo FM-753 crack A4 di dimensioni M10x90 mm. I disegni tecnici esecutivi che mostrano una vista di prospetto e laterale della parete nord sono riportati in Figura 264.

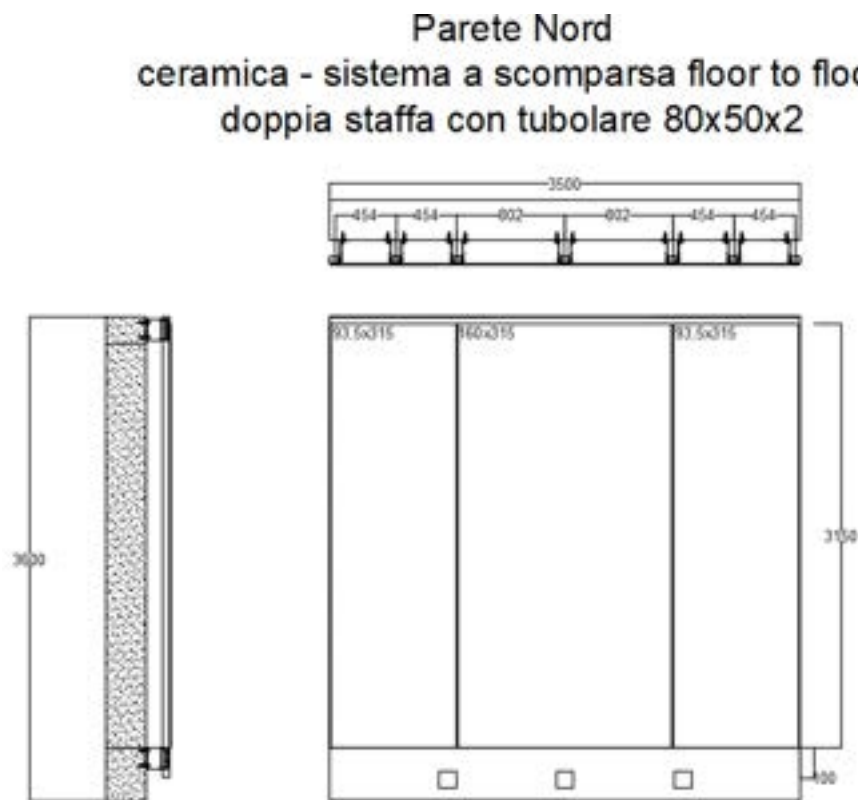


Figura 264. Disegno esecutivo facciata della parete nord: ceramica-sistema a scomparsa floor to floor

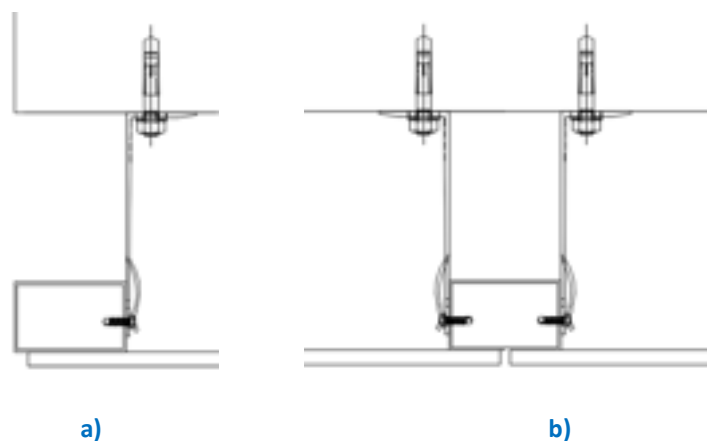


Figura 265. Disegno esecutivo facciata della parete nord: dettaglio collegamento al bordo (a) e fra due lastre (b)

Il sistema con cui la parete nord è stata allestita si compone, delle seguenti parti:

- profilo rettangolare in alluminio 80x50 spessore 2 mm lunghezza 3.5 m;
- staffa alluminio 160x160 mm;
- vite autoperforante inox A2 5.5x25 mm;
- tassello pesante inox A4 M10x90 crack (utilizzato per gli ancoraggi meccanici al cemento armato).

Alcune viste che mostrano l'installazione dei profili verticali in alluminio sulla parete nord sono riportate in Figura 266 (a) e (b).



Figura 266. Parete nord: installazione dei profili verticali (a) e vista di dettaglio dei loro ancoraggi (b)

Nella parete nord è stata inoltre installata una tamponatura a secco, fornita da IRONDON [13], azienda di rilevanza nazionale che vanta una lunga esperienza settore delle costruzioni a secco. La stratigrafia della tamponatura a secco installata sulla parete nord è mostrata in Figura 267.

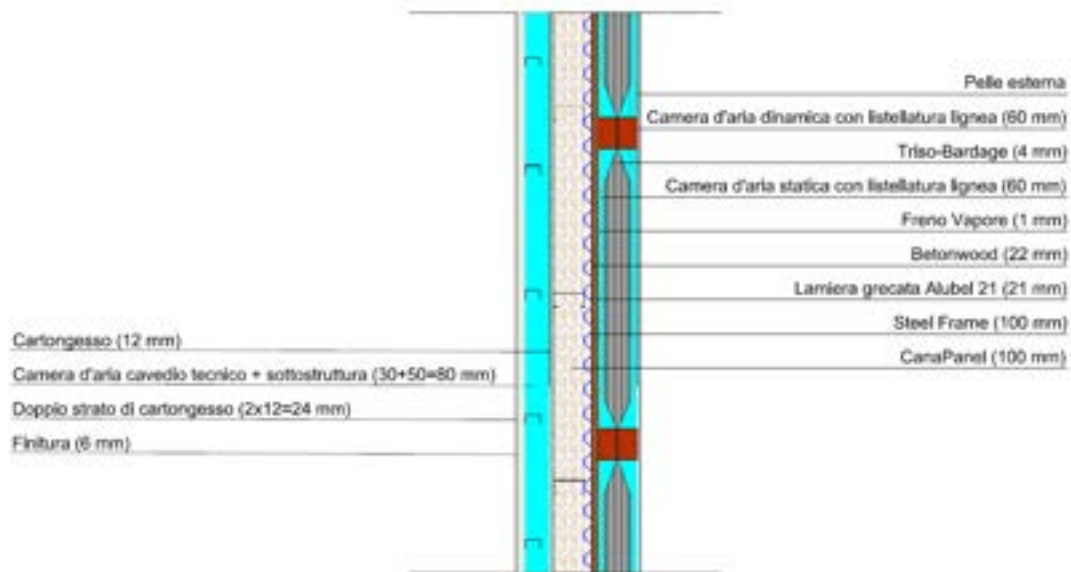


Figura 267. Parete nord: stratigrafia della tamponatura a secco

Dalla Figura 267 è importante osservare che il lato interno, composto dal doppio strato di cartongesso vincolato alla sottostruttura in alluminio, è vincolato alla struttura solo perimetralmente e non è collegato agli strati adiacenti della tamponatura. Tale messa in opera garantisce un adeguato isolamento acustico, poiché disaccoppia i due pacchetti ostacolando la diffusione delle onde sonore.

Il contributo maggiore alla trasmittanza termica in termini di riduzione dalle dispersioni è dato dallo strato di canapa. La canapa, infatti, non è solo un materiale isolante di alta qualità, ma è anche un materiale sostenibile, ovvero una risorsa rinnovabile a ciclo annuale capace di contribuire a ridurre i livelli di CO_2 durante la sua fase di crescita [14]. Alcune caratteristiche termofisiche del pannello CanaPanel utilizzato sono riportate in Tabella 38.

Tabella 38. Proprietà del pannello in canapa CanaPanel [14]

Proprietà	Valore
Densità	35.5 kg/m^3
Conducibilità termica	0.04 W/mK
Calore specifico	1800 J/kgK

Sulla superficie rivolta verso l'ambiente esterno del pannello isolante in canapa viene posata una lamiera grecata in acciaio denominata "Alubel 21" [15], vincolata a profili a C in acciaio "CFS A-100" riportati in Figura 8. Tali profili realizzano il collegamento fra la lamiera grecata (posta all'esterno) e il pannello di cartongesso da 12 mm (posto all'interno). La lamiera grecata migliora le prestazioni sismiche del sistema poiché conferisce rigidità alla parete, mentre il pannello di cartongesso ha la funzione di contenere l'isolante, di fornire supporto per gli impianti ed opportunamente sigillato perimetralmente contribuisce anche alla tenuta all'aria dell'ambiente interno.

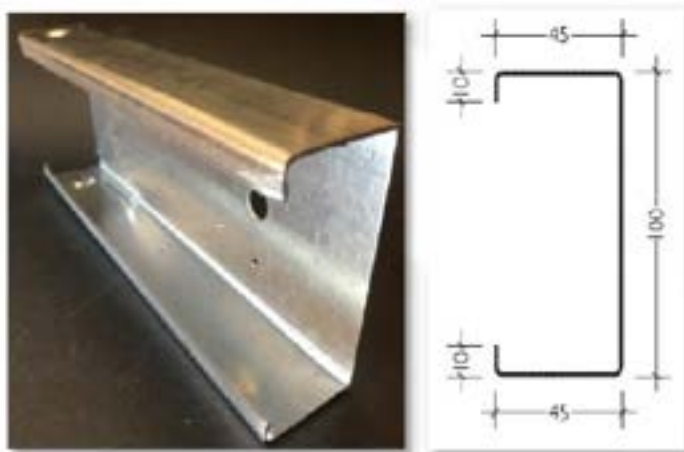


Figura 268. Profili in acciaio formati a freddo CFS A-100

L'inerzia termica della parete a secco viene garantita dallo strato di pannelli BetonWood [16], azienda leader nella produzione di pannelli in cementolegno ad elevata densità, durezza, resistenza al fuoco, agli urti e agli agenti atmosferici. Tali pannelli sono realizzati miscelando cemento Portland con fibre di legno di Pino. Questa composizione conferisce ai pannelli una elevata densità, che li rende particolarmente adatti per ottenere alti livelli di sfasamento termico. Inoltre, i pannelli sono composti da materia riciclata e rispettano i Criteri Ambientali Minimi (CAM) [16]. Si riportano in Tabella 39 alcune caratteristiche termofisiche del cementolegno BetonWood [16].

Tabella 39. Proprietà del cementolegno BetonWood [16]

Proprietà	Valore
Densità	1350 kg/m ³
Conducibilità termica	0.26 W/mK
Calore specifico	1880 J/kgK

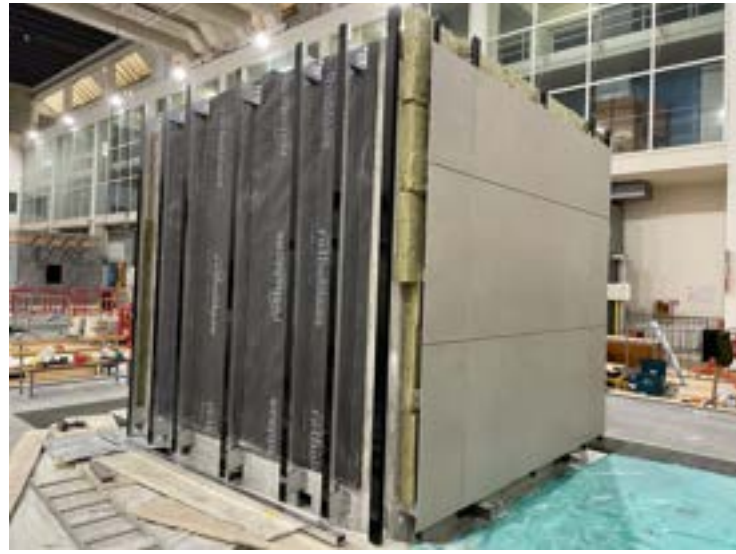
Esternamente al pannello in cementolegno viene posato un telo con la funzione di schermo freno al vapore del tipo Rhothoblaas Vapor 150 [17]. Infine, l'ultimo strato di isolante (il più esterno) messo in opera è il Triso-Bardage [18], un isolante riflettente alveolare (resistenza termica R=3.80 m²K/W) ideale per ridurre i ponti termici e le infiltrazioni di d'aria. Questo strato di isolante viene posato sopra ad una sottostruttura lignea che realizza una camera d'aria fra l'isolante stesso e lo strato di cementolegno.

La tamponatura a secco così come mostrata in Figura 208 è caratterizzata da una trasmittanza pari a circa 0.165 W/(m²K), valore ben al di sotto dei limiti della normativa (D.M. 6 agosto 2020 – Gazzetta Ufficiale 05/10/2020 n. 246) che disciplina i requisiti tecnici per l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici, per tutte le zone climatiche.

Alcune fasi dell'installazione della tamponatura a secco sono mostrate in Figura 269 (a) e (b). Quest'ultima mostra una vista dall'esterno della tamponatura finita, una volta installati anche i montanti verticali del sistema "FLORIM MAGNUM S1" installato sul sistema floor to floor ETANCO Si.Cop. [4].



a)



b)

Figura 269. Parete nord: montaggio della tamponatura a secco (a) e vista esterna della parete prima della posa del rivestimento ceramico (b)

La parete nord finita e quindi completa anche del rivestimento ceramico esterno è mostrata in Figura 270.



Figura 270. Parete nord: vista della parete finita

7.6 Configurazione finale del provino

Una volta completata la costruzione del provino e l'allestimento delle sue pareti ovest, est e nord, il manufatto si presenta come mostrato in Figura 271 e in Figura 272.



Figura 271. Vista delle pareti ovest (a destra) e nord (a sinistra) del provino finito



Figura 272. Vista delle pareti nord (a destra) ed est (a sinistra) del provino finito

Una vista dall'interno della tamponatura a secco finita è invece mostrata in Figura 273.



Figura 273. Vista dal lato aperto (sud) della tamponatura a secco IRONDON

Per ogni parete è stato calcolato il peso totale del sistema di supporto in alluminio e la sua incidenza per unità di superficie rivestita. Inoltre, è stato anche calcolato il peso dei soli profili utilizzati, sottraendo al peso totale del sistema il peso delle staffe utilizzate per gli ancoraggi. I valori ottenuti per ogni parete sono riportati in Tabella 40.

Tabella 40. Peso del sistema di supporto

Parete	Descrizione	Peso totale del sistema di supporto in alluminio [kg]	Peso dei soli profili di supporto in alluminio [kg]	Peso del sistema di supporto in alluminio al m ² [kg/m ²]
ovest	ceramica con sistema a graffe	13.8	10.4	1.1
est	HPL sistema rivetto a vista	15.4	11.3	1.2
nord	ceramica con sistema a scomparsa S1 Magnum su sistema <i>floor to floor</i>	35.3	32.6	2.9

Come si può osservare in Tabella 40Tabella , la soluzione con il peso maggiore è quella installata sulla parete nord. Questo accade poiché i profili che realizzano il sistema *floor to floor* sono ancorati solo alla trave di fondazione e a quella di sommità. La mancanza degli appoggi intermedi sul laterizio fanno sì che le dimensioni dei profili aumentino e che aumenti, conseguentemente, la loro massa. È molto interessante osservare che il peso della soluzione installata sulla parete nord (pari a 32.6 kg per i soli profili) è significativamente vicino a quello ottenuto per il caso 2.e descritto nella sezione dedicata ai risultati delle analisi numeriche (pari a 35 kg, vedi Tabella 33). Le due configurazioni sono infatti molto simili fra loro. Considerando le ipotesi semplificative adottate per effettuare le analisi numeriche preliminari (paragrafo 6), è comunque importante notare come il risultato preliminare ottenuto per il caso 2.e fosse già significativamente vicino alla soluzione adottata e installata sul provino.

Per quanto riguarda invece le pareti ovest ed est è inoltre interessante osservare che il peso della sottostruttura rapportato alla superficie di facciata coperta raggiunge valori nell'ordine di 1 kg/m^2 e paragonabili per le due soluzioni, essendo pari a 1.1 kg/m^2 per la parete ovest e 1.2 kg/m^2 per la parete est.

8 Prove sperimentali su tavola vibrante

Le prove sperimentali su tavola vibrante costituiscono la principale e più affidabile tecnica sperimentale in grado di riprodurre le condizioni delle sollecitazioni generate da una forzante sismica su un prototipo rappresentativo di una struttura reale. Si tratta, infatti, di un impianto capace di riprodurre su una grande piastra il movimento del terreno o del pavimento dovuto a un evento sismico o di qualsivoglia vibrazione ricadente all'interno dei limiti di funzionamento dettati dalle caratteristiche tecniche dell'impianto.

Date le rilevanti difficoltà di realizzare in scala ridotta questo tipo di sperimentazioni in modo da riprodurre le condizioni reali di sollecitazioni strutturali, sono di particolare pregio le tavole vibranti di grandi dimensioni, tali da permettere di studiare il fenomeno in scala reale o comunque in scala non troppo ridotta. Un altro aspetto di particolare pregio di questo tipo di impianti è quello di poter imporre l'eccitazione sismica in tutte e tre le direzioni spaziali (triassiali), così come effettivamente si riscontra nella registrazione di un terremoto reale. Infatti, esistono impianti molto grandi in grado di eseguire movimenti in una sola direzione (monoassiali) o in due direzioni (biassiali), mentre è più oneroso e impegnativo realizzare un impianto delle stesse dimensioni con capacità di controllare movimenti triassiali. I macchinari più pregiati sono concepiti con una architettura tale da poter realizzare tutti e 6 i possibili gradi di libertà (traslazioni in tutte e tre le direzioni e rotazioni intorno a tutti e tre gli assi).

8.1 Caratteristiche delle tavole vibranti di ENEA

La sperimentazione sismica è effettuata tramite gli impianti e le apparecchiature della Hall sismica del laboratorio SSPT-MET-DISPREV presso l'edificio F65 del Centro Ricerche ENEA di Casaccia. Il laboratorio dispone di grandi attrezzature sperimentali per effettuare, in particolare, qualifiche meccaniche dinamiche e sismiche, nonché attività di ricerca nel campo dell'ingegneria sismica e nello studio degli effetti delle vibrazioni in generale.

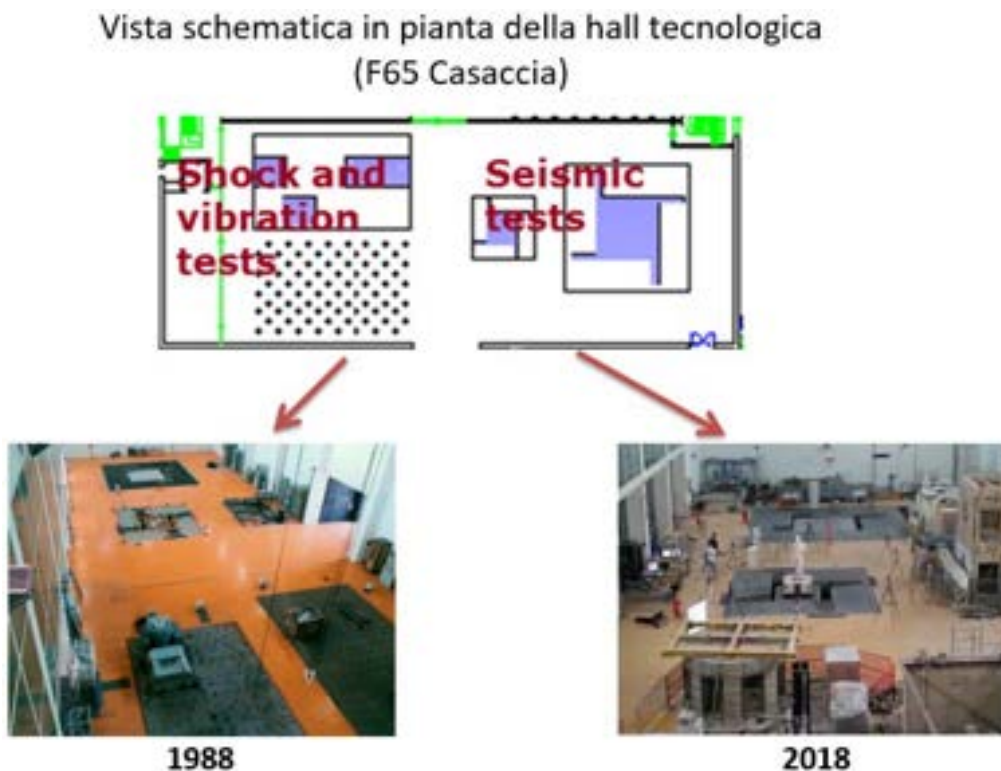


Figura 274. Vista schematica in pianta della hall sismica dell'ENEA (in alto) e due viste panoramiche: all'inaugurazione dell'impianto (in basso a sinistra) e oggi (in basso a destra)

Il laboratorio dispone di due tavole vibranti a 6 Gradi Di Libertà (6GDL), tra le più grandi d'Europa (Figura 274), le quali consentono di effettuare prove sismiche triassiali per qualifica sismica di componenti e sistemi, nonché lo studio e la sperimentazione di nuove tecnologie e nuovi materiali per la protezione sismica di manufatti civili, industriali e storico/monumentali. Le prove su tavola vibrante possono riprodurre i reali campi di sollecitazione nelle strutture sottoposte ad esame. Le prove su tavola vibrante possono essere condotte secondo le procedure e con i carichi previsti dalle principali normative e standard internazionali. Di seguito si riportano nella Tabella 41 le principali caratteristiche tecniche delle due tavole vibranti.

Tabella 41. Principali caratteristiche tecniche delle due tavole vibranti della hall sismica dell'ENEA

Parameter	System 1	System 2
Table size	4 x 4 [m]	2 x 2 [m]
Degrees of Freedom	6	6
Frequency range	0-50 [Hz]	0-100 [Hz]
Acceleration	3g peak	5g peak
Velocity	0.5 m/s (0-peak)	1 m/s (0-peak)
Displacement	0.125 m (0-peak)	0.15 m (0-peak)
Specimen Mass	30 [t]	5 [t]

Le prove sismiche eseguite nel presente progetto sono state effettuate con la tavola più grande, di 4 x 4 m di dimensione (indicata come System 1 in Tabella 41). In Figura 275 si mostra uno spaccato della suddetta tavola vibrante in cui si vede lo schema alla base del funzionamento, con gli attuatori dotati di pistoni alimentati da un circuito oleo-dinamico collegato alla sala pompe dell'impianto. Gli attuatori scaricano la spinta su una massa di reazione, costituita da un enorme blocco di cemento armato che si sviluppa tutto intorno alla tavola vibrante e isolato sia orizzontalmente, tramite opportuno taglio a pavimento, che verticalmente tramite isolatori pneumatici in pressione posti alla base.

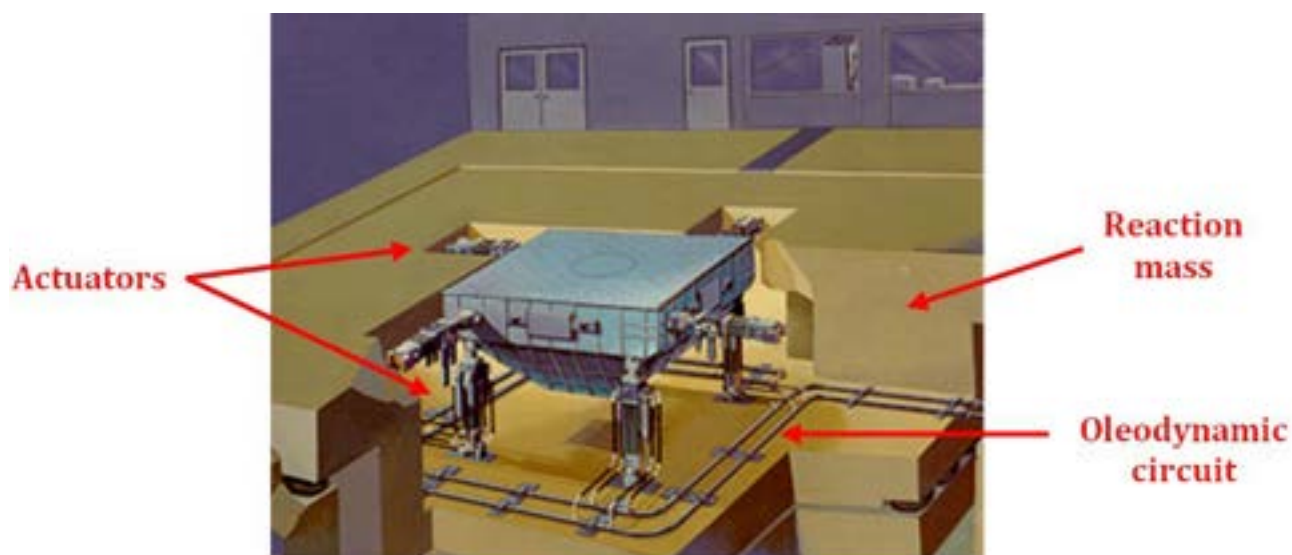


Figura 275. Spaccato della tavola vibrante 4 x 4 m della hall sismica dell'ENEA

8.2 Descrizione delle prove su tavola vibrante

Le prove su tavola vibrante sono state eseguite somministrando una sequenza di input sismici alla base del provino una volta allestite sul solaio le masse aggiuntive, fissato il cordolo di base alla tavola (prove a base fissa) e installata la strumentazione di misura (vedi paragrafo 8.3).

La sequenza dei test sismici si basa su tre input di riferimento: un input sismico naturale (lo stesso usato per le analisi dinamiche con modello numerico, descritto al paragrafo 5.2) e due input di tipo sintetico. I segnali utilizzati in input sono di tre tipologie diverse:

- l'input sismico naturale è estratto dalla registrazione della stazione sismica presso Amatrice (AMT) della scossa de 24 agosto 2016. Nella sequenza di prova è indicato con "amt" (vedi Figura 8 e Figura 9);
- il primo input sintetico è una vibrazione di tipo sismico costruita artificialmente con durata effettiva di 25 s e un contenuto spettrale concentrato nell'intervallo 7-20 Hz (nella Figura 276 è mostrata la relativa storia temporale e in Figura 277 è mostrato lo spettro in termini di PSD del segnale): nella sequenza di prova è indicato con "sint";
- il secondo input sintetico è una vibrazione di tipo sismico costruita artificialmente con durata effettiva di 30 s e un contenuto spettrale concentrato nell'intervallo 10-40 Hz (nella Figura 278 è mostrata la relativa storia temporale e in Figura 279 è mostrato lo spettro in termini di PSD del segnale): nella sequenza di prova è indicato con "sint_10-40_Hz".

Ognuno dei tre suddetti input sismici è fornito alla base del provino a step di intensità crescenti fino a raggiungere i limiti di funzionamento dell'impianto o rottura del provino. Inoltre, ogni test sismico è preceduto e seguito da un test di caratterizzazione dinamica costituito da una vibrazione con spettro piatto (rumore bianco) nell'intervallo 0-35 Hz, a bassa intensità (0.05 g di PGA) con durata di 1 min (nella Figura è mostrata la relativa storia temporale e in Figura 281 è mostrato lo spettro in termini di PSD del segnale): nella sequenza di prova è indicato con "random". La sequenza completa è illustrata nel paragrafo 5.4 con le annotazioni sul comportamento del provino.

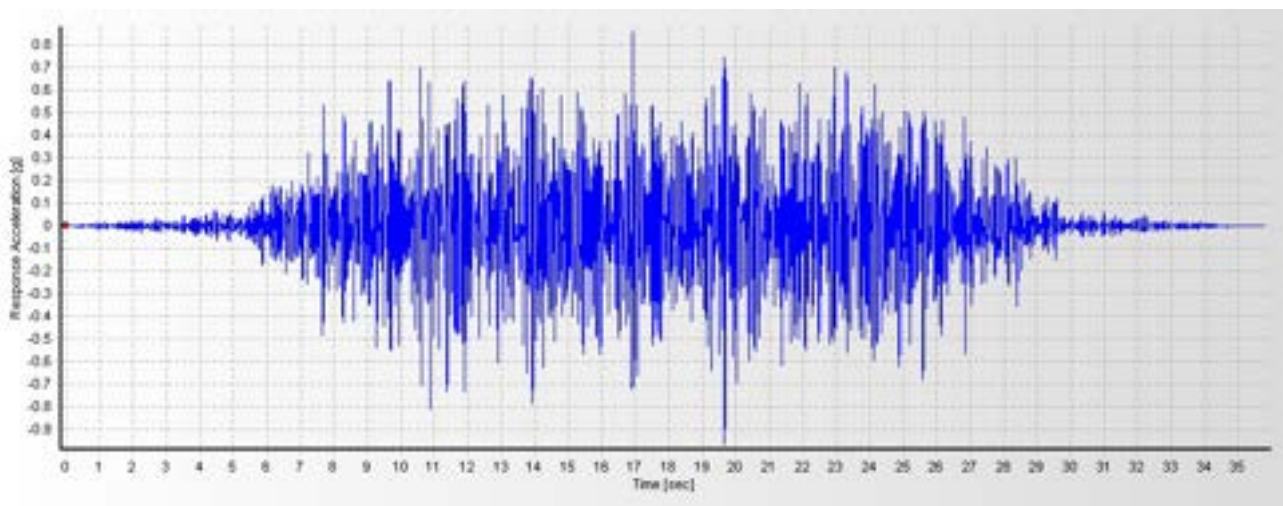


Figura 276. Storia temporale dell'input sismico sintetico denominato "sint"

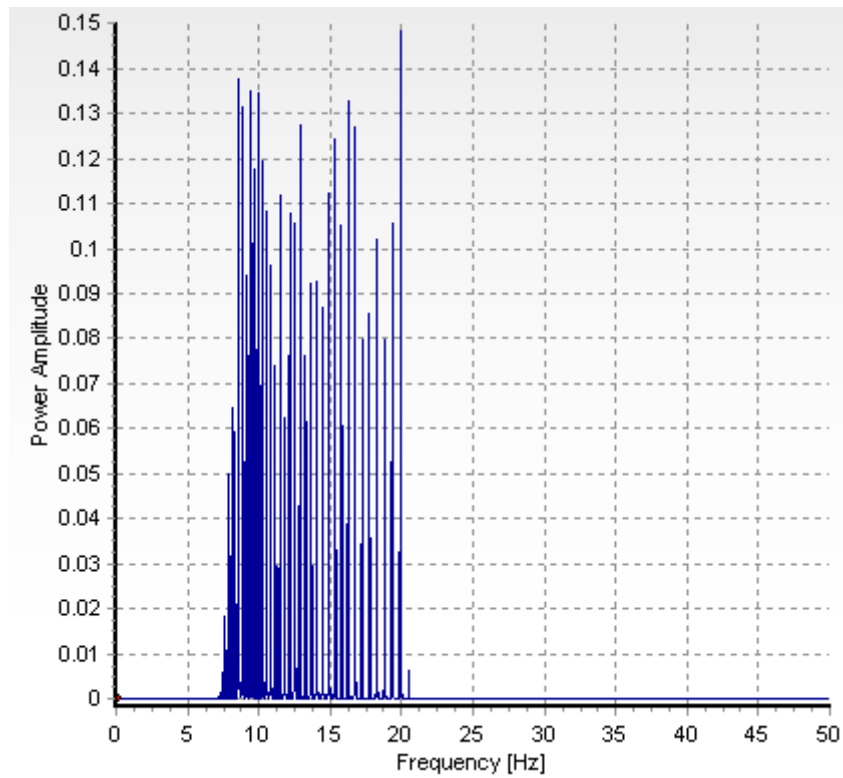


Figura 277. PSD dell'input sismico sintetico denominato "sint"

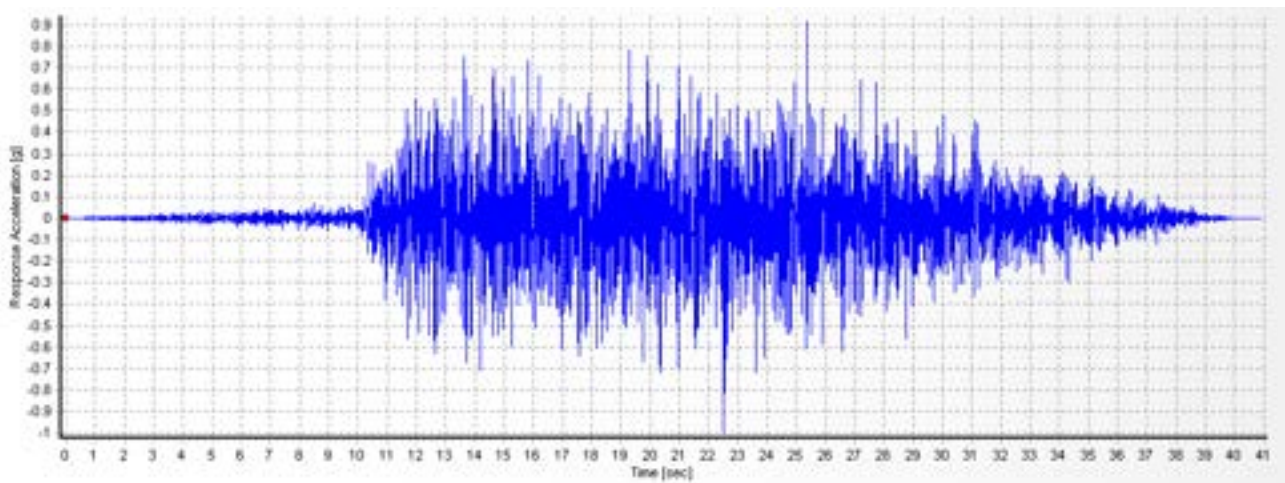


Figura 278. Storia temporale dell'input sismico sintetico denominato "sint_10-40_Hz"

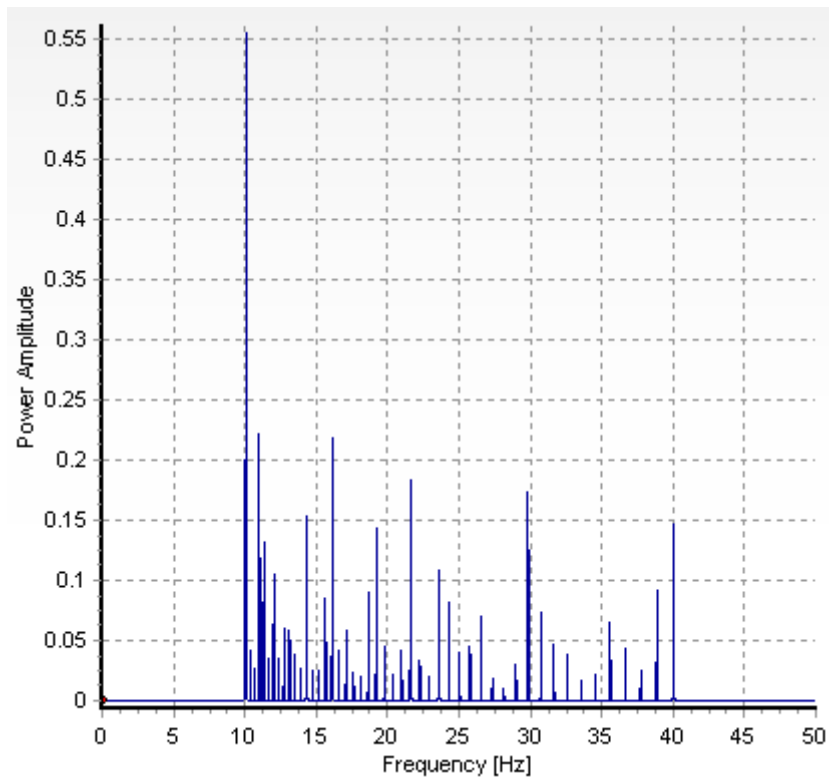


Figura 279. PSD dell'input sismico sintetico denominato "sint_10-40_Hz"

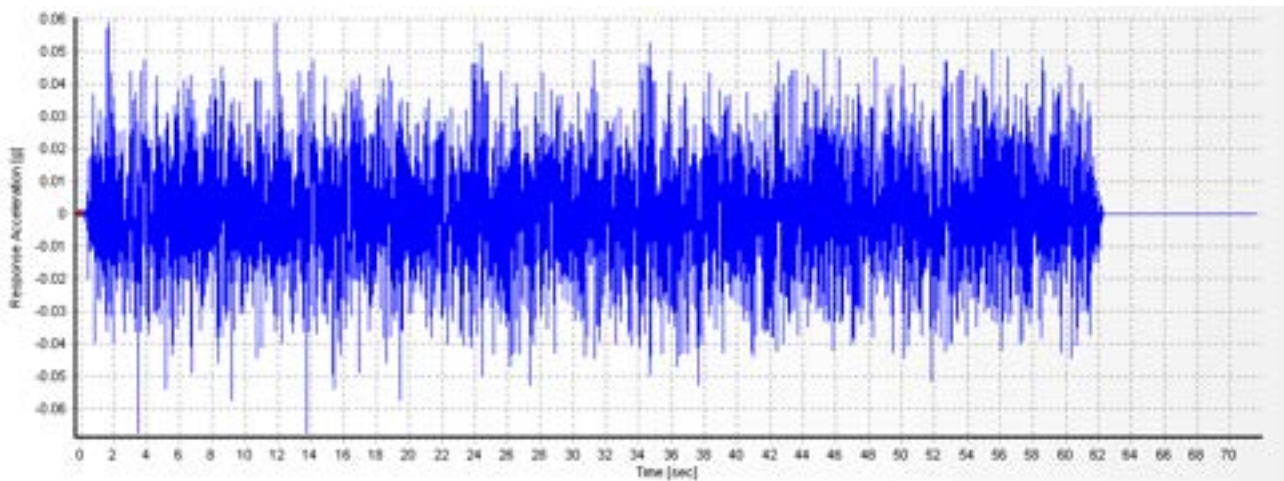


Figura 280. Storia temporale dell'input di caratterizzazione dinamica denominato "random"

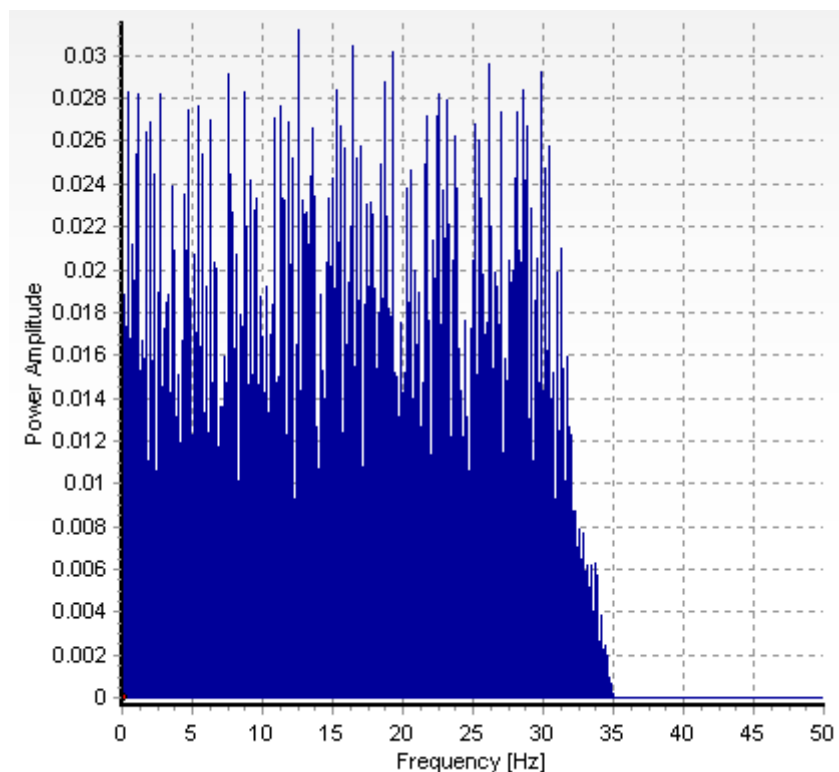


Figura 281. PSD dell'input di caratterizzazione dinamica "random"

8.3 Strumentazione di misura e monitoraggio del provino

La strumentazione utilizzata per eseguire le misure durante i test su tavola vibrante consiste sostanzialmente di:

- accelerometri;
- sistema 3DVision per la misura degli spostamenti.

I canali accelerometrici sono registrati direttamente dal sistema Stex di controllo dell'impianto della tavola vibrante tramite un condizionatore di segnale digitale multicanali collegato con la sala controllo.

In aggiunta alla suddetta sensoristica convenzionale, ovvero agli accelerometri impiegati tipicamente in ambito sismico per le prove su tavola vibrante, il laboratorio della hall sismica del C.R. ENEA Casaccia si è dotato, primo in Italia e tra i primi nel mondo, di un sistema di motion capture 3D, denominato 3DVision per la misura degli spostamenti, che si basa su tecniche di acquisizione del moto di punti nello spazio 3D sviluppate inizialmente principalmente nel settore clinico e poi mutate nei settori cinematografico, sportivo e, infine più di recente, in altri settori industriali.

In particolare, il sistema 3DVision è un sistema opto-elettronico passivo di misura del moto di punti in uno spazio tridimensionale basato sulla elaborazione dei dati acquisiti da una "costellazione" di 10 telecamere (Figura 282) all'infrarosso vicino di tecnologia Vicon. Le telecamere sono equipaggiate con sensore CMOS da 5 Mpixel in grado di registrare fino a 350 fps a piena risoluzione. Si tratta in pratica di un sistema di posizionamento "locale" in cui le telecamere, una volta fissate alle pareti o montate su appositi tripodi, irradiano il volume di misura con una schiera di led e acquisiscono la radiazione ottica infrarossa riflessa da marcatori sferici ricoperti di nastro catarifrangente (*marker*) incollati nei punti di cui si vuole misurare il moto (Figura 3). Ogni telecamera calcola tramite un processore a bordo le coordinate immagine del centroide e il raggio di ogni marcatore che vede nel proprio piano (dato 2D). Tali dati vengono poi immagazzinati e triangolati con i dati delle altre telecamere, previa operazione di calibrazione dinamica e statica per la

definizione dell'orientamento reciproco e assoluto delle telecamere nello spazio 3D. Il dato grezzo così ricostruito dal sistema fornisce la traiettoria nello spazio dei punti di misura nel sistema di riferimento fissato tramite la procedura di calibrazione statica. La risoluzione della misura raggiungibile con tale sistema dipende, come è ovvio, trattandosi di un sistema di visione 3D, dalla configurazione adottata (in particolare, dalla posizione delle telecamere) e dalla qualità della calibrazione dinamica, che consiste in una procedura di acquisizione effettuata con uno strumento di calibrazione che viene adeguatamente mosso all'interno del volume da monitorare. La configurazione delle telecamere viene scelta in base al volume da monitorare, che nel caso del laboratorio in questione è costituito dal volume che ha per base la tavola vibrante (4 m x 4 m) e per altezza l'altezza massima dei modelli da allestire sulla tavola stessa (circa 5 m). Nelle configurazioni usuali adottate per la misura dei test su tavola vibrante presso il nostro laboratorio si può raggiungere una accuratezza che va da 0.01 mm a 0.1 mm in termini di errore RMS della posizione statica dei *marker*.



Figura 282. Vista di una telecamera del sistema 3DVision

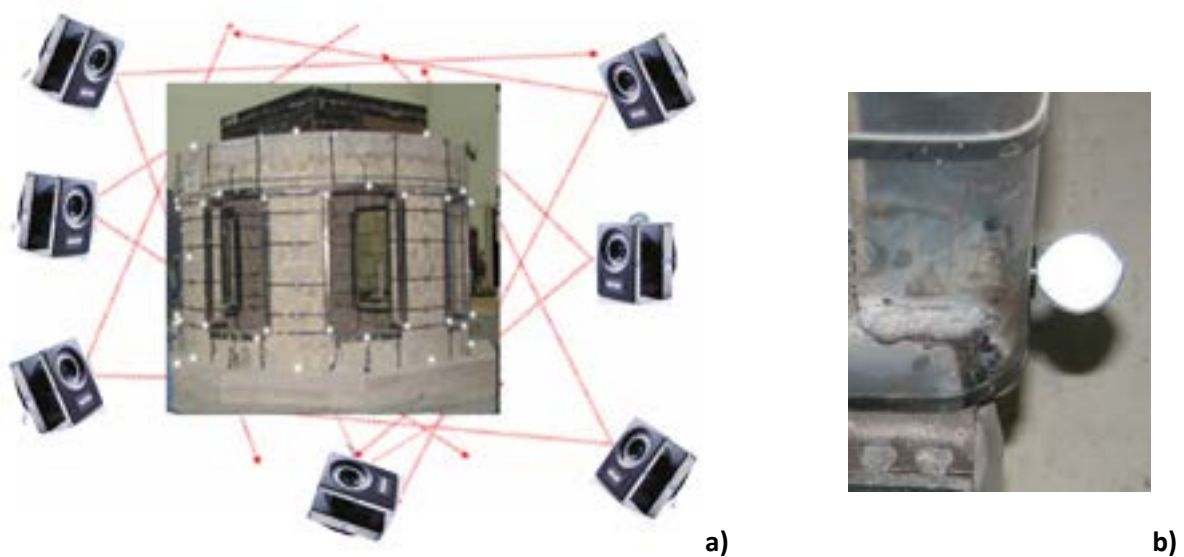


Figura 283. Schema di funzionamento del sistema 3DVision (a) e dettaglio di un *marker* (b). I *markers* appaiono luminosi per riflessione del flash fotografico

La posizione dei punti di misura è illustrata nelle figure da Figura 284 a Figura 287. Nelle suddette figure è riportata anche la nomenclatura dei punti di misura e dei pannelli su ognuno dei lati del provino.

Lato Nord



Figura 284. Posizione dei punti di misura sul lato nord: la nomenclatura indica in rosso i *markers*, in viola gli accelerometri, in blu i pannelli

Lato Ovest

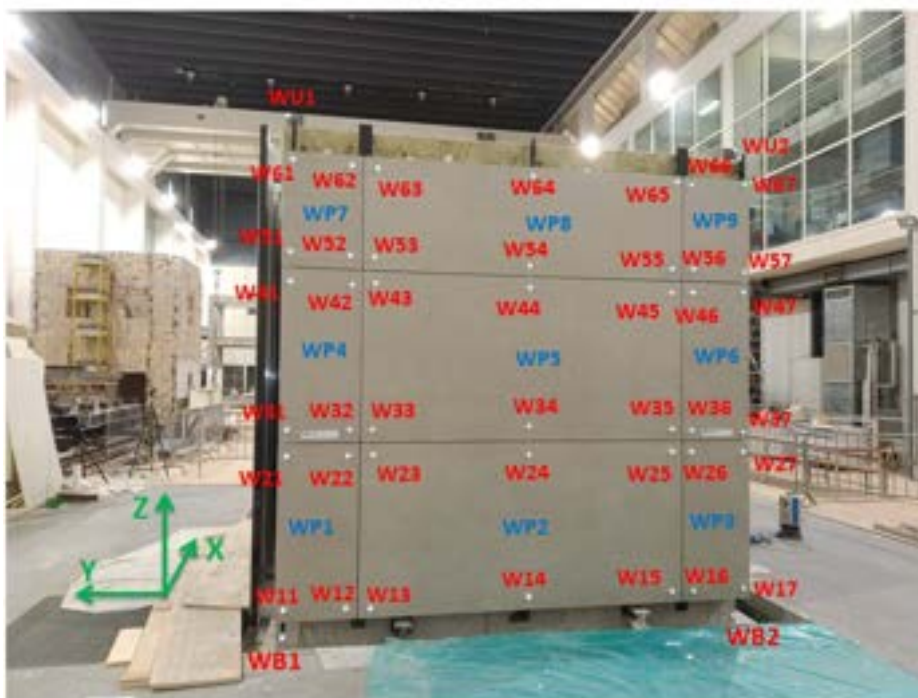


Figura 285. Posizione dei punti di misura sul lato ovest: la nomenclatura indica in rosso i *markers*, in viola gli accelerometri, in blu i pannelli

Lato Est



Figura 286. Posizione dei punti di misura sul lato est: la nomenclatura indica in rosso i *markers*, in viola gli accelerometri, in blu i pannelli

Lato Sud



Figura 287. Posizione dei punti di misura sul lato sud: la nomenclatura indica in rosso i *markers*, in viola gli accelerometri, in blu i pannelli

In Figura 229 e Figura 230 viene mostrato un dettaglio degli accelerometri ai punti AT e A2, rispettivamente. In Figura 231 viene mostrata l'interfaccia software che restituisce la visualizzazione 3D dei *marker* acquisiti nell'ambiente di gestione mediante l'elaborazione dati del sistema 3DVision. Tutti i dati sono stati registrati con una frequenza di campionamento pari a 200 Hz.

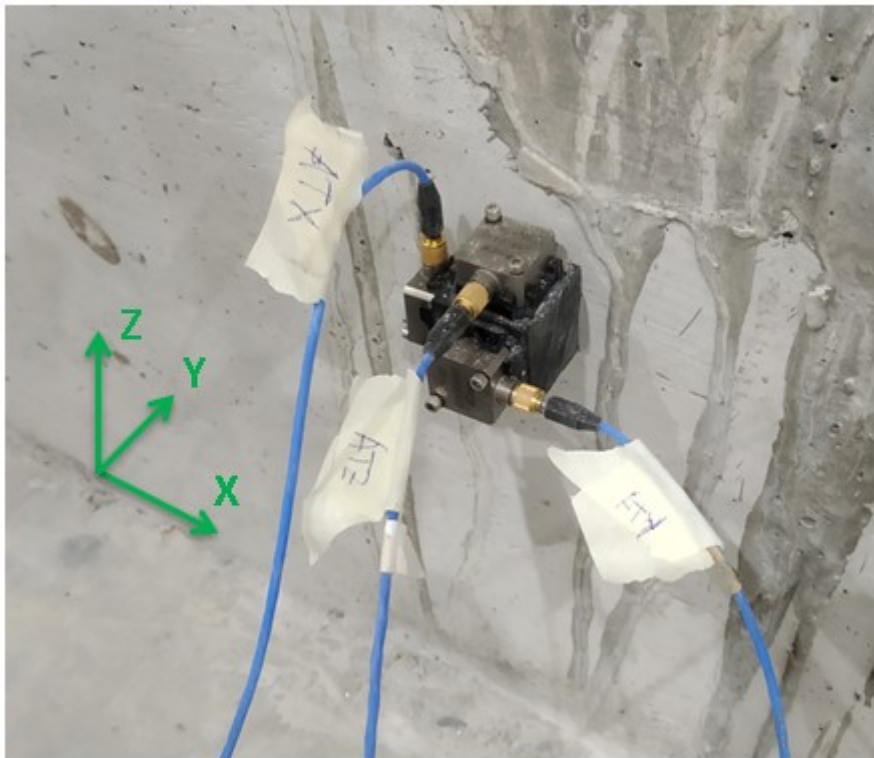


Figura 288. Dettaglio della terna accelerometrica AT

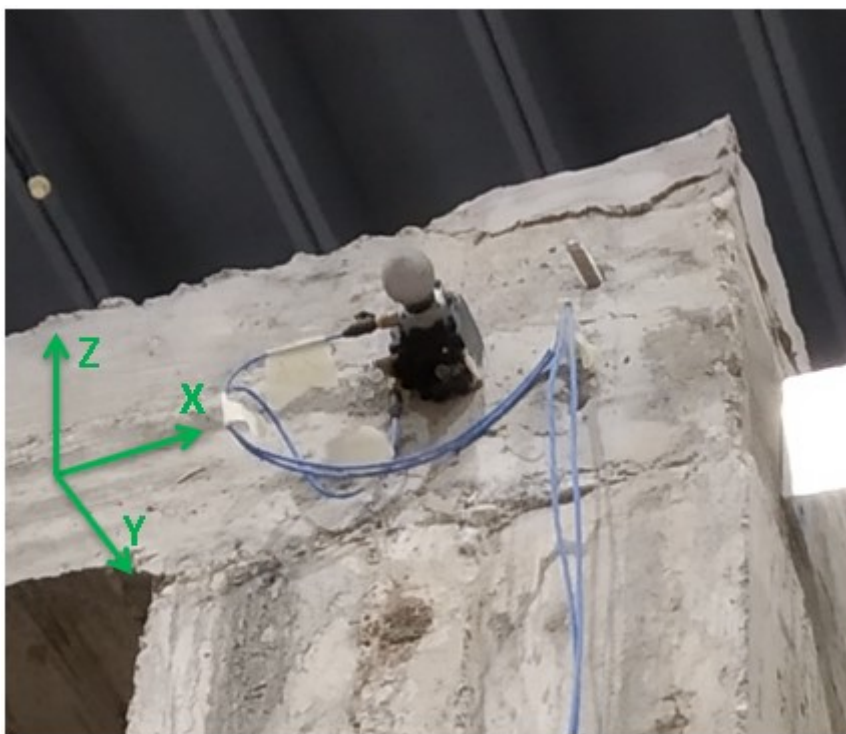


Figura 289. Dettaglio del *marker* EU1 sulla coppia accelerometrica A2

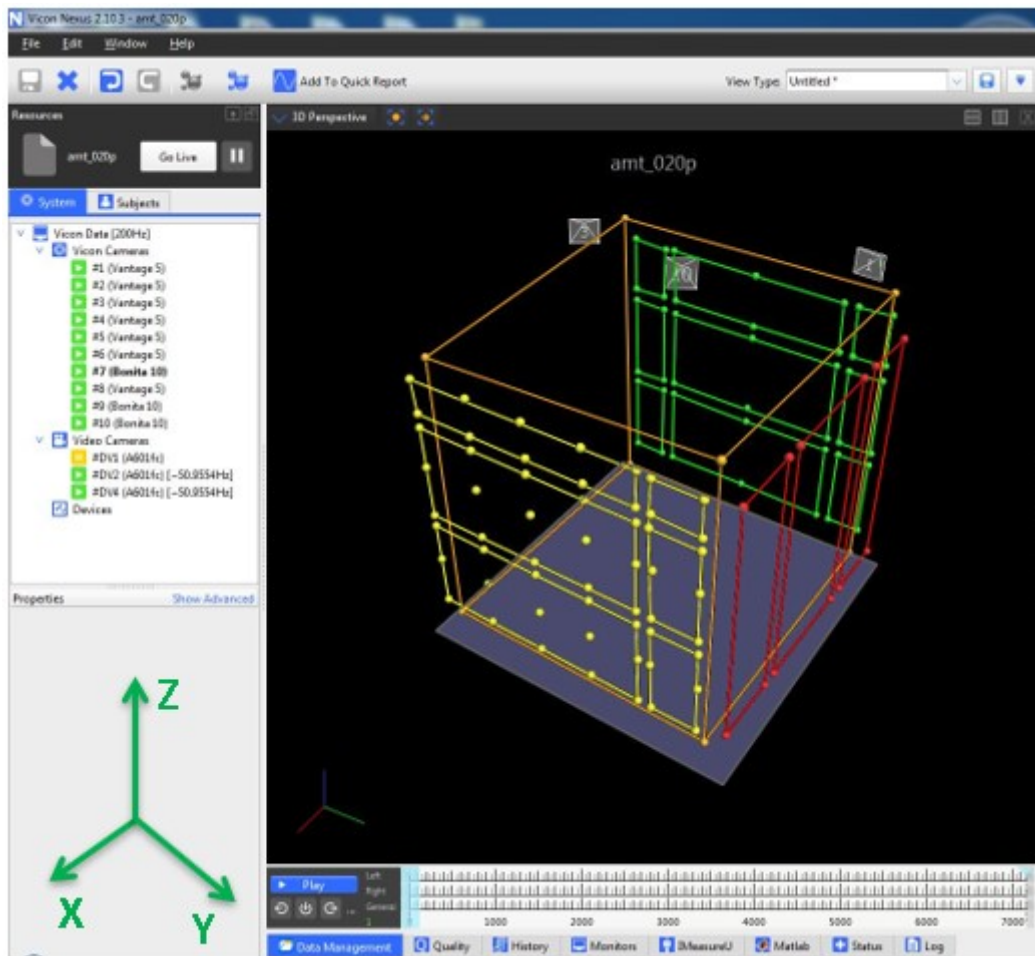


Figura 290. Visualizzazione 3D dei *markers* nell'ambiente di acquisizione ed elaborazione dati

8.4 Risultati delle prove

Nella Tabella 42 si riporta la sequenza completa dei test eseguiti su tavola vibrante con le caratteristiche principali dei singoli test e alcune annotazioni sul comportamento strutturale del provino e gli eventuali danneggiamenti rilevati.

Tabella 42. Sequenza completa dei test eseguiti su tavola vibrante

Nome test	Input	Intensità (PGA)	Annotazioni/danneggiamenti
random_01	random	0.05 g	--
amt_020p	amt	0.17 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_02	random	0.05 g	--
amt_040p	amt	0.35 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_03	random	0.05 g	--
amt_060p	amt	0.52 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_04	random	0.05 g	--
amt_080p	amt	0.69 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_05	random	0.05 g	--
amt_100p	amt	0.87 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_06	random	0.05 g	--
amt_120p	amt	1.04 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_07	random	0.05 g	--
amt_140p	amt	1.21 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_08	random	0.05 g	--
sint_020g	sint	0.20 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_09	random	0.05 g	--
sint_040g	sint	0.40 g	Nessun danno rilevato alla struttura e ai pannelli
random_10	random	0.05 g	--
sint_060g	sint	0.60 g	I pannelli vibrano vistosamente. Le lastre martellano fra loro.
random_11	random	0.05 g	--
sint_080g	sint	0.80 g	Cedimenti e deformazioni in diversi pannelli del lato ovest
random_12	random	0.05 g	--
sint_100g	sint	1.00 g	Caduta pannelli WP2, WP5
random_13	random	0.05 g	--
sint_120g	sint	1.20 g	Caduta pannello WP1
random_14	random	0.05 g	--
sint_140g	sint	1.40 g	Caduta pannello WP8. Danneggiamento del tompagno a secco.
random_15	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_020g	sint_10-40Hz	0.20 g	
random_16	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_040g	sint_10-40Hz	0.40 g	
random_17	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_060g	sint_10-40Hz	0.60 g	
random_18	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_080g	sint_10-40Hz	0.80 g	

Nome test	Input	Intensità (PGA)	Annotazioni/danneggiamenti
random_19	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_100g	sint_10-40Hz	1.00 g	
random_20	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_120g	sint_10-40Hz	1.20 g	
random_21	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_140g	sint_10-40Hz	1.40 g	
random_22	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_160g	sint_10-40Hz	1.60 g	
random_23	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_180g	sint_10-40Hz	1.80 g	Caduta pannello WP3
random_24	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_200g	sint_10-40Hz	2.00 g	
random_25	random	0.05 g	--
sint_10-40Hz_250g	sint_10-40Hz	2.50 g	
random_26	random	0.05 g	--

I test sismici naturali basati sulla registrazione alla stazione sismica di Amatrice sono stati forniti in input alla tavola vibrante a partire da una scalatura del 20% dell'accelerazione di picco (PGA), proseguendo a step incrementali del 20% in ogni test successivo fino a raggiungere il 140% della PGA del terremoto naturale, in corrispondenza del quale si è giunti al limite massimo in velocità riproducibile della tavola vibrante. A questo punto, la struttura in c.a. non aveva evidenziato danni rilevanti e la pannellatura si presentava integra.

Si è quindi proceduto cambiando tipo di input, utilizzando un terremoto artificiale, denominato "sint", potenzialmente più oneroso per la pannellatura in quanto caratterizzato da durata effettiva maggiore e da un contenuto in frequenza più alto del segnale naturale. Anche con questo nuovo input si è cominciato progredendo da intensità più bassa per poi incrementare gradualmente nei test successivi. In particolare, si è iniziato con PGA di 0.20 g, proseguendo a step incrementali di ulteriori 0.20 g. Questa volta, la pannellatura sul lato ovest (allestita con il rivestimento in ceramica e la soluzione a graffe, vedi paragrafo 7.3) ha cominciato a evidenziare deformazioni importanti e cedimenti localizzati in vari pannelli. In particolare, i danneggiamenti su alcuni pannelli sono diventati molto rilevanti nel test "sint_080g" con PGA di 0.80 g. Durante questo test, infatti, si è verificata l'apertura di una graffa e il collasso del pannello WP2, come mostrato in Figura 291Figura (a) e (b).

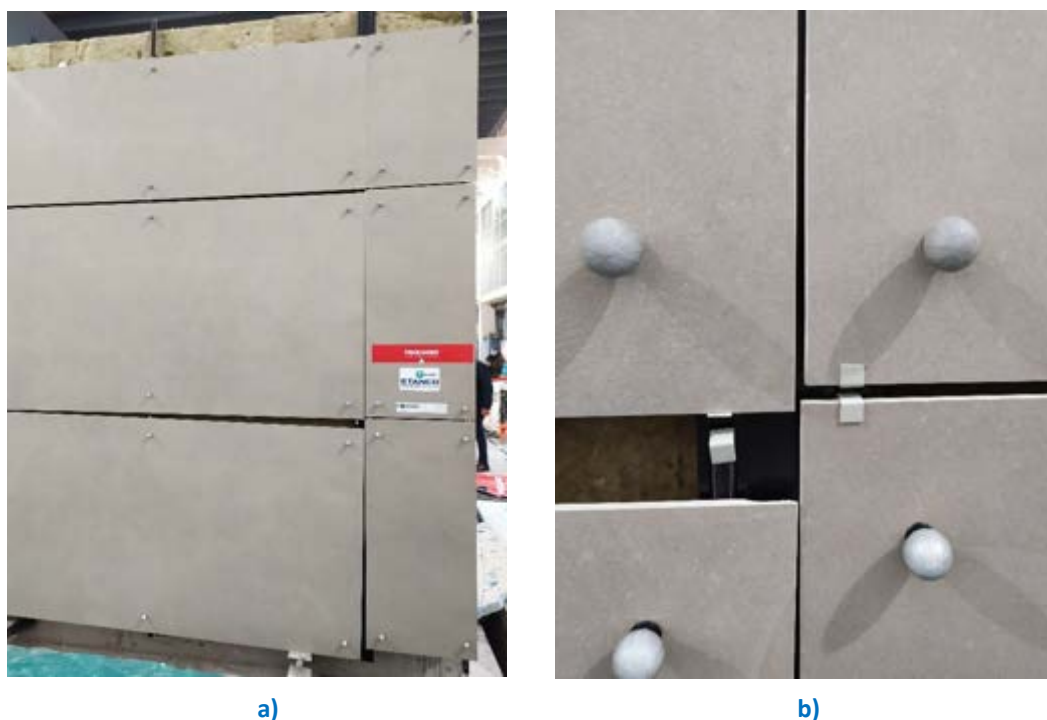


Figura 291. Parete ovest, test “sint_0.80g”: cedimento del pannello WP2 (a) dettaglio dell’apertura della graffa (b)

Nel test successivo, con PGA di 1 g, sono, infatti, caduti i pannelli WP2 e WP5 (vedi Figura 291), i pannelli più grandi, posizionati nella zona centrale della faccia sul lato ovest della struttura.



Figura 292. Parete ovest, test “sint_1.00g”: caduta dei pannelli WP2 e WP5.

A seguire, nel test a 1.20 g di PGA, è caduto anche il WP1 (vedi Figura 285), piccolo pannello laterale posizionato a fianco al WP2. Nel test successivo, con PGA di 1.40 g, si registra la caduta anche l’ultimo grande

pannello della parte centrale del lato ovest, indicato con WP8 (vedi Figura 295). Invece, le pannellature sui lati nord e est, non sembrano evidenziare alcun danneggiamento neanche con l'input "sint". Neanche la struttura in c.a. mostra danneggiamenti significativi.



Figura 293. Parete ovest al termine del test "sint_1.40g"

Si è proceduto, quindi, modificando ancora le caratteristiche dell'input, aumentando la durata e, soprattutto, innalzando il contenuto in frequenza del segnale (da 10 a 40 Hz), nel tentativo di cogliere maggiormente le frequenze più dannose per le pannellature ancora indenni. Dall'altro canto, l'innalzamento delle frequenze è meno oneroso per la struttura in c.a. che presenta delle frequenze fondamentali più basse e risponde al nuovo input piuttosto rigidamente, ovvero senza amplificazioni rilevanti e con drift di piano limitati. Questo significa che le pannellature ora non saranno soggette a deformazioni molto rilevanti indotte dal drift di piano, ma a vibrazioni con frequenze potenzialmente più efficaci a danneggiare i fissaggi dei telai del cappotto termico e i pannelli stessi. Anche in questo caso si inizia con PGA di 0.20 g, proseguendo a step incrementali di ulteriori 0.20 g fino a 2 g, e poi si prosegue con un ultimo test a 2.5 g. Le pannellature sui lati nord e est, pur vibrando molto violentemente, continuano a non mostrare alcun danneggiamento rilevante. Sul lato ovest, invece, prosegue il danneggiamento dei pannelli superstiti e nel corso del test a 1.8 g di PGA, cede definitivamente anche il pannello laterale WP3.

Si valuta, infine, di cambiare un'ultima volta l'input sismico, utilizzando un sisma di piano (vedi paragrafo 5.3.2), facendo sì che la tavola vibrante simuli l'oscillazione al pavimento dell'ultimo piano di una costruzione di predeterminate caratteristiche soggetta al sisma naturale "amt". Questo avrebbe avuto l'effetto di ridurre sostanzialmente le frequenze di oscillazione, con notevole amplificazione degli spostamenti alla base e del drift di piano, il che avrebbe significato investigare non tanto il comportamento sismico del cappotto termico, bensì la sua capacità di seguire e assecondare il comportamento della struttura. Si rinuncia in quanto i notevoli spostamenti derivanti da un tale tipo di input avrebbero presto raggiunto i limiti della tavola vibrante senza arrivare a PGA rilevanti.

Tramite i *markers* del 3DVision è stato possibile seguire gli spostamenti relativi tra i pannelli e tra i pannelli e la struttura in c.a. A titolo di esempio, si riporta in Figura 235 il grafico degli spostamenti relativi del *marker*

W25 del pannello WP2 rispetto alla struttura (*marker* W32) durante il test sint_080g, che evidenziano un iniziale dislocamento del pannello durante il test prima di cadere nel test successivo sint_100g (Figura 295).

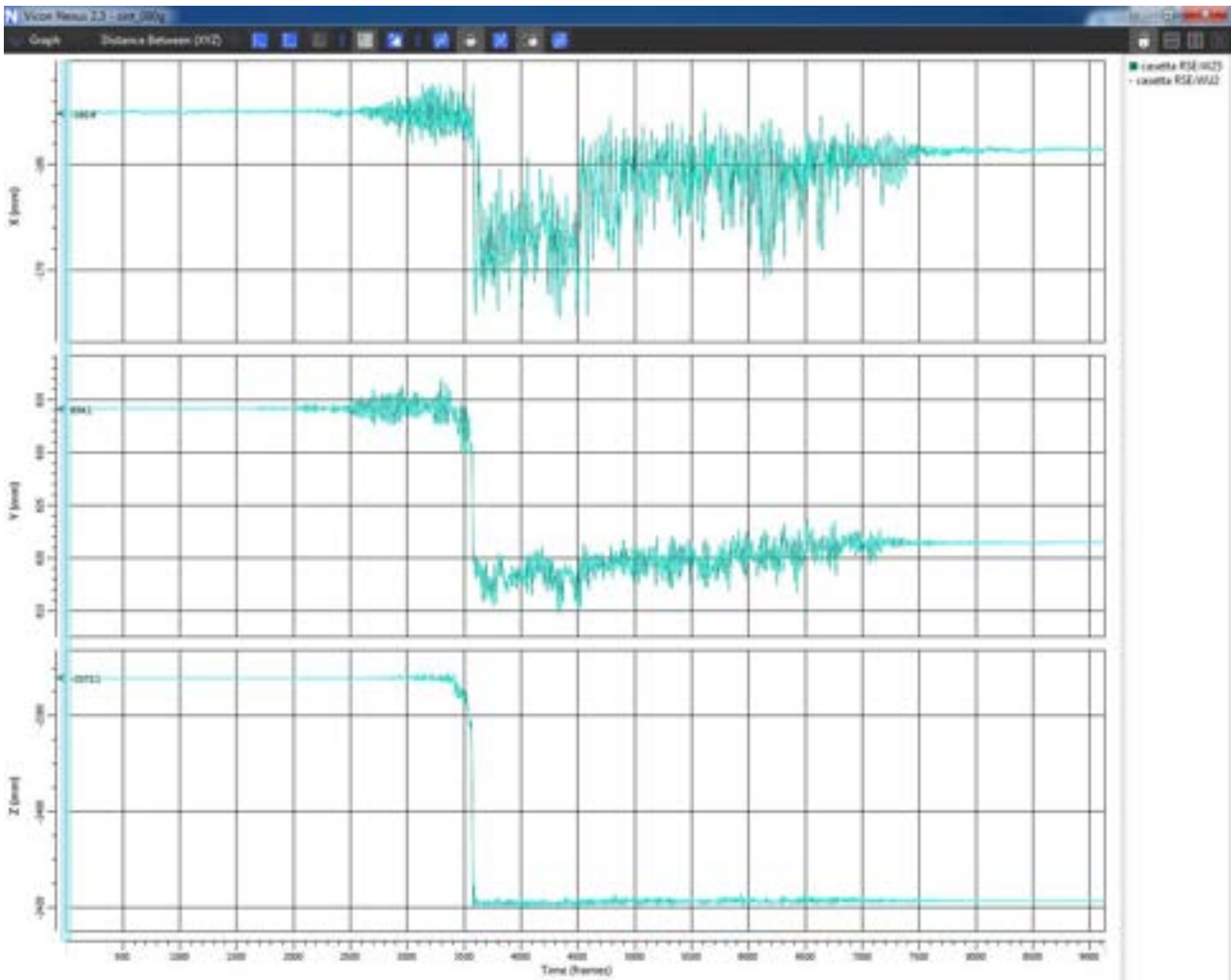


Figura 294. Spostamenti relativi del *marker* W25 rispetto a WU2 durante il test sint_080g. Il tempo è riportato in campionamenti (frames). La frequenza di campionamento è 200 frame/s

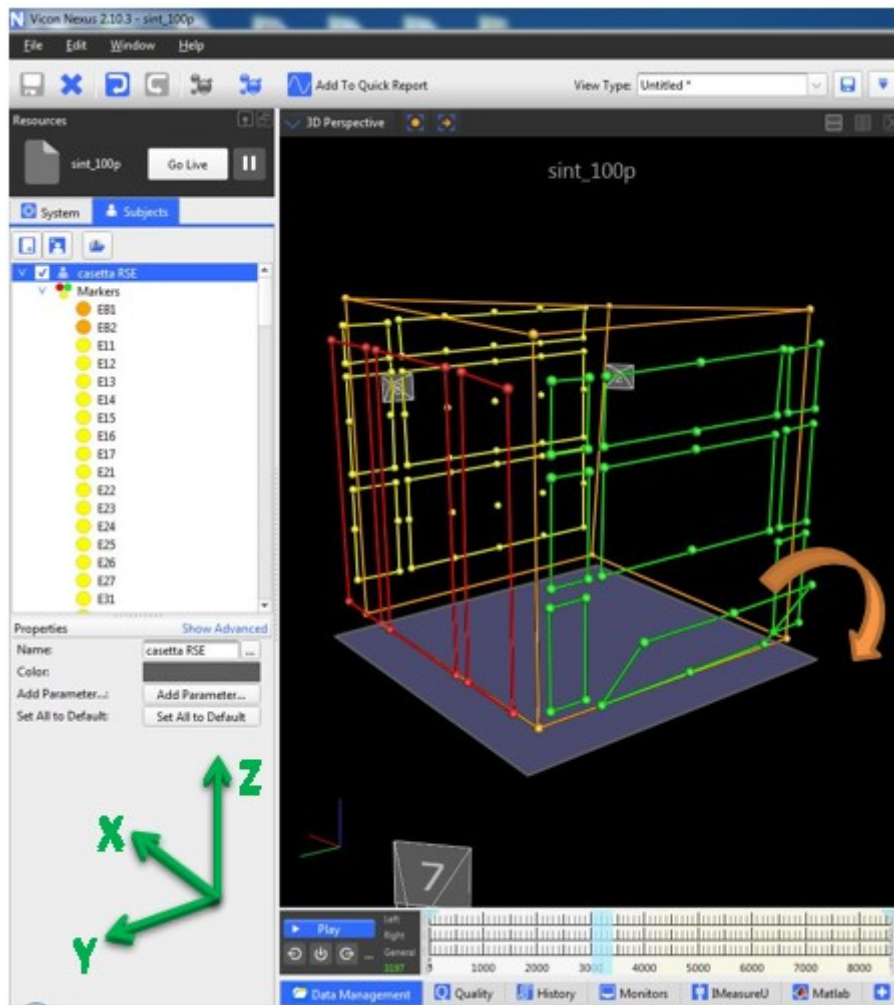


Figura 295. Caduta del pannello WP2 sul lato ovest durante il test sint_100g

9 Conclusioni

L'attività di ricerca descritta nel presente documento ha testato la resistenza nei confronti dell'azione sismica di diverse soluzioni di facciata.

Inizialmente, è stato progettato un manufatto in c.a. idoneo ad essere allestito su tre pareti, in modo da consentire di analizzare contemporaneamente tre soluzioni di facciata durante le prove sperimentali su tavola vibrante. A tale scopo, per il provino è stata scelta una forma a parallelepipedo con base quadrata, sulla quale sono state allestite tre pareti, mentre una è stata lasciata libera per consentire l'ispezione al suo interno. Le armature utilizzate sono state dimensionate in modo da rendere la struttura quanto più simile ad una struttura tipica del panorama edilizio nazionale esistente e risalente agli anni '70. Prima di procedere con la realizzazione del manufatto, sono state effettuate alcune campagne di analisi numeriche, con lo scopo di analizzarne il comportamento, definendone il dimensionamento. In particolare, dopo una prima campagna di analisi numeriche agli elementi finiti, per le quali è stato considerato come input sismico il terremoto di Amatrice del 24 agosto 2016 [2], la configurazione con le travi di coronamento in altezza è stata abbandonata in favore di una nuova configurazione con travi in spessore di solaio. Questa scelta è stata guidata dalla necessità di aumentare la deformabilità del provino ed è stata confermata da una seconda campagna di analisi numeriche. Infine, il provino è stato verificato anche nei confronti del carico da sollevamento, operazione necessaria per la sua movimentazione.

Una volta completata la progettazione del provino in c.a., l'attività di ricerca si è concentrata sulla progettazione di un sistema di parete in grado di:

- essere energeticamente efficiente e sismicamente sicuro;
- essere di facile e rapida installazione per tutte le tipologie abitative, con particolare riferimento agli edifici esistenti;
- essere modulare e poter essere prodotto in serie;
- essere durevole e quindi resistente agli agenti atmosferici.

I requisiti sopra citati hanno indirizzato lo studio verso la tipologia di rivestimento della parete composta da una sottostruttura in acciaio o alluminio ancorata all'edificio, uno strato di materiale termoisolante aderente alla parete esterna ed uno strato di finitura superficiale vincolato ai profili metallici. È stato quindi effettuato uno studio numerico preliminare ipotizzando diverse soluzioni di parete. Per ogni soluzione analizzata è stato effettuato un dimensionamento dei profili, considerando come azione sismica il terremoto di Amatrice del 24 agosto 2016 [2], e ne è stato calcolato il peso complessivo. Questo studio numerico preliminare sulla soluzione di facciata ha evidenziato che:

- è necessario che i profili metallici verticali siano collegati tra loro anche orizzontalmente, al fine di irrigidire la struttura che realizza la parete nel suo piano ed evitare fenomeni di instabilità dei montanti;
- l'utilizzo dell'alluminio invece che dell'acciaio comporta un leggero incremento delle sezioni dei profili, ma contribuisce comunque ad una netta riduzione del peso complessivo del sistema di supporto e all'annullamento degli interventi di passivazione nei riguardi della corrosione;
- ancorare ogni profilo verticale in più punti alla struttura consente di ridurre il peso complessivo della sottostruttura e allo stesso tempo contribuisce ad evitare fenomeni di instabilità dei montanti.

Sulla base delle precedenti considerazioni, è stata fatta una ricerca sul mercato per analizzare le soluzioni disponibili che potessero soddisfare i requisiti individuati e sono state individuate tre soluzioni con cui allestire le pareti del manufatto:

- parete ovest: sottostruttura in alluminio ancorata sia alla tamponatura in laterizio sia al cemento armato che sostiene un rivestimento esterno costituito da lastre in gres porcellanato: le lastre sono vincolate alla sottostruttura mediante un sistema a graffe;

- parete est: sottostruttura in alluminio ancorata sia alla tamponatura in laterizio sia al cemento armato che sostiene un rivestimento esterno costituito da pannelli in HPL: le lastre sono vincolate alla sottostruttura mediante un sistema a rivetti;
- parete nord: sottostruttura in alluminio ancorata solo alla struttura in cemento armato (sistema *floor to floor*) che sostiene un rivestimento esterno costituito da lastre di grande formato in gres porcellanato: le lastre sono vincolate alla sottostruttura mediante un sistema composto da ancoraggio meccanico più incollaggio strutturale della lastra sul profilo di alluminio.

Le soluzioni individuate soddisfano i criteri elencati in precedenza ed i materiali utilizzati per la finitura esterna (ceramica ed HPL) sono fra i più diffusi nel mercato nazionale. Inoltre, le tre soluzioni hanno consentito di testare nei confronti del sisma diversi sistemi di vincolo delle lastre, ovvero graffe metalliche, rivetti ed incollaggio. Gli ancoraggi della sottostruttura al manufatto sono stati realizzati mediante tasselli meccanici al cemento armato e tasselli chimici sul laterizio.

Dal momento che sulla parete nord è stata installata una soluzione ancorata solo alla struttura in cemento armato, è stato scelto di installare una tamponatura a secco, con lo scopo di testare le sue prestazioni nei confronti dell'azione sismica. Le soluzioni a secco sono infatti energeticamente performanti, sono modulari e possono essere prodotte in serie *off-site*. Per questo, si è ritenuto interessante analizzare anche il loro comportamento nei confronti del sisma.

Le prove su tavola vibrante sono state effettuate considerando il sisma registrato durante il terremoto di Amatrice del 24 agosto 2016 e due accelerogrammi artificiali. Ogni segnale è stato applicato in maniera incrementale e crescente. Il sisma di Amatrice è stato applicato fino a raggiungere il valore massimo del 140% della PGA del terremoto naturale, in corrispondenza del quale si è giunti al limite massimo in velocità riproducibile della tavola vibrante. Fino a questo punto, la struttura in c.a. non ha evidenziato danni rilevanti e i tre sistemi di parete installata si sono mostrati integri, così come la tamponatura a secco.

La seconda serie di test è stata effettuata utilizzando un accelerogramma artificiale potenzialmente più oneroso per la pannellatura in quanto caratterizzato da durata effettiva maggiore e da un contenuto in frequenza più alto del segnale naturale registrato ad Amatrice. Durante questo test, è stato osservato un danneggiamento della parete ovest, dove è stato installato il sistema con il rivestimento in ceramica vincolato ai profili in alluminio con le graffe metalliche. In corrispondenza di una PGA pari a 0.60 g le lastre in ceramica della parete ovest hanno iniziato a martellare fra loro e la prima caduta di una lastra si è verificata quando la PGA ha raggiunto il valore di 0.80 g. In seguito, quando la PGA ha raggiunto 1.00 g sono cadute altre due lastre, così come accaduto una volta raggiunto 1.40 g. A questo punto si sono osservati danni lievi alla tamponatura a secco, mentre un danneggiamento più consistente è stato osservato sulle due tamponature in laterizio, che hanno riportato crepe nei forati e distacco dei letti di malta, in particolare quelli perimetrali di giunzione con la struttura in c.a. Le strutture installate nelle pareti nord ed est, invece, non hanno mostrato alcun tipo di danneggiamento. Si ritiene che i cedimenti delle lastre ceramiche osservati durante questa serie di test nella parete ovest siano riconducibili all'apertura dei ganci metallici di supporto. Questo fenomeno unitamente all'assenza del collante strutturale (che invece è presente nella soluzione adottata sulla parete nord) ha determinato il collasso delle lastre.

La terza serie di test è stata effettuata utilizzando un accelerogramma artificiale con durata ancora maggiore e contenuto in frequenza del segnale più elevato. Al termine di questa terza campagna di test, è stata osservata la sola caduta di un ulteriore pannello sulla parete ovest, già compromessa dalla serie di test precedenti, mentre le altre due pareti si sono mostrate perfettamente integre e nessun danneggiamento significativo è stato osservato sulla tamponatura a secco.

Le prove sperimentali su tavola vibrante hanno quindi evidenziato che le tre soluzioni di facciata installate, così come la tamponatura a secco, hanno mostrato ottime prestazioni nei confronti dell'azione sismica. Infatti, non solo la soluzione adottata per la parete est (HPL) non ha mostrato alcun danneggiamento al termine della campagna sperimentale, ma anche i materiali ceramici hanno mostrato ottime prestazioni. A riguardo di questi ultimi, è necessario osservare che il sistema "MAGNUM S1" montato sulla soluzione *floor to floor* nella parete nord non ha mostrato alcun segno di danneggiamento al termine delle prove, nonostante

l'entità delle accelerazioni a cui è stato sottoposto. Questo sistema poteva potenzialmente mostrare delle criticità nei confronti del sisma se confrontato con gli altri sistemi installati, sia perché prevedeva l'installazione di lastre ceramiche di grande formato, sia perché era vincolato solo alle travi di fondazione e coronamento. Nonostante queste caratteristiche, il sistema ha mostrato ottime prestazioni mantenendosi perfettamente integro e mostrando che la combinazione di fissaggio meccanico più incollaggio strutturale rappresenta un efficace sistema di vincolamento delle lastre ceramiche nei confronti dell'azione sismica.

Infine, è importante osservare anche che non si sono riscontrati fenomeni di ribaltamento delle tamponature in laterizio durante le prove. Questo fatto potrebbe suggerire che le soluzioni di facciata ancorate al laterizio potrebbero avere anche svolto una funzione di ritenuta della tamponatura stessa durante il sisma. Ad ogni modo, questo aspetto dovrà essere ulteriormente indagato per poter essere accertato in campagne di ricerca sperimentale successive.

SEZIONE III – CATALOGO

10 Introduzione

Questa ultimasezione del report raccoglie e sintetizza gli studi effettuati nelle precedenti due sezioni, utilizzando anche i risultati degli studi effettuati dall'Università La Sapienza realizzando una serie di abachi e cataloghi (presenti negli allegati del documento e riportati sul portale web) che saranno utilizzati dall'Università di Messina per costruire una "Matrice dinamica" sita sul portale del progetto e che potrà essere liberamente utilizzata da tecnici e altre parti interessate. Tali risultati saranno, poi, riutilizzati dall'Università della Tuscia per svolgere le attività a loro afferenti per la terza annualità.

Allo stato attuale, la matrice si trova all'indirizzo <http://eneadi.unime.it/portale/index.html>, tal indirizzo è provvisorio poiché a progetto completato il portale sarà visitabile all'indirizzo www.ambientecostruito.enea.it.

Di seguito si presenteranno le schede di sintesi realizzate.

11 Descrizione delle attività svolte e risultati

11.1 Organizzazione dell'attività

Obiettivo dell'attività è quello di creare un insieme di parametri di scelta ad incrocio che, in base a precisi criteri definiti dall'utente, possano dare origini a una, o più, soluzioni utilizzabili nello specifico caso.

Per la creazione della matrice definitiva si è reso necessario realizzare delle sottomatrici semplificate che per consentire ad UNIME di progettare e realizzare la matrice sopra definita.

A monte di tutto ciò è stata effettuata una ulteriore selezione che, dagli output delle attività della Sapienza, ci consentissero di estrapolare le 3 soluzioni maggiormente utilizzate sul mercato e che consentano una copertura capillare del territorio italiano.

In tal senso la scelta ricade principalmente su tre materiali isolanti:

1. XPS
2. Stiferite
3. Lastre in silicato di calcio idrato

Per poter rispondere alle esigenze attuali del mercato sono stati scelti materiali che abbiamo principalmente due caratteristiche principali:

- a) I materiali devono rispettare i criteri (CAM): questa caratteristica è indispensabile se l'utente vuole accedere alle attuali forme di detrazione presenti sul territorio nazionale (Superbonus, Ecobonus, BonusCasa, Conto Termico...)
- b) Consentire il rispetto dei requisiti minimi di legge in merito alle trasmittanze finali: questa caratteristica pone dei limiti in merito all'utilizzo di alcuni materiali con valori di conducibilità molto alti perché portano all'utilizzo di spessori importanti (anche 20-30 cm) con conseguenti problemi di installazione e di ingombro delle facciate.

Effettuata questa scelta, si è proseguito creando delle sottomatrici che possano consentire la scelta ad incrocio. Le 4 sotto matrici create sono le seguenti:

1. Solution matrix
2. Input matrix
3. Selectionmatrix
4. Evaluation matrix

L'insieme delle sottomatrici, a seguito delle indicazioni fornite dall'utente in merito a

- Tipologia costruttiva
- Tipologia di impianto presente
- Indicazione della zona climatica
- Pericolosità sismica della zona

consentirà che i valori presenti nelle stesse possano essere incrociati dinamicamente per poter fornire come output una o più soluzioni possibili per lo specifico caso.

11.1.1 Solution Matrix

La prima matrice realizzata è quella relativa all'indicizzazione delle soluzioni studiate (S1...S21), sono, infatti, state individuate 21 soluzioni possibili che hanno la caratteristica di poter coprire l'intero territorio nazionale. La matrice, partendo da una delle tre tipologie di isolante individuato (XPS, Silicato, Stiferite) individua la presenza o meno dell'impianto di riscaldamento all'interno dell'immobile. Nel caso di presenza di impianto la sottomatrice consente di differenziarlo in merito al tipo di distribuzione, di generazione e di emissione. Da quanto sopra esposto viene generata la seguente sottomatrice:

CATALOGO DELLE SOLUZIONI STANDARDIZZATE				
Soluzione	Isolante	Impianto		
		Distribuzione	Generazione	Emissione
S1	XPS	No impianto		
S2	XPS	Acqua	Caldaia a condensazione	Radiatori
S3	XPS	Acqua	Caldaia a condensazione	Ventilconvettori
S4	XPS	Acqua	Pompa di calore	Ventilconvettori
S5	XPS	Acqua	Ibrido	Ventilconvettori
S6	XPS	Aria	Pompa di calore	Bocchettoni/Split
S7	XPS	Aria	Ibrido	Bocchettoni/Split
S8	Silicato	No impianto		
S9	Silicato	Acqua	Caldaia a condensazione	Radiatori
S10	Silicato	Acqua	Caldaia a condensazione	Ventilconvettori
S11	Silicato	Acqua	Pompa di calore	Ventilconvettori
S12	Silicato	Acqua	Ibrido	Ventilconvettori
S13	Silicato	Aria	Pompa di calore	Bocchettoni/Split
S14	Silicato	Aria	Ibrido	Bocchettoni/Split
S15	Stiferite	No impianto		
S16	Stiferite	Acqua	Caldaia a condensazione	Radiatori
S17	Stiferite	Acqua	Caldaia a condensazione	Ventilconvettori
S18	Stiferite	Acqua	Pompa di calore	Ventilconvettori
S19	Stiferite	Acqua	Ibrido	Ventilconvettori
S20	Stiferite	Aria	Pompa di calore	Bocchettoni/Split
S21	Stiferite	Aria	Ibrido	Bocchettoni/Split

Figura 296: Sottomatrice "Solution Matrix" coincidente con il Catalogo

Tale matrice coincide con il Catalogo di soluzioni studiate e presenti sottoforma di schede negli allegati al presente report.

11.1.2 Input Matrix

Questa seconda sottomatrice è quella che più direttamente si interfaccia con l'utente e consente, allo stesso, di poter effettuare le scelte necessarie per individuare il caso specifico di studio inserendo:

- Tipologia costruttiva
- Tipologia di impianto presente

- Indicazione della zona climatica
- Pericolosità sismica della zona

originando le 144 combinazioni possibili. La Figura 297 riporta la sottomatrice “Input Matrix” così generata:

	Zona climatica	Tipologia impiantistica	Zona Sismica	Tipologia Costruttiva
I1	A	Autonomo	1	Muratura
I2	A	Autonomo	1	Calcestruzzo
I3	A	Autonomo	1	Legno
I4	A	Autonomo	2	Muratura
I5	A	Autonomo	2	Calcestruzzo
I6	A	Autonomo	2	Legno
I7	A	Autonomo	3	Muratura
I8	A	Autonomo	3	Calcestruzzo
I9	A	Autonomo	3	Legno
I10	A	Autonomo	4	Muratura
I11	A	Autonomo	4	Calcestruzzo
I12	A	Autonomo	4	Legno
I13	A	Centralizzato	1	Muratura
I14	A	Centralizzato	1	Calcestruzzo
I15	A	Centralizzato	1	Legno
I16	A	Centralizzato	2	Muratura
I17	A	Centralizzato	2	Calcestruzzo
I18	A	Centralizzato	2	Legno
I19	A	Centralizzato	3	Muratura
I20	A	Centralizzato	3	Calcestruzzo
I21	A	Centralizzato	3	Legno
I22	A	Centralizzato	4	Muratura
I23	A	Centralizzato	4	Calcestruzzo
I24	A	Centralizzato	4	Legno
I25	B	Autonomo	1	Muratura
I26	B	Autonomo	1	Calcestruzzo
I27	B	Autonomo	1	Legno
I28	B	Autonomo	2	Muratura
I29	B	Autonomo	2	Calcestruzzo
I30	B	Autonomo	2	Legno
I31	B	Autonomo	3	Muratura
I32	B	Autonomo	3	Calcestruzzo
I33	B	Autonomo	3	Legno
I34	B	Autonomo	4	Muratura
I35	B	Autonomo	4	Calcestruzzo

I36	B	Autonomo	4	Legno
I37	B	Centralizzato	1	Muratura
I38	B	Centralizzato	1	Calcestruzzo
I39	B	Centralizzato	1	Legno
I40	B	Centralizzato	2	Muratura
I41	B	Centralizzato	2	Calcestruzzo
I42	B	Centralizzato	2	Legno
I43	B	Centralizzato	3	Muratura
I44	B	Centralizzato	3	Calcestruzzo
I45	B	Centralizzato	3	Legno
I46	B	Centralizzato	4	Muratura
I47	B	Centralizzato	4	Calcestruzzo
I48	B	Centralizzato	4	Legno
I49	C	Autonomo	1	Muratura
I50	C	Autonomo	1	Calcestruzzo
I51	C	Autonomo	1	Legno
I52	C	Autonomo	2	Muratura
I53	C	Autonomo	2	Calcestruzzo
I54	C	Autonomo	2	Legno
I55	C	Autonomo	3	Muratura
I56	C	Autonomo	3	Calcestruzzo
I57	C	Autonomo	3	Legno
I58	C	Autonomo	4	Muratura
I59	C	Autonomo	4	Calcestruzzo
I60	C	Autonomo	4	Legno
I61	C	Centralizzato	1	Muratura
I62	C	Centralizzato	1	Calcestruzzo
I63	C	Centralizzato	1	Legno
I64	C	Centralizzato	2	Muratura
I65	C	Centralizzato	2	Calcestruzzo
I66	C	Centralizzato	2	Legno
I67	C	Centralizzato	3	Muratura
I68	C	Centralizzato	3	Calcestruzzo
I69	C	Centralizzato	3	Legno
I70	C	Centralizzato	4	Muratura
I71	C	Centralizzato	4	Calcestruzzo
I72	C	Centralizzato	4	Legno
I73	D	Autonomo	1	Muratura
I74	D	Autonomo	1	Calcestruzzo

175	D	Autonomo	1	Legno
176	D	Autonomo	2	Muratura
177	D	Autonomo	2	Calcestruzzo
178	D	Autonomo	2	Legno
179	D	Autonomo	3	Muratura
180	D	Autonomo	3	Calcestruzzo
181	D	Autonomo	3	Legno
182	D	Autonomo	4	Muratura
183	D	Autonomo	4	Calcestruzzo
184	D	Autonomo	4	Legno
185	D	Centralizzato	1	Muratura
186	D	Centralizzato	1	Calcestruzzo
187	D	Centralizzato	1	Legno
188	D	Centralizzato	2	Muratura
189	D	Centralizzato	2	Calcestruzzo
190	D	Centralizzato	2	Legno
191	D	Centralizzato	3	Muratura
192	D	Centralizzato	3	Calcestruzzo
193	D	Centralizzato	3	Legno
194	D	Centralizzato	4	Muratura
195	D	Centralizzato	4	Calcestruzzo
196	D	Centralizzato	4	Legno

197	E	Autonomo	1	Muratura
198	E	Autonomo	1	Calcestruzzo
199	E	Autonomo	1	Legno
1100	E	Autonomo	2	Muratura
1101	E	Autonomo	2	Calcestruzzo
1102	E	Autonomo	2	Legno
1103	E	Autonomo	3	Muratura
1104	E	Autonomo	3	Calcestruzzo
1105	E	Autonomo	3	Legno
1106	E	Autonomo	4	Muratura
1107	E	Autonomo	4	Calcestruzzo
1108	E	Autonomo	4	Legno
1109	E	Centralizzato	1	Muratura
1110	E	Centralizzato	1	Calcestruzzo

1111	E	Centralizzato	1	Legno
1112	E	Centralizzato	2	Muratura
1113	E	Centralizzato	2	Calcestruzzo
1114	E	Centralizzato	2	Legno
1115	E	Centralizzato	3	Muratura
1116	E	Centralizzato	3	Calcestruzzo
1117	E	Centralizzato	3	Legno

I118	E	Centralizzato	4	Muratura
I119	E	Centralizzato	4	Calcestruzzo
I120	E	Centralizzato	4	Legno
I121	F	Autonomo	1	Muratura
I122	F	Autonomo	1	Calcestruzzo
I123	F	Autonomo	1	Legno
I124	F	Autonomo	2	Muratura
I125	F	Autonomo	2	Calcestruzzo
I126	F	Autonomo	2	Legno
I127	F	Autonomo	3	Muratura
I128	F	Autonomo	3	Calcestruzzo
I129	F	Autonomo	3	Legno
I130	F	Autonomo	4	Muratura
I131	F	Autonomo	4	Calcestruzzo
I132	F	Autonomo	4	Legno
I133	F	Centralizzato	1	Muratura
I134	F	Centralizzato	1	Calcestruzzo
I135	F	Centralizzato	1	Legno
I136	F	Centralizzato	2	Muratura
I137	F	Centralizzato	2	Calcestruzzo
I138	F	Centralizzato	2	Legno
I139	F	Centralizzato	3	Muratura
I140	F	Centralizzato	3	Calcestruzzo
I141	F	Centralizzato	3	Legno
I142	F	Centralizzato	4	Muratura
I143	F	Centralizzato	4	Calcestruzzo
I144	F	Centralizzato	4	Legno

Figura 297: Input Matrix

11.1.3 Selection Matrix

La sottomatrice di Selezione (“Selection Matrix”, Figura 298), attraverso un sistema tipo binario (Si/No) mette in relazione le 21 soluzioni con i 144 input individuando le soluzioni possibili (1) e quelle non possibili (0).

Input	Soluzione	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21
I1		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I2		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I3		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I4		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I5		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I6		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I7		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I8		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I9		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I10		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I11		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I12		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I15		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I16		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I17		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I18		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I19		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I20		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I21		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I22		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I23		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I24		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I25		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I26		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I27		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I28		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I29		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I30		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I31		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I32		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I33		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I34		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I35		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I36		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I37		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I38		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I39		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I40		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I41		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I42		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I43		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I44		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I45		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I46		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I47		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I48		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I49		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I50		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I51		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I52		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I53		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I54		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I55		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I56		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I57		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I58		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I59		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I60		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I61		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I62		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I63		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I64		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I65		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I66		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I67		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I68		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I69		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I70		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I71		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I72		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
I73		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I74		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I75		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I76		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I77		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I78		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I79		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I80		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I81		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I82		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I83		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I84		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
I85		0	1	1																		

I101	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I102	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I103	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I104	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I105	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I106	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I107	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I108	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I109	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I110	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I111	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I112	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I113	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I114	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I115	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I116	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I117	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I118	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I119	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I120	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
I121	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I122	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I123	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I124	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I125	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I126	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I127	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I128	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I129	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I130	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I131	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I132	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I133	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I134	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I135	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I136	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I137	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I138	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I139	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I140	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I141	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I142	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I143	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I144	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0

Figura 213: Selection Matrix

Questa sottomatrice consentirà agli sviluppatore della matrice Dinamica di poter assegnare i criteri necessari per individuare le opportune soluzioni a catalogo in base alle scelte dell'utente.

11.1.4 Evaluation Matrix

L'ultima sottomatrice è stata pensata per dare un sorta di punteggio di efficacia alle S21 soluzioni in base a 5 parametri prestabiliti:

1. Costi di investimento
2. Efficienza
3. Complessità dell'impianto
4. Integrazione con FER
5. Detraibilità

In base ad uno score da 1(meno buono) a 3 (maggiormente performante) si dà un voto alle soluzioni sull'efficacia complessiva.

Partendo dal principio che tutte le soluzioni sono performanti dal punto di vista sismico ed energetico, ci si è voluti spingere oltre dando anche una valutazione complessiva che tenesse anche conto di altri parametri di natura economica, tecnica e di sostenibilità.

In ognuna delle schede a catalogo saranno riportati i punteggi singoli e una valutazione complessiva che potrà aiutare l'utente nella scelta laddove, in seguito ai criteri selezionati, la risposta della Matrice Dinamica fosse multipla (restituzione di più soluzioni possibili).

Il risultato ottenuto è riportato in Figura 299:

Soluzione	Costi investimento	Efficienza	Complessità impianto	Integrazione FER	Detraibilità
S1	3	1	3	1	3
S2	2	2	2	2	3
S3	2	2	2	2	3
S4	1	3	2	3	3
S5	1	3	1	3	3
S6	1	3	2	3	3
S7	1	3	1	3	3
S8	3	1	3	1	3
S9	2	2	2	2	3
S10	2	2	2	2	3
S11	1	3	2	3	3
S12	1	3	1	3	3
S13	1	3	2	3	3
S14	1	3	1	3	3
S15	3	1	3	1	3
S16	2	2	2	2	3
S17	2	2	2	2	3
S18	1	3	2	3	3
S19	1	3	1	3	3
S20	1	3	2	3	3
S21	1	3	1	3	3

Figura 299: Evaluation Matrix

12 Conclusioni

L'attività svolta ha avuto l'obiettivo principe di sintetizzare gli output ottenuti e preparare quanto necessario per lo svolgimento della LA2.10. Durante lo svolgimento della stessa sono stati necessari diversi confronti soprattutto con UNIME con incontri (in remoto causa pandemia) necessari per poter capire esattamente cosa fosse necessario agli sviluppatori. Grazie a continui scambi è stato possibile aggiustare il tiro, revisionare e modificare quanto realizzato con l'obiettivo di rendere funzionale la matrice.

Lungamente si è anche discusso in merito a quale fosse il modo di rendere facilmente "leggibile" e interpretabile la Matrice da parte degli utenti. Allo stesso modo, si è scelto di fornire come output agli utenti schede di sintesi in *pdf facilmente scaricabili e consultabili (le stesse sono presenti negli allegati al report).

Tale matrice potrà essere utilizzata per individuare le soluzioni sulle quali effettuare le analisi sul processo per la prossima annualità. Tali studi potrebbero risultare sicuramente utili per attività future da svolgersi direttamente con le aziende e per verificare sul campo come può essere efficientata l'intera catena di produzione.

13 Addendum alle attività 2019: Simulazione in regime dinamico di un edificio unifamiliare ricorrente del parco edilizio italiano

Nel presente addendum si descrive un'attività aggiuntiva volta a valutare le prestazioni energetiche di un edificio unifamiliare le cui caratteristiche costruttive e distributive possano considerarsi ricorrenti nel patrimonio edilizio italiano.

Il modello edilizio unifamiliare di seguito analizzato è definito in modo da rappresentare una porzione consistente del parco immobiliare residenziale del Paese. Le simulazioni numeriche delle prestazioni numeriche svolte su questo modello e su quello già descritto nel resocontoRdS /PTR2019/064 consentiranno una stima dei risultati attesi (in termini di efficienza e risparmio energetico) dall'applicazione agli edifici esistenti delle soluzioni tecnologiche identificate dal progetto "Ambiente costruito".

L'edificio rappresentativo ha caratteristiche costruttive e impiantistiche proprie di una costruzione del decennio 1971-1980, si compone di due elevazioni fuori terra e ha una superficie di circa 110 m². Le caratteristiche d'involucro e degli impianti, insieme ai profili di attività e d'uso dell'edificio, sono stati modellati mediante il programma *EnergyPlus*(U.S. Department of Energy, DOE).

Le simulazioni del modello hanno riguardato 75 località italiane, scelte in funzione della disponibilità di opportuni dati climatici. In tal modo si è costituito un *benchmark* rappresentativo per diverse località italiane delle prestazioni energetiche degli edifici precedentemente a interventi volti ad accrescere l'efficienza dell'involucro e degli impianti.

Il lavoro qui proposto sarà utilizzato per le successive fasi del progetto, in quanto permetterà: di fornire informazioni quantitative sulle prestazioni attese dei pacchetti di involucro proposti, e quindi di dare un contributo alla scelta delle soluzioni standardizzate più efficaci; e di valutare con precisione, una volta determinate le soluzioni standardizzate, l'impatto atteso sul sistema energetico nazionale.

13.1 Introduzione

L'obiettivo principale del progetto "Ambiente costruito" è lo sviluppo di soluzioni utili da replicare, su larga scala, l'uso di moduli costruttivi per l'isolamento termico delle chiusure verticali degli edifici esistenti. A tal fine, si sono definite le caratteristiche dimensionali, costruttive e distributive di un edificio residenziale unifamiliare "ricorrente", cioè rappresentativo di una porzione rilevante del patrimonio edilizio nazionale. Questo modello è adoperato come base comune di simulazione numerica tramite *EnergyPlus*, per confrontare le prestazioni energetiche conseguenti alle soluzioni tecnico-costruttive indagate dal progetto. Il modello edilizio descritto nel resoconto dell'annualità 2019 è stato definito con particolare riferimento al patrimonio edilizio delle città italiane più popolate. Il presente supplemento mira a corredare lo studio di un modello che possa considerarsi rappresentativo di soluzioni abitative proprie di un maggior numero di Comuni.

Come emerge da uno studio realizzato da Cresme/CNAPPC (Roma, ottobre 2017) dal titolo "Chi ha progettato l'Italia? Ruolo dell'Architettura nella qualità del paesaggio edilizio italiano" presentata a Padova nel corso della Conferenza Nazionale degli Ordini degli Architetti, Pianificatori, Paesaggisti e Conservatori, degli 11,9 milioni di edifici destinati alla residenza, 9,1 milioni, il 76,5%, sono costituiti da edifici **mono-bifamiliari**; 2,3 su 9 milioni di abitazioni - pari al 19,3% dello stock edilizio e al 29,4% delle abitazioni - sono costituiti da edifici da 3 a 8 piani; trecentomila su 3,6 milioni di abitazioni sono in edifici da 9 a 15 abitazioni; duecentomila su 6,3 milioni di abitazioni sono in edifici con oltre 15 abitazioni.

Dallo studio emerge la possibilità di distinguere:

1. l'Italia mono-bifamiliare della provincia e della dispersione, prevalentemente costituita dall'edilizia mono-bifamiliare degli edifici di piccole dimensioni (oggetto dello studio proposto nel presente documento);

2. l'Italia della periferia, addossata alle aree centrali, frutto di modelli edilizi più intensi, fatta di edifici con oltre 5 abitazioni (oggetto dello studio effettuato nell'annualità 2019);
3. la "piccola" Italia dei centri storici, che rappresenta l'Italia della conservazione del patrimonio storico-artistico e del tessuto storico-edilizio.

Considerando il rilievo delle esigenze di conservazione e tutela per il terzo gruppo, il progetto "Ambiente costruito" si concentra soprattutto sui primi due per attuare azioni di miglioramento energetico.

13.2 Modello edilizio

13.2.1 Caratteristiche dimensionali e distributive

Per uniformità di analisi rispetto al modello descritto nel resoconto dell'annualità 2019, le caratteristiche dimensionali e distributive del modello di edificio "ricorrente" di questo supplemento si basano anch'esse sull'analisi del 15° censimento generale della popolazione e delle abitazioni, svolto dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) nel 2011⁵.

Gli edifici residenziali più numerosi a livello nazionale sono composti da due piani fuori terra⁶: 5.981.256 su un totale di 12.187.698 costruzioni (seguono quelle con tre elevazioni, che ammontano a 2.948.147). Questo gruppo è preminente in tutt'e cinque le ripartizioni del territorio nazionale (Nord-ovest, Nord-est, Centro, Sud, Isole). Di conseguenza, il modello rappresenta un edificio residenziale a due elevazioni.

In base al numero di interni, ricorrono più frequentemente le residenze singole (6.297.764), seguite dagli edifici con due interni (2.835.026)⁷. Anche suddividendo gli edifici residenziali per numero di abitazioni⁸, resta dominante il caso di una sola abitazione (6.541.746), seguita da quella con due (2.738.295). Pertanto, il modello edilizio sviluppato per lo studio consta di una sola unità immobiliare, distribuita su due livelli. I dati del censimento supportano questa scelta: guardando all'analisi incrociata per numero di interni e di piani fuori terra⁹, emerge che, fra gli edifici con un solo interno, sono più numerosi quelli sviluppati su due elevazioni; questa soluzione è la più frequente in tutte le ripartizioni territoriali, sebbene nel Sud e nelle Isole la differenza rispetto agli edifici a un solo piano sia ridotta in confronto alle altre parti del Paese.

Per definire la superficie utile del modello, si sono considerate le informazioni raccolte nel censimento in merito alle abitazioni occupate da persone residenti¹⁰. Questa suddivisione non tiene conto del numero di unità immobiliari che compongono l'edificio. A livello nazionale prevalgono le abitazioni in classe di superficie compresa fra 80 e 99 m² (6.081.472 su un totale di 24.135.177), seguite dalle classi 60-79 m² (4.993.602) e 100-119 m² (4.192.549). Questi gruppi sono i più frequenti in tutte le Ripartizioni; la classe preminente è sempre 80-99 m², ma nel Sud e nelle Isole le abitazioni fra 100 e 119 m² sono più numerose di quelle con superficie fra 60 e 79 m². Poiché questa suddivisione considera le abitazioni indipendentemente dal numero di unità immobiliari che compongono l'edificio e dal numero di elevazioni in cui ciascuna si sviluppa, nella definizione del modello si ritiene opportuno considerare una superficie utile¹¹ di 110 m², valore intermedio

⁵ I dati sono consultabili all'indirizzo <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx>.

⁶ Alloggi ed edifici > Edifici residenziali > Valori assoluti > Ripartizioni, regioni e province autonome > Edifici residenziali per numero di interni e numero di piani fuori terra (Numero di interni: totale).

⁷ Alloggi ed edifici > Edifici residenziali > Valori assoluti > Ripartizioni, regioni e province autonome > Edifici residenziali per numero di interni e numero di scale (Numero di scale: totale).

⁸ Alloggi ed edifici > Edifici residenziali > Valori assoluti > Ripartizioni, regioni e province autonome > Edifici residenziali per numero di abitazioni.

⁹ Alloggi ed edifici > Edifici residenziali > Valori assoluti > Ripartizioni, regioni e province autonome > Edifici residenziali per numero di interni e numero di piani fuori terra.

¹⁰ Alloggi ed edifici > Abitazioni occupate da persone residenti > Valori assoluti > Ripartizioni, regioni e province autonome > Abitazioni per numero di stanze e classe di superficie dell'abitazione (mq).

¹¹ Nel modulo "Foglio di famiglia" (http://siqua.istat.it/SIQual/files/CP.1_3P.pdf?ind=7777789&cod=4754&progr=1&tipo=4) del censimento, a pagina 6, si specifica di considerare come superficie dell'abitazione "la superficie del pavimento di tutte le stanze dell'abitazione, compresi i bagni, le cucine, i vani accessori ed esclusi i terrazzi, i balconi e le pertinenze (come, ad esempio, cantine, soffitte, garage e box auto)".

della classe 100-119 m², per tener conto della presenza del collegamento verticale interno e della maggior incidenza degli ambienti di disimpegno sulla superficie complessiva dell'unità immobiliare.

La superficie utile è divisa in parti uguali sulle due elevazioni del modello edilizio. Per limitare l'influenza dell'orientamento sui risultati delle simulazioni energetiche, si adoperava una pianta quadrata di lato pari a 7,4 m (il modello è delimitato dalle superfici interne dei componenti d'involucro). In analogia all'edificio di riferimento descritto nel resoconto dell'annualità 2019, si assume che la superficie lorda di piano sia pari a 1,2 volte la superficie netta, cioè 66 m².

L'altezza netta di piano corrisponde al valore minimo ammesso dal D.M. 05/07/1975 per i locali d'abitazione, cioè 2,70 m (con interpiano di 3 m). Per omogeneità rispetto al modello del resoconto dell'annualità 2019, la copertura dell'edificio è piana.

Per ogni facciata si è prevista una porta-finestra (1,2 m x 2,2 m) su ciascuna elevazione, rispettando dunque la prescrizione del D.M. 05/07/1975 in base alla quale la superficie finestrata apribile dev'essere pari almeno a 1/8 della superficie di pavimento (superficie aeroilluminante minima).

13.2.2 Caratteristiche costruttive

L'epoca di costruzione più frequente nel patrimonio residenziale italiano è il decennio 1971-1980¹²: 2.117.651 edifici su un totale di 12.187.698, seguito dal periodo 1961-1970 (2.050.833) e dagli edifici storici (1.832.504). Oltre che a livello nazionale, il gruppo 1971-1980 è prevalente al Sud e nelle Isole; il periodo 1961-1980 è il più frequente al Nord-est; gli edifici esistenti al 1918 sono il gruppo principale nel Nord-ovest e al Centro.

A livello nazionale e nelle ripartizioni Nord-ovest, Sud e Isole, gli edifici del periodo 1971-1980 sono costruiti prevalentemente con la tecnologia del calcestruzzo armato (907.046, mentre quelli in muratura portante ammontano a 863.666). Poiché le strutture intelaiate in calcestruzzo armato sono ampiamente diffuse in Italia, dal secondo dopoguerra, anche per edifici di dimensioni contenute, si assume che il modello edilizio rappresenti una costruzione realizzata con questa tecnologia costruttiva.

Per omogeneità, le caratteristiche costruttive dei componenti d'involucro sono quelle descritte nel paragrafo 5.1 del resoconto dell'annualità 2019. Si assume, inoltre, che la struttura sia composta da quattro maglie rettangolari di nove pilastri per piano, otto dei quali collocati nello spessore della chiusura verticale esterna.

13.2.3 Impianti di climatizzazione, ventilazione e produzione dell'acqua calda sanitaria

La dotazione impiantistica del modello è analoga a quella prevista nell'edificio "ricorrente" plurifamiliare descritto nel resoconto dell'annualità 2019, al quale si rimanda per le informazioni di dettaglio.

Sono stati previsti due generatori distinti, l'uno per il riscaldamento d'ambiente (l'emissione è affidata a radiatori) e l'altro per la produzione dell'acqua calda sanitaria. Il raffrescamento estivo è assolto da condizionatori.

Gli impianti per la climatizzazione sono stati dimensionati automaticamente da *EnergyPlus*, in modo da soddisfare il carico in condizioni di progetto. In quest'ottica si è definita una zona termica per ciascuna elevazione, entrambe climatizzate.

¹² Alloggi ed edifici > Edifici residenziali > Valori assoluti > Ripartizioni, regioni e province autonome > Edifici residenziali per tipo di materiale, stato di conservazione e epoca di costruzione (Tipo di materiale: tutte le voci; Stato di conservazione: totale).

13.2.2.1 Ventilazione

A livello di gestione degli impianti e della ventilazione è necessario verificare che siano assicurati i minimi ricambi d'aria per ogni appartamento, facendo riferimento alle specifiche della norma UNI/TS 11300-1:2014 sulle valutazioni di tipo *standard*. Si è fatto qui in particolare riferimento alla portata di ventilazione effettiva, condizione per il calcolo della prestazione dell'edificio (*prospetto 8*).

13.2.2.2 Acqua calda sanitaria

In merito all'acqua calda sanitaria per il modello edilizio unifamiliare, il volume richiesto è stimato in 154 litri giornalieri, corrispondenti a circa 56 m³ annui. Seguendo il procedimento descritto nel resoconto dell'annualità 2019, il consumo di picco è stimato in 0,000017 m³·s⁻¹.

13.2.2.3 Climatizzazione invernale

I programmi di funzionamento dell'impianto di riscaldamento centralizzato, definiti per le condizioni climatiche locali, prevedono che l'impianto sia acceso quotidianamente per un numero di ore pari a quello massimo consentito dal D.P.R. 74 del 2013.

Tabella 10: Classificazione di fasce climatiche per riscaldamento invernale in Italia e corrispondenti periodi di accensione e spegnimento degli impianti di riscaldamento

Fascia	Gradi giorno	Data inizio	Data fine	Ore giornaliere
A	0 – 600	1 dicembre	15 marzo	6
B	601 – 900	1 dicembre	31 marzo	8
C	901 – 1400	15 novembre	31 marzo	10
D	1401 – 2100	1 novembre	15 aprile	12
E	2101 – 3000	15 ottobre	15 aprile	14
F	3001 -	-	-	24

La scelta dei periodi giornalieri di accensione del riscaldamento è stata effettuata seguendo prassi comuni ed è rappresentata in Figura 300

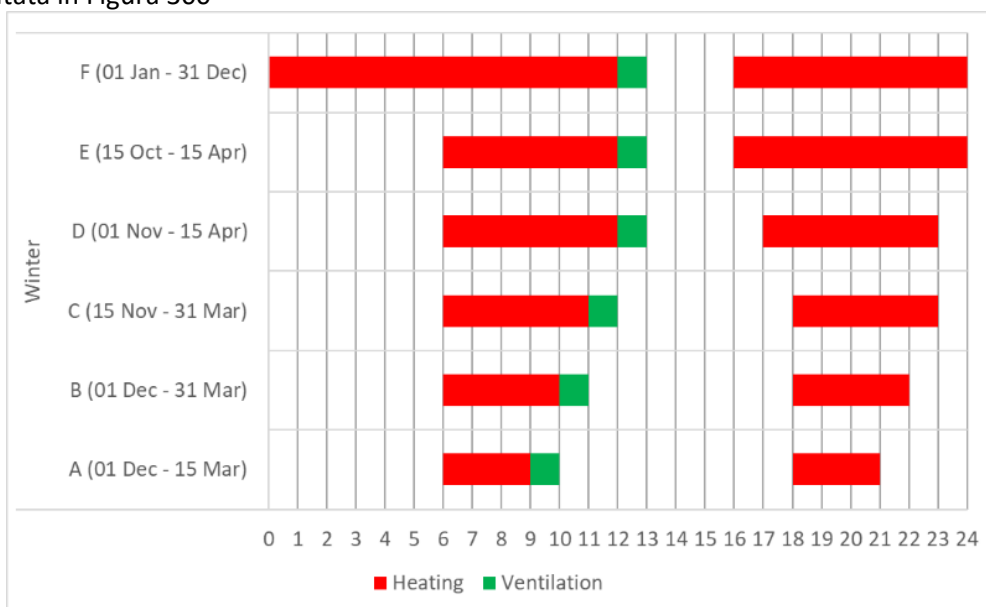


Figura 300: Programma degli orari di accensione del riscaldamento per zona climatica

Di concerto con la definizione degli orari di accensione e spegnimento dell'impianto di riscaldamento è stata anche definita la programmazione della ventilazione naturale. Come visibile in Figura 2, questa è stata fissata per un periodo di un'ora al giorno, in modo da non sovrapporsi agli orari di accensione del riscaldamento. Ai ricambi d'aria programmati si aggiungono le infiltrazioni d'aria, calcolate automaticamente dal *software*.

13.2.2.4 Climatizzazione estiva

La programmazione della climatizzazione e ventilazione estiva è più complessa di quella invernale: innanzitutto, in quanto non esplicitamente regolata da normative di legge; in secondo luogo, perché durante la stagione estiva si complica il controllo dell'umidità relativa al fine di assicurare le condizioni di benessere termoigrometrico degli occupanti; infine, si deve notare come d'estate la regolazione di temperatura e umidità sia spesso ottenuta tramite una combinazione di ventilazione naturale (apertura e chiusura delle finestre) e condizionamento artificiale dell'aria, aggiungendo quindi un'ulteriore variabile di controllo (invece d'inverno la ventilazione è volta ai ricambi d'aria e non al raggiungimento del benessere termoigrometrico).

Di conseguenza, si è deciso di approfondire la definizione dei programmi di ventilazione naturale e accensione degli impianti di condizionamento dell'aria. Nello specifico, sono state assegnate zone termiche anche per la stagione di condizionamento estivo e, per ciascuna di queste, sono stati definiti i programmi di accensione degli impianti di condizionamento dell'aria e di ventilazione naturale, in analogia a quanto effettuato per la modellazione per l'edificio ricorrente di tipo plurifamiliare modellato nell'annualità 2019.

13.3 Conclusioni: risultati delle simulazioni

Si è svolto lo stesso insieme di simulazioni descritto nel resoconto dell'annualità 2019 per il modello di edificio plurifamiliare. Le 75 simulazioni riguardano località italiane per la quale sia disponibile un *file* climatico completo e che corrispondano a centri abitati. Si fa, quindi, riferimento alla Figura 3 e alla tabella 2 per la rappresentazione indicativa della distribuzione dei diversi climi in Italia e per la lista completa delle località, inclusiva di zona climatica invernale (ZC_{inv}) e zona climatica estiva (ZC_{est}).

Per ogni regione per cui erano disponibili dati climatici è stata identificata una città di riferimento (*benchmark*), la lista completa delle città scelte è formata da Pescara (Abruzzo), Salerno (Campania), Bologna (Emilia-Romagna), Trieste (Friuli-Venezia Giulia), Roma (Lazio), Genova (Liguria), Brescia (Lombardia), Ascoli Piceno (Marche), Campobasso (Molise), Torino (Piemonte), Lecce (Puglia), Cagliari (Sardegna), Palermo (Sicilia), Firenze (Toscana), Bolzano (Trentino Alto-Adige), Perugia (Umbria) e Verona (Veneto).

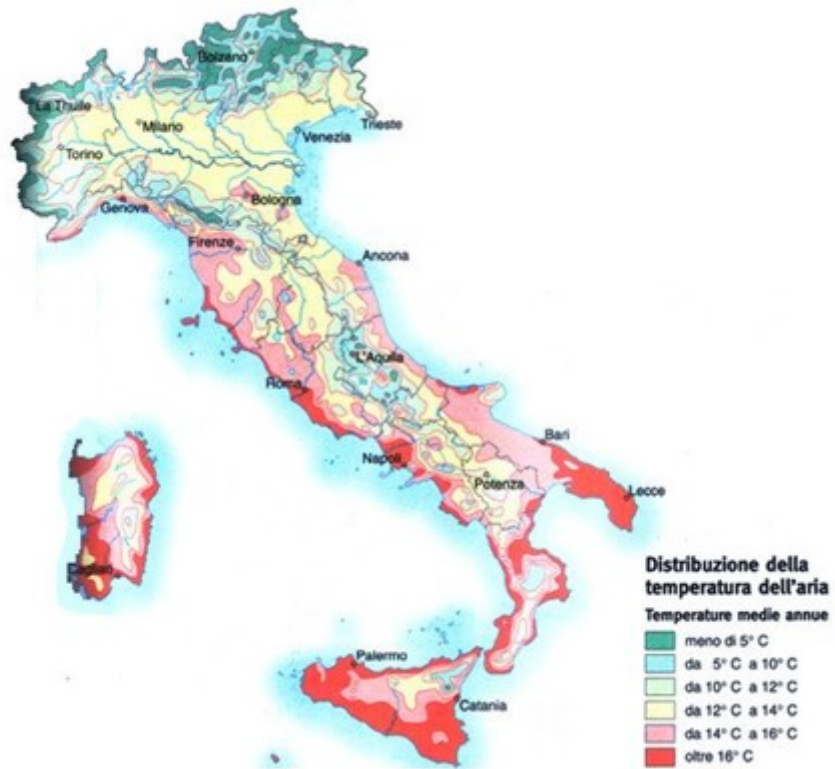


Figura 214: Distribuzione delle temperature medie annuali sul territorio italiano [fonte: meteobook.it]

Tabella 44: Lista delle località simulate

Nome località	Regione	ZC _{inv}	ZC _{est}	Nome località	Regione	ZC _{inv}	ZC _{est}
Pescara	Abruzzo	D	E	Bari	Puglia	C	E
Latronico	Basilicata	E	B	Bari (Aeroporto)	Puglia	C	E
Bonifati	Calabria	D	D	Brindisi	Puglia	C	E
Crotone	Calabria	B	F	Foggia	Puglia	D	E
Lamezia	Calabria	C	E	Ginosa	Puglia	D	G
Reggio Calabria	Calabria	B	F	Lecce	Puglia	C	F
Capri	Campania	C	F	Monte Sant'Angelo	Puglia	E	A
Salerno	Campania	C	G	Taranto	Puglia	C	F
Trevico	Campania	F	A	Alghero	Sardegna	C	E
Bologna	Emilia-Romagna	E	E	Cagliari	Sardegna	C	F
Cervia	Emilia-Romagna	E	C	Decimomannu	Sardegna	C	F
Ferrara	Emilia-Romagna	E	C	Olbia	Sardegna	C	G
Forlì	Emilia-Romagna	D	D	Catania (Fontanarossa)	Sicilia	B	G
Parma	Emilia-Romagna	E	D	Enna	Sicilia	E	C
Piacenza	Emilia-Romagna	E	B	Gela	Sicilia	B	G
Rimini	Emilia-Romagna	E	C	Lampedusa	Sicilia	A	G
Tarvisio	Friuli-Venezia Giulia	F	A	Palermo (Boccadifalco)	Sicilia	B	F
Trieste	Friuli-Venezia Giulia	E	D	Palermo (Punta Raisi)	Sicilia	B	F
Civitavecchia	Lazio	C	F	Pantelleria	Sicilia	B	F
Frosinone	Lazio	E	B	Prizzi	Sicilia	E	A
Latina	Lazio	C	D	Trapani	Sicilia	B	F
Messina		B	G	Ustica	Sicilia	B	F
Ponza	Lazio	C	D	Arezzo	Toscana	E	C
Roma (Ciampino)	Lazio	D	D	Firenze (aeroporto)	Toscana	D	D
Viterbo	Lazio	D	D	Grosseto	Toscana	D	D
Albenga	Liguria	C	D	Monte Argentario	Toscana	C	D
Genova	Liguria	D	E	Pisa (aeroporto)	Toscana	D	D
Brescia	Lombardia	E	D	Bolzano	Trentino-Alto Adige	E	C
Milano (Linate)	Lombardia	E	D	Dobbiaco	Trentino-Alto Adige	F	A
Milano (Malpensa)	Lombardia	E	B	Perugia	Umbria	E	B
Milano (Orio al Serio)	Lombardia	E	C	Istrana	Veneto	E	C
Ascoli Piceno	Marche	D	D	Padova	Veneto	E	C
Frontone	Marche	E	A	Treviso	Veneto	E	C
Campobasso	Molise	E	B	Venezia (Polo)	Veneto	E	C
Termoli	Molise	C	G	Verona	Veneto	E	C
Cuneo	Piemonte	F	B	Vicenza	Veneto	E	C
Torino	Piemonte	E	C				
Torino (Bric. Della Croce)	Piemonte	E	C				

I risultati ottenuti nel caso dell'edificio residenziale unifamiliare ricalcano sostanzialmente quanto osservato nel caso del condominio. In termini relativi: nel caso dell'indice EP invernale (EP_{inv}) le differenze di prestazioni sono sostanziali tra le varie zone climatiche, con una deviazione standard relativamente ridotta all'interno di ogni zona climatica (si veda Figura 302); nel caso dell'indice EP estivo (EP_{est}), nonostante sia

chiaro l'andamento crescente con il passaggio verso classi climatiche più elevate, si tendono a presentare ampie fasce di sovrapposizione (Figura 303).

I valori medi dell'EP nel caso dell'edificio unifamiliare sono invece significativamente più alti, principalmente a causa del fattore di forma, che è circa doppio per l'edificio residenziale unifamiliare rispetto al caso del condominio (rispettivamente 0.83 e 0.41). L'incremento dell'EP medio sia nel caso estivo che di quello invernale è rappresentato in Tabella 45, mostrando incrementi che oscillano tra il 63% e il 94% nel caso invernale e 41% e 52% nel caso estivo.

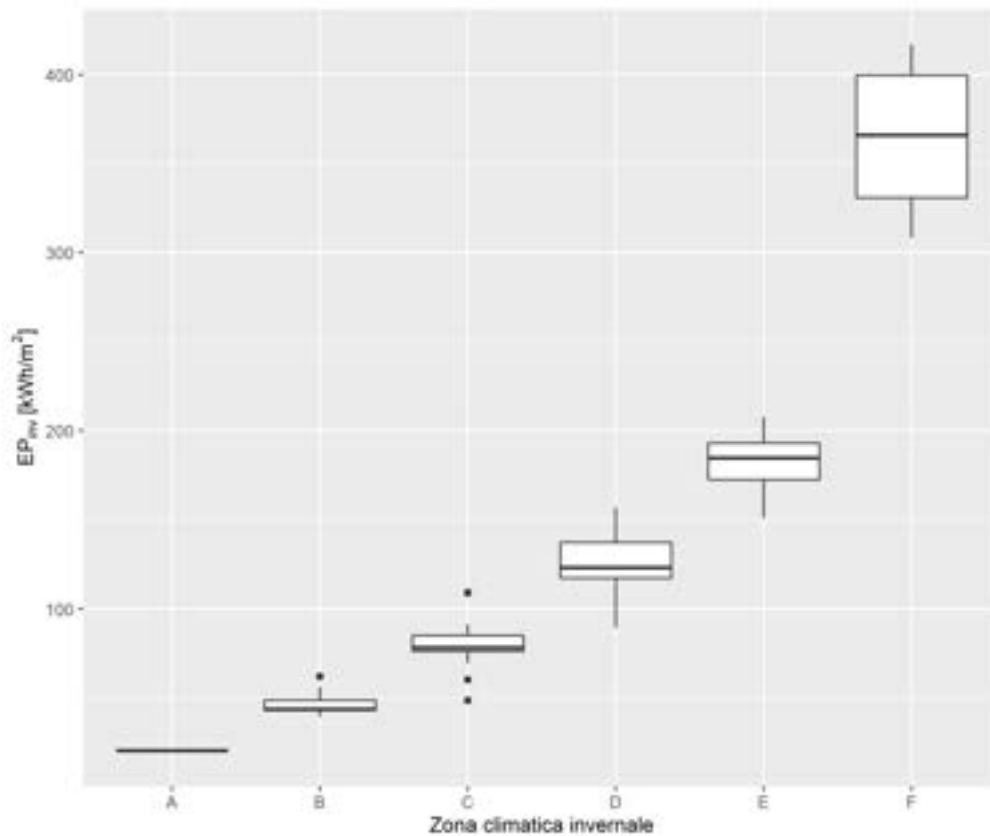


Figura 302: Diagramma a scatola e baffi dell'EP invernale per l'edificio residenziale unifamiliare, suddiviso per zona climatica invernale

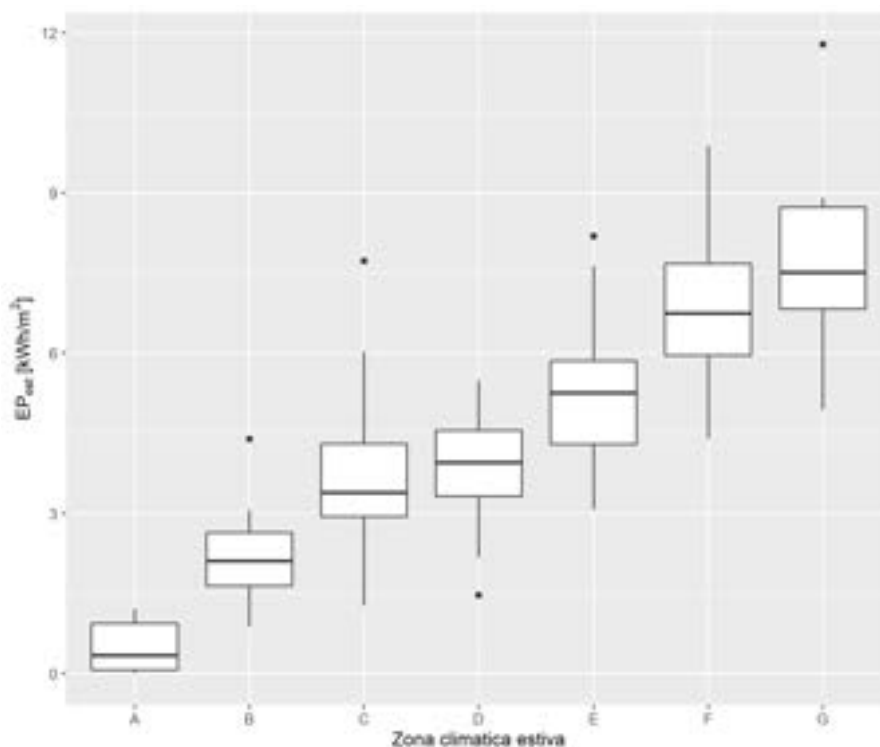


Figura 303: Diagramma a scatola e baffi dell'EP estivo per l'edificio residenziale unifamiliare, suddiviso per zona climatica estiva

Tabella 45: Confronto dei valori di EP estivi ed invernali medi per i due tipi di edifici considerati, al variare della zona climatica

ZC	Classificazione invernale			ZC	Classificazione estiva		
	Condominio	Ed. unif.	Diff.		Condominio	Ed. unif.	Diff.
A	12.5	20.4	63%	A	0.33	0.50	52%
B	28.5	47.0	65%	B	1.49	2.25	51%
C	47.7	80.0	68%	C	2.68	3.81	42%
D	72.9	126.0	73%	D	2.66	3.83	44%
E	103.0	183.0	78%	E	3.82	5.39	41%
F	188.0	364.0	94%	F	4.91	7.04	43%
				G	5.53	7.83	42%

Infine, il riassunto dei fabbisogni annuali di elettricità e gas naturale per il riscaldamento invernale e il condizionamento estivo dell'edificio selezionato sono rappresentati in Tabella 3 nel caso delle città scelte come più rappresentative.

Tabella 46: Riassunto dei fabbisogni annuali di elettricità e gas naturale per l'edificio residenziale unifamiliare

	Fabbisogno elettrico [MWh]	Fabbisogno gas naturale [MWh]	Fabbisogno elettrico [TEP]	Fabbisogno gas naturale [TEP]	\overline{EP}_{inv}	\overline{EP}_{est}
Pescara	0.512	13.7	0.096	1.18	125	4.30
Crotone	0.673	6.89	0.126	0.59	62	5.96
Salerno	0.832	7.69	0.155	0.66	70	7.35
Bologna	0.696	20.5	0.130	1.76	186	5.85
Trieste	0.490	16.6	0.092	1.43	151	3.96
Roma (Ciampino)	0.619	13.2	0.116	1.14	120	5.28
Genova	0.375	12.6	0.070	1.09	114	3.06
Brescia	0.488	20.4	0.091	1.76	186	3.94
Ascoli Piceno	0.421	15.5	0.079	1.33	140	3.45
Campobasso	0.311	19.6	0.058	1.69	179	2.28
Torino	0.358	22.4	0.067	1.93	204	2.75
Bari	0.925	5.40	0.173	0.46	49	8.20
Cagliari	0.672	8.51	0.126	0.73	77	5.89
Palermo (Boccadifalco)	0.765	4.84	0.143	0.42	44	6.82
Firenze (aeroporto)	0.642	14.5	0.120	1.25	132	5.48
Bolzano	0.289	22.2	0.054	1.91	201	2.12
Perugia	0.393	18.5	0.073	1.59	168	3.06
Verona	0.721	20.5	0.135	1.76	186	6.02

14 ATTIVITA' DI DISSEMINAZIONE

L'annualità è stata accompagnata da diverse attività di disseminazione che hanno consentito di far conoscere gli obiettivi del WP2 ad un vasto pubblico sia in Italia che all'estero.

Le problematiche legate alla pandemia hanno sicuramente limitato le opportunità ma non le hanno escluse del tutto. Per ovviare alle restrizioni legate agli incontri in presenza, sono state organizzate attività di tipo virtuale quali webinar, incontri e tavole rotonde virtuali, eventi pubblici con realizzazione anche di materiale video (<https://www.youtube.com/watch?v=rFpAhn0Wzyw>).

Si elencano di seguito alcune delle attività svolte durante le quali sono stati diffusi i risultati del WP2:

- Corsi per EGE organizzati da ENEA – Box con presentazione attività del WP2
- Articolo su EAI2020 - Energia Ambiente e Innovazione - “Prospettive e potenzialità dei sistemi Off-Site”
- RAE 2020 – Articolo “Tecnologie e trend negli edifici: la costruzione Off-Site”
- R2B on air – 10-12 Giugno 2020: partecipazione all'evento virtuale con presentazione di un video dedicato al WP2
- CF SEDSS III - Working Group 1. Energy Efficiency and Building's Performance – Il progetto è stato invitato a raccontare la propria esperienza all'interno della Consultation Forum for Sustainable Energy in the Defence and Security Sector con la prospettiva di poter diventare uno dei progetti papabili all'estensione in ambito Difesa.

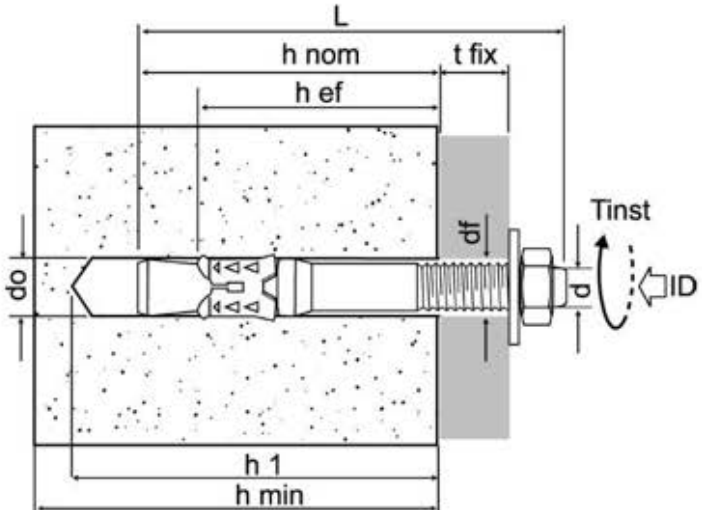

Quanto sopra elencato ha avuto lo scopo di diffondere informazioni e far conoscere meglio le attività ad un largo pubblico, ma, allo stesso tempo, sono state occasione di confronto utili ad accogliere feedback e osservazioni sia dal mondo dei professionisti che da quello aziendale. Ciò ha consentito di aprire nuovi canali ed occasioni per allargare possibilità future per il progetto.

Infine sono state organizzate diverse occasioni di scambio con aziende interessate a conoscere il progetto e disponibili a partecipare a interviste e tavole rotonde il cui obiettivo è stato quello di meglio comprendere le esigenze del mondo industriale e di intraprendere un percorso comune che possa condurre ad una razionalizzazione del processo produttivo finalizzato ad efficientare energeticamente l'intera *supply chain*.

15 ALLEGATI

15.1 ABACO DEGLI ANCORAGGI

AN1

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI
<p>Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4</p>		<p>Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120</p>
IMPIEGO		
		

AN2

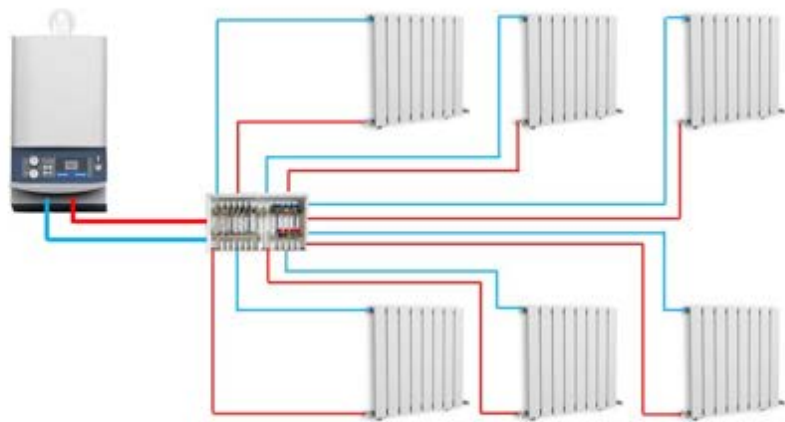
TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI
<p>Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H</p>		<p>Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120</p>
IMPIEGO		
		

15.2 ABACO DEGLI IMPIANTI

Legenda valutazione sistema

Molto basso	● ○ ○ ○ ○
Basso	● ● ○ ○ ○
Medio	● ● ● ○ ○
Alto	● ● ● ● ○
Molto alto	● ● ● ● ●

IMP1



Descrizione del sistema

Generazione	Caldaia a condensazione
Distribuzione	Acqua
Emissione	Radiatori

Valutazione del sistema

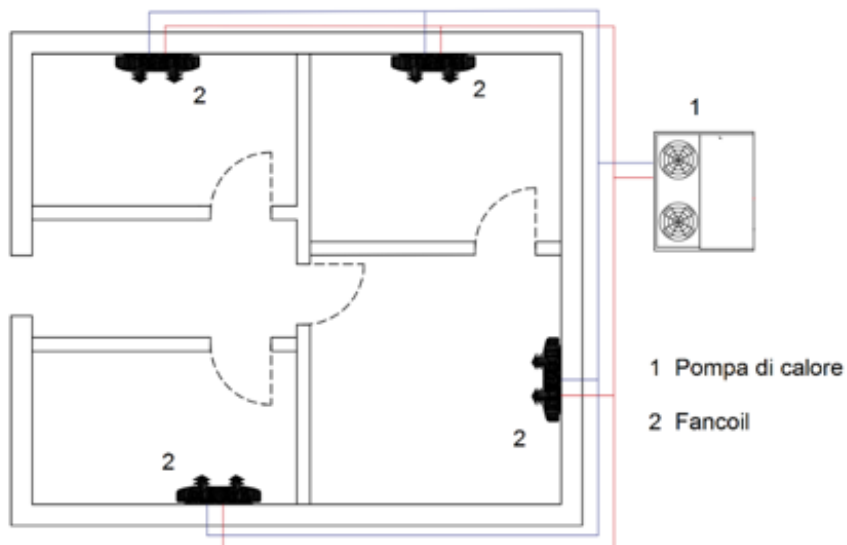
Zone climatiche consigliate	Zona C - Zona D
Costo di investimento	● ○ ○ ○ ○
Efficienza	● ● ● ○ ○
Complessità impianto	● ○ ○ ○ ○
Potenzialità integrazione FER	● ● ● ○ ○

IMP2

1 Caldaia a condensazione
2 Fancoil

Descrizione del sistema	
Generazione	Caldaia a condensazione
Distribuzione	Acqua
Emissione	Fan coil
Valutazione del sistema	
Zone climatiche consigliate	Zona F
Costo di investimento	●●○○○
Efficienza	●●●●○
Complessità impianto	●○○○○
Potenzialità integrazione FER	●●●○○

IMP3



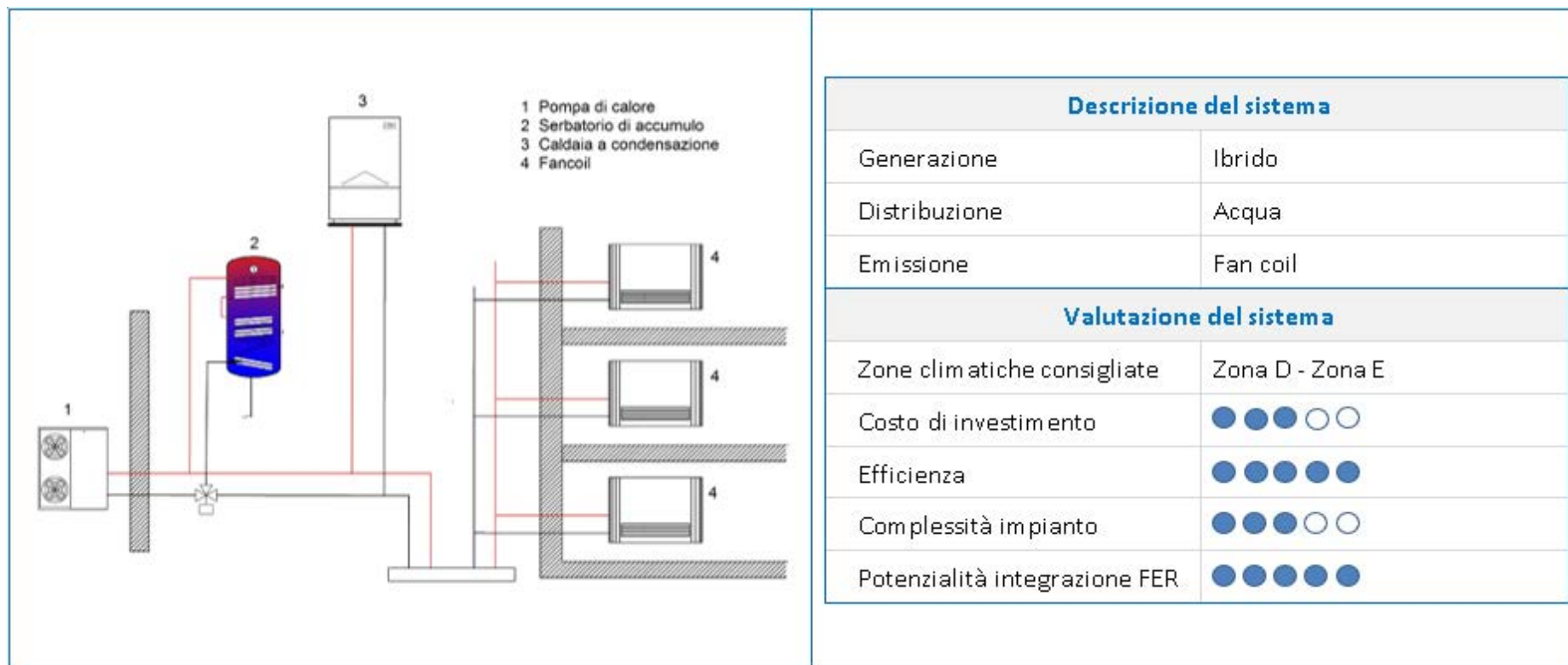
Descrizione del sistema

Generazione	Pompa di calore
Distribuzione	Acqua
Emissione	Fan coil

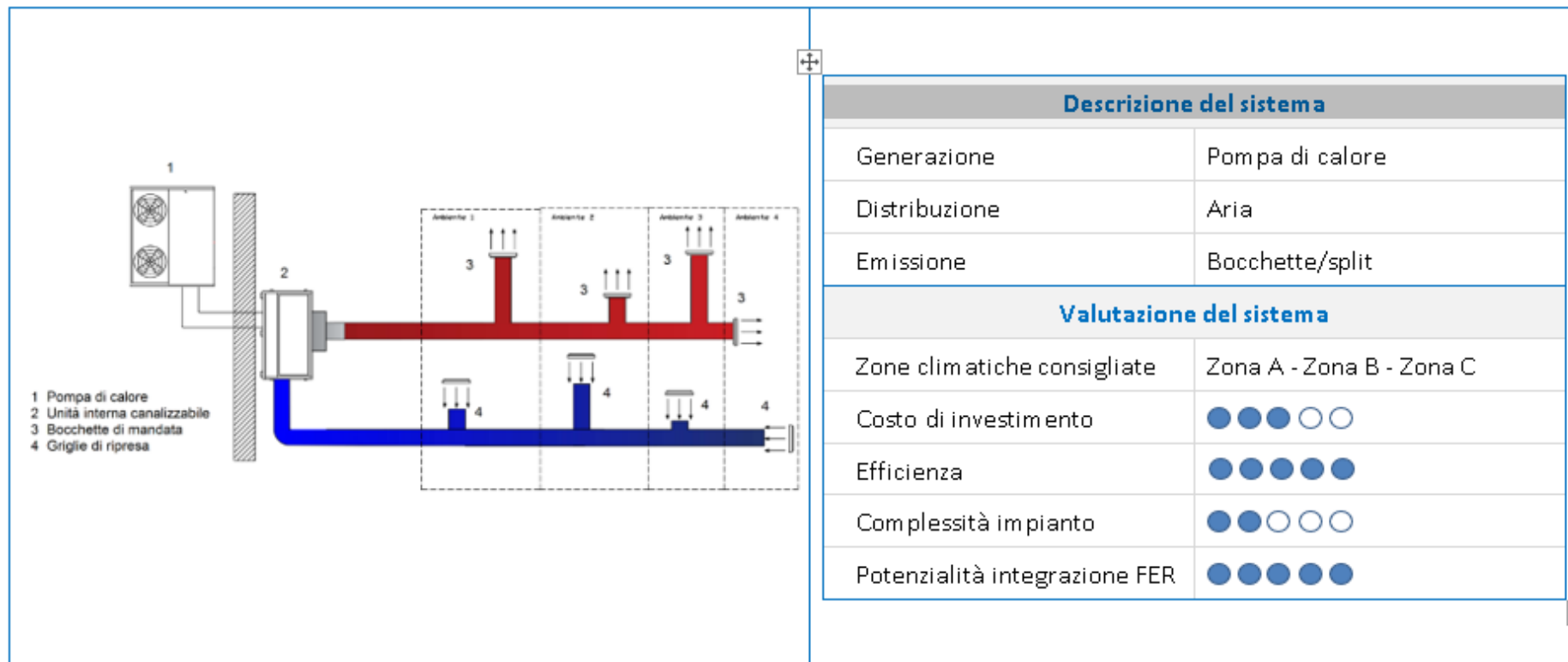
Valutazione del sistema

Zone climatiche consigliate	Zona A - Zona B - Zona C
Costo di investimento	● ● ● ○ ○
Efficienza	● ● ● ● ●
Complessità impianto	● ○ ○ ○ ○
Potenzialità integrazione FER	● ● ● ● ●

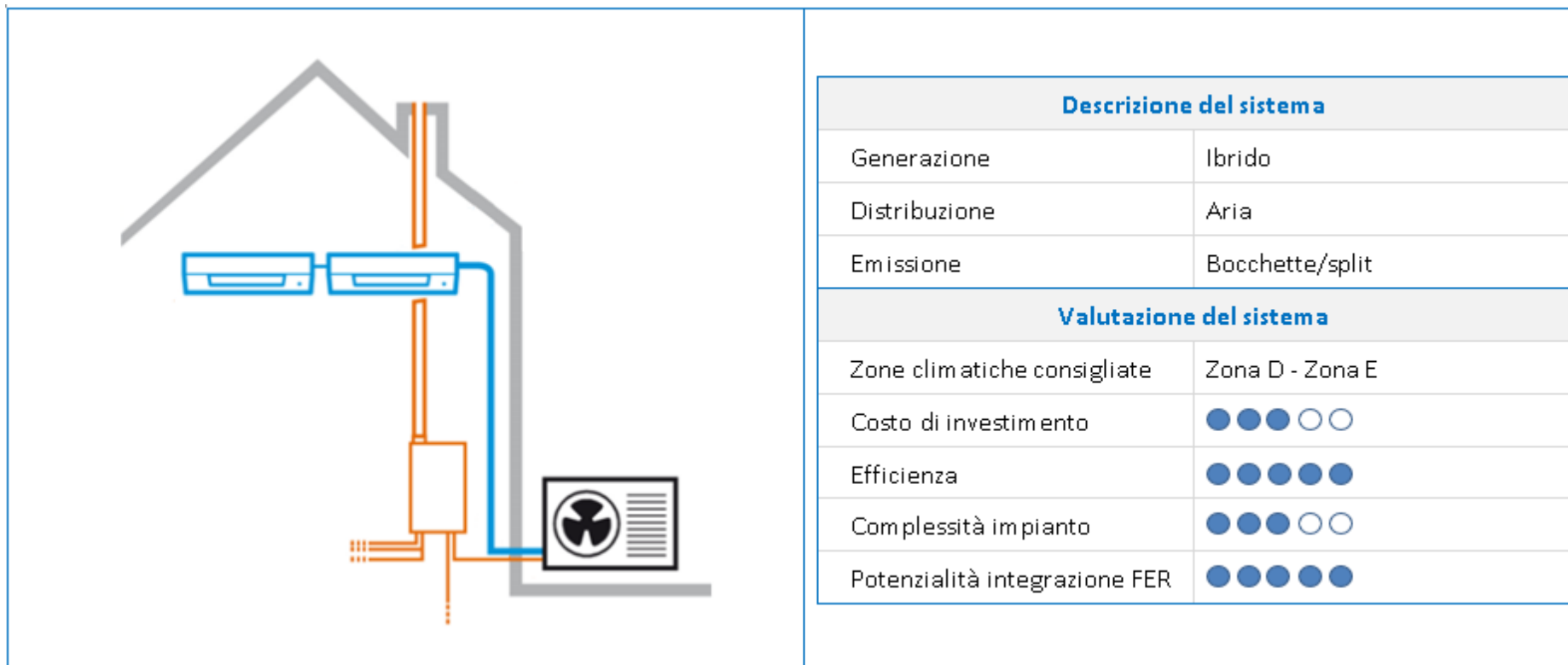
IMP4



IMP5



IMP6



15.3 CATALOGO SOLUZIONI STANDARDIZZATE


CATALOGO DELLE SOLUZIONI STANDARDIZZATE				
Soluzione	Isolante	Impianto		
		Distribuzione	Generazione	Emissione
S1	XPS	No impianto		
S2	XPS	Acqua	Caldaia a condensazione	Radiatori
S3	XPS	Acqua	Caldaia a condensazione	Fan coil
S4	XPS	Acqua	Pompa di calore	Fan coil
S5	XPS	Acqua	Ibrido	Fan coil
S6	XPS	Aria	Pompa di calore	Bocchette/split
S7	XPS	Aria	Ibrido	Bocchette/split
S8	Silicato	No impianto		
S9	Silicato	Acqua	Caldaia a condensazione	Radiatori
S10	Silicato	Acqua	Caldaia a condensazione	Fan coil
S11	Silicato	Acqua	Pompa di calore	Fan coil
S12	Silicato	Acqua	Ibrido	Fan coil
S13	Silicato	Aria	Pompa di calore	Bocchette/split
S14	Silicato	Aria	Ibrido	Bocchette/split
S15	Stiferite	No impianto		
S16	Stiferite	Acqua	Caldaia a condensazione	Radiatori
S17	Stiferite	Acqua	Caldaia a condensazione	Fan coil
S18	Stiferite	Acqua	Pompa di calore	Fan coil
S19	Stiferite	Acqua	Ibrido	Fan coil
S20	Stiferite	Aria	Pompa di calore	Bocchette/split
S21	Stiferite	Aria	Ibrido	Bocchette/split

Legenda colori tabelle

Valutazione complessiva	
Basso	1
Medio	2
Alto	3

Detrazioni fiscali	
Fruibile	
Non fruibile	

S1

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 XPS	Assente	3	1	3	1	3
		Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

S2

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 <p>XPS</p>	 <p>caldaia a condensazione</p>	2	2	2	2	3
	distribuzione: acqua terminali: radiatori	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
<p>Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4</p>		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
<p>Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H</p>		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	



S3

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 XPS	 caldaia a condensazione	2	2	2	2	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	



S4

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 XPS	 pompa di calore	1	3	2	3	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil					
Valutazione complessiva						

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

S5

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 XPS	 ibrido	1	3	1	3	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	


S6

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 XPS	 pompa di calore	1	3	2	3	3
	distribuzione: aria terminali: bocchette/split	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	


S7

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 XPS	 ibrido	1	3	1	3	3
	distribuzione: aria terminali: bocchette/split		Valutazione complessiva			

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

S8

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 <p>Silicato</p>	Assente	3	1	3	1	3
		Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
<p>Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4</p>		<p>Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120</p>	
<p>Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H</p>		<p>Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120</p>	

S9

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Silicato	 caldaia a condensazione	2	2	2	2	3
	distribuzione: acqua terminali: radiatori	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	


S10

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Silicato	 caldaia a condensazione	2	2	2	2	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

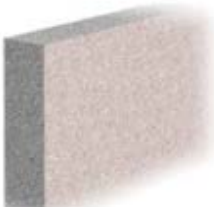

S11

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Silicato	 pompa di calore	1	3	2	3	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	



S12

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Silicato	 ibrido	1	3	1	3	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

S13

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Silicato	 pompa di calore	1	3	2	3	3
	distribuzione: aria terminali: bocchette/split		Valutazione complessiva			

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	


S14

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Silicato	 ibrido	1	3	1	3	3
	distribuzione: aria terminali: bocchette/split	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

S15

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 <p>Stiferite (XPS con grafene)</p>	Assente	3	1	3	1	3
		Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
<p>Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4</p>		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
<p>Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H</p>		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

S16

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 <p>Stiferite (XPS con grafene)</p>	 <p>caldaia a condensazione</p>	2	2	2	2	3
	<p>distribuzione: acqua terminali: radiatori</p>					
Valutazione complessiva						

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
<p>Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4</p>		<p>Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120</p>	
<p>Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H</p>		<p>Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120</p>	


S17

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Stiferite (XPS con grafene)	 caldaia a condensazione	2	2	2	2	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

S18

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 <p>Stiferite (XPS con grafene)</p>	 <p>pompa di calore</p>	1	3	2	3	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil					
Valutazione complessiva						

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
<p>Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4</p>		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
<p>Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H</p>		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

S19

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Stiferite (XPS con grafene)	 ibrido	1	3	1	3	3
	distribuzione: acqua terminali: fan coil	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	



S20

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 <p>Stiferite (XPS con grafene)</p>	 <p>pompa di calore</p>	1	3	2	3	3
	<p>distribuzione: aria terminali: bocchette/split</p>					
Valutazione complessiva						

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
<p>Tassello meccanico pesante Friulsider FM-753 crack A4</p>		<p>Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120</p>	
<p>Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H</p>		<p>Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120</p>	

S21

ISOLANTE	TIPOLOGIA IMPIANTO	INVESTIMENTO	EFFICIENZA	COMPLESSITÀ	INTEGRAZIONE FER	DETRAIBILITÀ
 Stiferite (XPS con grafene)	 ibrido	1	3	1	3	3
	distribuzione: aria terminali: bocchette/split	Valutazione complessiva				

DETRAZIONI	RISTRUTTURAZIONE	ECOBONUS	BONUS FACCIATE	SUPERBONUS	SISMABONUS

TIPOLOGIA ANCORAGGIO	GEOMETRIA	CERTIFICAZIONI	IMPIEGO
Tassello Meccanico Pesante Friulsider FM-753 crack A4		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	
Tassello chimico Friulsider Injection System KEM H		Prestazione sismica C1 e C2 Calcestruzzo fessurato Resistenza al fuoco R120	

16 Riferimenti bibliografici

SEZIONE I – INTEGRAZIONE IMPIANTI AL MODULO

- [1] “15° Censimento Generale della popolazione e delle abitazioni – censimento 2011”, ISTAT.
- [2] ANNEX 50 “Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings” Available: www.ecbcs.org/annexes/annex50.htm
- [3] A, Andaloro, et al. (2019) *Market Survey of Prefabricated Envelopes for New and Existing Buildings*. 2018.
- [4] Artola et al. “Renovating the EU building stock”
- [5] Ballarini, I.; Corgnati, S.P.; Corrado, V. “Use of reference buildings to assess the energy savings potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project”. *Energy Policy* 2014,68, 273–284
- [6] Basso, P., Mililli, M., Herrero, F. J. M., Sanz, R., & Casaldiga, P. (2017). “E2VENT – design and integration of an adaptable module for residential building renovation”. *Journal of Facade Design and Engineering*, 5(2), 7–23.
- [7] BERTIM – Innovative wood prefabrication for energy efficient renovations. Project results booklet, April 2019.
- [8] BERTIM Available: <http://www.bertim.eu/>
- [9] *D2.1 BERTIM Holistic renovation process*
- [10] Bournas, D. “Innovative Materials for Seismic and Energy Retrofitting of the Existing EU Buildings”; *EUR 29184 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg*, 2018.
- [11] Brumana, R., et al. “ALER Building in Cinisello Balsamo (MI): An Example of Energy Efficient Refurbishment with EASEE Method.” *Proceedings of Italian Concrete Days 2016*, edited by Marco di Prisco and Marco Menegotto, Springer International Publishing, 2018, pp. 467–80.
- [12] Corrado, V.; Ballarini, I.; Corgnati, S.P. “Building Typology Brochure—Italy. Fascicolo Sulla Tipologia Edilizia Italiana. Nuova Edizione”; Politecnico di Torino: Torino, Italy, 2014.
- [13] Correia Lopes, G., Vicente, R., Azenha, M., & Ferreira, T. M. (2018). “A systematic review of Prefabricated Enclosure Wall Panel Systems: Focus on technology driven for performance requirements”. *Sustainable Cities and Society*, 40, 688–703.
- [14] Dannapfel, Verena. “The PLUG-N-HARVEST Facade: A Second Skin with Active and Passive Components.” *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 7, no. 1, Oct. 2018, pp. 101–14.
- [15] “Driving transformational change in the construction value chain”, BPIE, 2016. Available: <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2016/01/DrivingTransformationalChangeCVC2016.pdf>
- [16] D’Oca, Simona, et al. “Technical, Financial, and Social Barriers and Challenges in Deep Building Renovation: Integration of Lessons Learned from the H2020 Cluster Projects.” *Buildings*, vol. 8, no. 12, Dec. 2018, p. 174.
- [17] Dugué A., Raji S., Bonnamy P., Bruneau D., “E2VENT: An Energy Efficient Ventilated Façade Retrofitting System. Presentation of the Embedded LHTES System”, *Procedia Environmental Sciences*, Volume 38, 2017, pp. 121-129.
- [18] Du, Hu, et al. “Modular Facade Retrofit with Renewable Energy Technologies: The Definition and Current Status in Europe.” *Energy and Buildings*, vol. 205, Dec. 2019, p. 109543.
- [19] EASEE – Project Final Report, 2016.
- [20] ENEA, “Piano d’Azione italiano per l’Efficienza Energetica PAEE 2017”, Giugno 2017.
- [21] ENEA, “Rapporto Annuale sull’Efficienza Energetica 2019”
- [22] IEE-EPISCOPE Project. Available: <http://episcopes.eu/>
- [23] iNSPIRE – Project Final Report, 2016.
- [24] Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). Available: <http://www.istat.it/>
- [25] Iturralde, K., Linner, T., & Bock, T. (2016, July 21). “Development of a Modular and Integrated Product-Manufacturing-Installation System Kit for the Automation of the Refurbishment Process

- in the Research Project BERTIM". *33th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Auburn, AL, USA.
- [26] Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi A., Aboagye-Nimo, E., "A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018", *Journal of Cleaner Production*, Volume 202, 2018, pp. 1202-1219.
- [27] Laradogoitia, N. T., Iturralde, K., Arlazon, N. L., Juez, O. M., Sebesi, Y., & Block, T. (2020). SOLUTIONS FOR DIGITISATION AND PREFABRICATION IN THE ENERGY REFURBISHMENT OF BUILDINGS. *DYNA*, 95(1), 34–38.
- [28] Li, Yangluxi, and Lei Chen. "A Study on Database of Modular Façade Retrofitting Building Envelope." *Energy and Buildings*, vol. 214, May 2020, p. 109826.
- [29] Loss, Cristiano, et al. "Connections for Steel–Timber Hybrid Prefabricated Buildings. Part II: Innovative Modular Structures." *Construction and Building Materials*, vol. 122, Sept. 2016, pp. 796–808.
- [30] Manfredi, V.; Masi, A. "Seismic Strengthening and Energy Efficiency: Towards an Integrated Approach for the Rehabilitation of Existing RC Buildings". *Buildings* 2018, 8, 36.
- [31] Marini, A.; Passoni, C.; Belleri, A.; Feroldi, F.; Preti, M.; Metelli, G.; Riva, P.; Giuriani, E.; Plizzari, G. "Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: A proof of concept". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2017, 21, 1–21.
- [32] Margani, Giuseppe, et al. "Energy, Seismic, and Architectural Renovation of RC Framed Buildings with Prefabricated Timber Panels." *Sustainability*, vol. 12, no. 12, Jan. 2020, p. 4845.
- [33] MORE-CONNECT (MODular RETrofitting and CONNECTions). Available: <http://www.more-connect.eu/>
- D2.3 - Modular prefab integrated HVAC units: description and development of demonstration units*
- D2.4 – Smart connectors*
- D3.3 – Production and construction specifications: building blocks of deep retrofitting*
- [34] Ochs F., Siegele D., Dermentzis G., Feist W., "Prefabricated Timber Frame Façade with Integrated Active Components for Minimal Invasive Renovations", *Energy Procedia*, Volume 78, 2015, pp. 61-66.
- [35] Ochs, F., Hernandez-Maetschl, S., & Feist, W. (2016). "Prefabricated timber envelopes for retrofit with integrated heating system and building services".
- [36] Peep Pihelo, Targo Kalamees, Kalle Kuusk, "nZEB Renovation with Prefabricated Modular Panels". (2017). *Energy Procedia*, 132, 1006–1011.
- [37] Salvalai, G., Iannaccone, G., Sesana, M. M., & Pizzi, E. (2017). "Outer facade retrofitting through precast insulation panels: method and planning tool applied to an Italian residential building". *Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture*, 3(2), 12–23.
- [38] F. Baldi, E. Genova, A. Gugliandolo, M.-A. Segreto, C. Romeo, "Simulazione in regime dinamico di edifici rappresentativi del parco edilizio italiano", Report RdS/PTR2019/064, ENEA-MiSE, Dicembre 2019.
- [39] State-of-the-art Deep Renovation Concept With Modular Prefabricated Façade And Roof Panels: Experiences from The Netherlands MORE-CONNECT WP3.2, May 2017, J.A.W.H. Van Oorschot, Msc., Ed. Available: <https://www.more-connect.eu/wp-content/uploads/2018/10/STATE-OF-THE-ART-DEEP-RENOVATION-CONCEPT-D3.2.pdf>
- [40] Tetta, Zoi C., and Dionysios A. Bournas. "TRM vs FRP Jacketing in Shear Strengthening of Concrete Members Subjected to High Temperatures." *Composites Part B: Engineering*, vol. 106, Dec. 2016, pp. 190–205.
- [41] Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project Available: https://www.episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/report/TABULA_FinalReport_AppendixVolume.pdf
- [42] UNI 10200: 2013 "Impianti termici centralizzati di climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria - Criteri di ripartizione delle spese di climatizzazione invernale ed acqua calda sanitaria"

- [43] UNI/TS 11300-2:2008 “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Maggio 2008.
- [44] UNI/TS 11300-2:2014 “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali”
- [45] UNI 10200:2015 “Impianti termici centralizzati di climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria - Criteri di ripartizione delle spese di climatizzazione invernale ed acqua calda sanitaria”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Giugno 2015.
- [46] Vavallo, Michele, et al. “Accelerating Energy Renovation Solution for Zero Energy Buildings and Neighbourhoods—The Experience of the RenoZEB Project.” *Proceedings*, vol. 20, no. 1, 2019, p. 1.
- [47] Veld, P. O. ‘t. (2015). MORE-CONNECT: Development and Advanced Prefabrication of Innovative, Multifunctional Building Envelope Elements for Modular Retrofitting and Smart Connections. *Energy Procedia*, 78, 1057–1062.
- [48] Wood Beton – Sistema Rhinoceros-Wall. Available: <https://www.woodbeton.it/sistemi/rhinoceros-wall/>

SEZIONE II - ANCORAGGI

- [1] *COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI.*
- [2] «Italian Accelerometric Archive,» [Online]. Available: http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_31/#/home
- [3] *D.M. 30 maggio 1972 “Norme tecniche alle quali devono uniformarsi le costruzioni in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica”,.*
- [4] «ETANCO S.Cop. Italia,» [Online]. Available: <http://www.etanco.it/>
- [5] «FLORIM S.p.A.,» [Online]. Available: <https://www.florim.com/it/>
- [6] «FLORIM Industrial Gres Porcellanato,» [Online]. Available: <https://www.florim.com/it/floorgres/collezione/industrial/#specifiche>
- [7] «FUNDERMAX,» [Online]. Available: <https://www.fundermax.at/>
- [8] «FunderMax Pannelli HPL Max Compact Exterior,» [Online]. Available: https://www.fundermax.at/fileadmin/redakteure/Downloads_ITALIENISCH/Exterior_Technik_IT_web.pdf
- [9] «Tassello Meccanico Pesante Friulsider FM-753 CRACK,» [Online]. Available: <https://www.friulsider.com/prodotti/174/fm-753-crack-inox.html>
- [10] «Tassello Chimico Friulsider KEM H,» [Online]. Available: <https://www.friulsider.com/api/repo/attachments/1633/file/CATit%202020%20KEM.pdf>
- [11] «Sistema FLORIM MAGNUM S1,» [Online]. Available: https://media.florim.com/media/download/en/solutions/system_s1/System_S1_Magnum_-_ETA_certification
- [12] «SikaTack Panel,» [Online]. Available: https://ita.sika.com/content/dam/dms/itgen/1/sikatack_panel.pdf
- [13] «IRONDOM Steel Frame,» [Online]. Available: <https://irondom.it/#>
- [14] «Tecno Canapa - Canafiber,» [Online]. Available: <https://tecnocanapa-bioedilizia.it/canafiber/>
- [15] «Lamiera Grecata Alubel 21,» [Online]. Available: <https://www.alubel.com/it/lastre-grecate/alubel-21-lastra-grecata-per-copertura.html>
- [16] «Pannelli cementolegno BetonWood,» [Online]. Available: https://www.betonwood.com/pdf/Scheda_tecnica_cementolegno_BetonWood.pdf
- [17] «Schremo freno al vapore Rothoblaas Vapor 150,» [Online]. Available: <https://www.rothoblaas.it/prodotti/tenuta-aria-e-impermeabilizzazione/membrane/vapor/vapor-150>

- [18] «Actis Triso Bardage,» [Online]. Available: <https://www.actis-isolamento.com/files/actis/pdfs/it/documentazioni/PZ734%20FT%20TRISO%20BARDAGE%20IT%201119%20BD.pdf>

17 Abbreviazioni ed acronimi

AAC	Autoclaved Aerated Concrete
ACS	Acqua Calda Sanitaria
BIM	Building Information Modeling
BMS	Building Management System
BPSM	Building Performance Simulation Models
CDW	Construction and Demolition Waste
CLT	Cross-Laminated Timber
EPS	Polistirene Espanso Sinterizzato
ETICS	External Thermal Insulation Composite System
FP7	Seventh Framework Programme
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
ICT	Information and Communications Technology
ISTAT	Istituto Nazionale di Statistica
LHTES	Latent-Heat based Thermal Energy Storage
MFR	Modular Façade Retrofit
MFRn	Modular Façade Retrofit with Renewable energy technologies
MVHR	Mechanical Ventilation with Heat Recovery
nZEB	Nearly Zero Energy Building
OSB	Oriented Strand Board
OSC	Off Site Construction
PEWPS	Prefabricated Enclosure Wall Panel Systems
PCM	Phase Change Material
PnP	Plug and Play
PV	Fotovoltaico
RES	Renewable Energy Systems
SEN	Strategia Energetica Nazionale
SMHRU	Smart Modular Heat Recovery Unit
ST	Solare Termico
TEP	Tonnellate Equivalenti di Petrolio
TRC	Textile Reinforced Concrete
TRM	Textile Reinforced Mortar
VMC	Ventilazione Meccanica Controllata