



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Luglio 2025

**Valutazione olistica della
sicurezza antincendio delle
chiusure d'ambito:**

Applicazioni di Fire Safety Engineering

Relatori:

Prof. Ing. Roberto Vancetti

Correlatori:

Ing. Filippo Così

Ing. Emiliano Cereda

Candidati:

Francesco Lotta

Sommario

INDICE DELLE FIGURE	0
INDICE DELLE TABELLE	4
Abstract.....	0
1. Introduzione.....	2
1.1 Obiettivi della tesi.....	2
1.2 Struttura del lavoro	3
1.3 Contesto normativo e tecnico	4
1.4 Eventi storicamente rilevanti	5
2. Inquadramento normativo e metodologico.....	9
2.1 Il Codice di Prevenzione Incendi struttura e principi	9
2.2 La Regola Tecnica Verticale (RTV 13): Chiusure d’ambito degli edifici civili	11
2.2.1 Tecnologie costruttive delle chiusure d’ambito.....	12
2.2.2 Scenari d’incendio in facciata	13
2.2.3 Reazione al fuoco dei materiali	14
2.2.4 Sistemi di protezione passiva (Fasce di separazione).....	18
2.3 Metodologie prestazionali e approccio ingegneristico con la Fyre Safety Engineering.....	19
2.3.1 Capitolo M1 (Metodologia di progettazione dell’ingegneria della sicurezza antincendio)	19
2.3.2 Capitolo M.2 (Scenari di incendio per la progettazione prestazionale)	20
2.3.3 Capitolo M3 (Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale) ...	24
3. Caso studio	27
3.1 Inquadramento generale del caso esemplificativo oggetto della Tesi	27
3.2 Obiettivi della verifica comparativa	30
3.2.1 Soluzione 1	31
3.2.2 Soluzione 2	33
3.2.3 Soluzione 3	35
4. Simulazioni FSE e strumenti utilizzati	38
4.1 Strumenti: FDS e PyroSim	38
4.2 Costruzione del modello geometrico e definizione dei parametri di input.....	44
4.2.1 Mesh	45
4.2.2 Modellazione geometrica	51

4.2.3	Caratterizzazione dell'involucro e dell'incendio.....	53
4.2.4	Device e controlli.....	61
4.2.5	Definizione dei parametri di simulazione.....	65
4.3	Definizione degli scenari d'incendio	68
5.	Analisi dei risultati – comportamento al fuoco delle facciate	72
5.1	Risultati modello a due piani	73
5.1.1	Scenario TLF2P_ET_01	73
5.1.2	Scenario TLF2P_ET_02	79
5.1.3	Scenario TLF2P_ET_03	85
5.1.4	Scenario TLF2P_EF_01	91
5.1.5	Scenario TLF2P_EF_02	97
5.1.6	Scenario TLF2P_EF_03	103
5.1.7	Scenario TLF2P_ES_01	109
5.1.8	Scenario TLF2P_ES_02	115
5.1.9	Scenario TLF2P_ES_03	121
5.1.10	Scenario TLF2P_E.....	127
5.2	Risultati modello edificio	133
5.2.1	Scenario TLFEI_01	133
5.2.2	Scenario TLFEI_02	145
5.2.3	Scenario TLFEI_03	157
5.2.4	Scenario TLFEI_04	169
5.3	Confronto prestazionale tra le due soluzioni alternative	181
5.3.1	Confronto tempi di innesco compartimento superiore	181
5.3.2	Confronto temperature interne.....	184
6.	Conclusioni.....	189
6.1	Sintesi dei risultati ottenuti	189
6.2	Prospettive di approfondimento e ricerca futura	190
	Bibliografia.....	191

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 INCENDIO GREENFELL TOWER [1]	6
FIGURA 2 INCENDIO TORRE DEI MORO [2]	7
FIGURA 3 INCENDIO VALENCIA [3]	8
FIGURA 4 CHIUSURA D'AMBITO	12
FIGURA 5 SISTEMI TECNOLOGICI DI FACCIATA [4]	13
FIGURA 6 PROPAGAZIONE INCENDIO ORIGINATO ALL'INTERNO [8]	13
FIGURA 7 PROPAGAZIONE INCENDIO ORIGINATO ALL'ESTERNO [8]	14
FIGURA 8 CLASSIFICAZIONE RTV13 [4]	15
FIGURA 9 ESEMPIO FASCE DI SEPARAZIONE [4]	18
FIGURA 10 ESTRATTO DAL CODICE DI PREVENZIONE INCENDI (GEOMETRIA DELLE FASCE DI SEPARAZIONE) [5]	19
FIGURA 11 RAPPRESENTAZIONE DELLE FASI DELL'INCENDIO ATTRAVERSO LA CURVA RHR [5]	21
FIGURA 12 M.3-1: CONFRONTO TRA ASET ED RSET [5]	24
FIGURA 13 PIANTA PIANO TIPO PRIMI 17 PIANI	28
FIGURA 14 PIANTA PIANO TIPO ULTIMI 7 PIANI	29
FIGURA 15 SOLUZIONE CONFORME RTV13 VISTA SUD-OVEST	31
FIGURA 16 SOLUZIONE CONFORME RTV13 VISTA NORD-OVEST	32
FIGURA 17 SOLUZIONE DIFFORME RTV13 PER MATERIALE (EPS) VISTA SUD-OVEST	33
FIGURA 18 SOLUZIONE DIFFORME RTV13 PER MATERIALE VISTA (EPS) NORD-OVEST	34
FIGURA 19 SOLUZIONE DIFFORME RTV13 PER MATERIALE (EPS) CON UTILIZZO DI MARCAPIANO VISTA SUD-OVEST	35
FIGURA 20 SOLUZIONE DIFFORME RTV13 PER MATERIALE (EPS) CON UTILIZZO DI MARCAPIANO VISTA NORD-OVEST	36
FIGURA 21 MODELLO DI CONTROLLO VISTA SUD-OVEST A SINISTRA E VISTA NORD-OVEST A DESTRA	37
FIGURA 22 ESEMPI DI ALLINEAMENTO DELLE MESH CORRETTI ED ERRATI [6]	39
FIGURA 23 ESEMPIO DI DISCRETIZZAZIONE DOVUTA ALLA MESH [6]	40
FIGURA 24 ESEMPIO DELLA SCHEDA PER LA MODULAZIONE DEI PARAMETRI AMBIENTALI [6]	43
FIGURA 25 MESH PRIMO TENTATIVO	45
FIGURA 26 MESH SECONDO TENTATIVO	46
FIGURA 27 SOLUZIONE DEFINITIVA	47
FIGURA 28 MESH MODELLO A 2 PIANI PRIMA CONFIGURAZIONE	48
FIGURA 29 MESH MODELLO A 2 PIANI SECONDA CONFIGURAZIONE	49
FIGURA 30 MESH MODELLO A 2 PIANI CONFIGURAZIONE FINALE	50
FIGURA 31 COMANDI DI MODELLAZIONE GEOMETRICA	51
FIGURA 32 MODELLO GEOMETRICO	52
FIGURA 33 INFLUENZA DELLA GRANDEZZA DEL PROVINO SULLE CARATTERISTICHE [7]	53
FIGURA 34 CURVA RHR ETICS [7]	54
FIGURA 35 CURVA RHR EPS [7]	55
FIGURA 36 VALORI DI HRRPUA PER ETICS E EPS [7]	55
FIGURA 37 CARATTERISTICHE ASSEGNATE ALLA SUPERFICIE LAYERED DEDICATA ALL'ETICS	56
FIGURA 38 CARATTERISTICHE ASSEGNATE ALLA SUPERFICIE LAYERED DEDICATA ALL'EPS	56
FIGURA 39 RAPPRESENTAZIONE PARZIALE DELLE FRAZIONI DI CURVA INSERITE IN PYROSIM PER L'ETICS	57
FIGURA 40 RAPPRESENTAZIONE PARZIALE DELLE FRAZIONI DI CURVA INSERITE IN PYROSIM PER L'EPS	57
FIGURA 41 CARATTERISTICHE ASSEGNATE AL MATERIALE ETICS	58
FIGURA 42 CARATTERISTICHE ASSEGNATE AL MATERIALE EPS	58
FIGURA 43 CARATTERISTICHE ASSEGNATE AL MATERIALE LANA DI ROCCIA	58
FIGURA 44 CARATTERISTICHE ASSEGNATE AL MATERIALE VETRO	59
FIGURA 45 FOCOLARE PREDEFINITO CODICE DI PREVENZIONE INCENDI [5]	59
FIGURA 46 CARATTERISTICHE DEL FOCOLARE PRIMARIO	60
FIGURA 47 VISTA IN PROSPETTO E IN PIANTA DEL POSIZIONAMENTO DEL FOCOLARE	60
FIGURA 48 PROPAGAZIONE DELL'INCENDIO IN FACCIATA AD ALTRI COMPARTIMENTI [8]	61

FIGURA 49 ESEMPIO DI DEVICE POSIZIONATI DAVANTI ALLE FINESTRE CON DIREZIONE VERSO IL BASSO PER IL CONTROLLO DELL'ESPLOSIONE	63
FIGURA 50 ESEMPIO DI DEVICE POSIZIONATI DAVANTI ALLE FINESTRE CON DIREZIONE VERSO L'ESTERNO PER IL CONTROLLO TEMPERATURA INTERNA ALL'EDIFICIO	63
FIGURA 51 ESEMPIO DI IMPOSTAZIONE DEI CONTROLLI UTILIZZATI PER SIMULARE L'ESPLOSIONE DELLE FINESTRE	64
FIGURA 52 DURATA SIMULAZIONE MODELLO A 2 PIANI	65
FIGURA 53 DURATA SIMULAZIONE MODELLO EDIFICIO INTERO	65
FIGURA 54 INTERVALLO DI SCRITTURA DEI FILE DI OUTPUT	66
FIGURA 55 DISTRIBUZIONE SLICE.....	67
FIGURA 56 DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI.....	67
FIGURA 57 UTILIZZO DEGLI SCENARI IN PYROSIM	68
FIGURA 58 VENTO DA OVEST 5 M/S	70
FIGURA 59 VENTO DA OVEST 1M/S.....	71
FIGURA 60 TLF2P_ET_01 BURNING RATE TIME STEP 0, 100, 200 SECONDI.....	73
FIGURA 61 TLF2P_ET_01 BURNING RATE TIME STEP 300, 400, 500, 600 SECONDI.....	74
FIGURA 62 TLF2P_ET_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI	75
FIGURA 63 TLF2P_ET_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI	76
FIGURA 64 TLF2P_ET_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI.....	77
FIGURA 65 TLF2P_ET_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI.....	78
FIGURA 66 TLF2P_ET_02 BURNING RATE TIME STEP 0, 100, 200 SECONDI.....	79
FIGURA 67 TLF2P_ET_02 BURNING RATE TIME STEP 300, 400, 500, 600 SECONDI.....	80
FIGURA 68 TLF2P_ET_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI	81
FIGURA 69 TLF2P_ET_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI	82
FIGURA 70 TLF2P_ET_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI.....	83
FIGURA 71 TLF2P_ET_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI.....	84
FIGURA 72 TLF2P_ET_03 BURNING RATE TIME STEP 0, 300, 600 SECONDI.....	85
FIGURA 73 TLF2P_ET_03 BURNING RATE TIME STEP 900, 1200, 1500, 1800 SECONDI.....	86
FIGURA 74 TLF2P_ET_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI	87
FIGURA 75 TLF2P_ET_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 1200, 1500, 1800 SECONDI	88
FIGURA 76 TLF2P_ET_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI.....	89
FIGURA 77 TLF2P_ET_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 1200, 1500, 1800 SECONDI.....	90
FIGURA 78 TLF2P_EF_01 BURNING RATE TIME STEP 0, 100, 200 SECONDI.....	91
FIGURA 79 TLF2P_EF_01 BURNING RATE TIME STEP 300, 400, 500, 600 SECONDI	92
FIGURA 80 TLF2P_EF_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI	93
FIGURA 81 TLF2P_EF_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI	94
FIGURA 82 TLF2P_EF_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI.....	95
FIGURA 83 TLF2P_EF_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI.....	96
FIGURA 84 TLF2P_EF_02 BURNING RATE TIME STEP 0, 100, 200 SECONDI.....	97
FIGURA 85 TLF2P_EF_02 BURNING RATE TIME STEP 300, 400, 500, 600 SECONDI.....	98
FIGURA 86 TLF2P_EF_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI	99
FIGURA 87 TLF2P_EF_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI	100
FIGURA 88 TLF2P_EF_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI.....	101
FIGURA 89 TLF2P_EF_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI.....	102
FIGURA 90 TLF2P_EF_03 BURNING RATE TIME STEP 0, 300, 600 SECONDI.....	103
FIGURA 91 TLF2P_EF_03 BURNING RATE TIME STEP 900, 1200, 1500, 1800 SECONDI	104
FIGURA 92 TLF2P_EF_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI	105
FIGURA 93 TLF2P_EF_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 1200, 1500, 1800 SECONDI	106
FIGURA 94 TLF2P_EF_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI.....	107
FIGURA 95 TLF2P_EF_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 1200, 1500, 1800 SECONDI.....	108
FIGURA 96 TLF2P_ES_01 BURNING RATE TIME STEP 0, 100, 200 SECONDI.....	109
FIGURA 97 TLF2P_ES_01 BURNING RATE TIME STEP 300, 400, 500, 600 SECONDI	110
FIGURA 98 TLF2P_ES_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI.....	111
FIGURA 99 TLF2P_ES_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI	112

FIGURA 100 TLF2P_ES_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI	113
FIGURA 101 TLF2P_ES_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI	114
FIGURA 102 TLF2P_ES_02 BURNING RATE TIME STEP 0, 100, 200 SECONDI	115
FIGURA 103 TLF2P_ES_02 BURNING RATE TIME STEP 300, 400, 500, 600 SECONDI	116
FIGURA 104 TLF2P_ES_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI	117
FIGURA 105 TLF2P_ES_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI	118
FIGURA 106 TLF2P_ES_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 100, 200, 300 SECONDI	119
FIGURA 107 TLF2P_ES_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400, 500, 600 SECONDI	120
FIGURA 108 TLF2P_ES_03 BURNING RATE TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI	121
FIGURA 109 TLF2P_ES_03 BURNING RATE TIME STEP 900, 1200, 1500, 1800 SECONDI	122
FIGURA 110 TLF2P_ES_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI	123
FIGURA 111 TLF2P_ES_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 1200, 1500, 1800 SECONDI	124
FIGURA 112 TLF2P_ES_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI	125
FIGURA 113 TLF2P_ES_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 1200, 1500, 1800 SECONDI	126
FIGURA 114 TLF2P_E BURNING RATE TIME STEP 0, 300, 600 SECONDI	127
FIGURA 115 TLF2P_E BURNING RATE TIME STEP 900, 1200, 1500, 1800 SECONDI	128
FIGURA 116 TLF2P_E INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI	129
FIGURA 117 TLF2P_E INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 1200, 1500, 1800 SECONDI	130
FIGURA 118 TLF2P_E WALL TEMPERATURE TIME STEP 0, 300, 600, 900 SECONDI	131
FIGURA 119 TLF2P_E WALL TEMPERATURE TIME STEP 1200, 1500, 1800 SECONDI	132
FIGURA 120 TLFEI_01 BURNING RATE TIME STEP 0 SECONDI	133
FIGURA 121 TLFEI_01 BURNING RATE TIME STEP 200 SECONDI	134
FIGURA 122 TLFEI_01 BURNING RATE TIME STEP 400 SECONDI	135
FIGURA 123 TLFEI_01 BURNING RATE TIME STEP 600 SECONDI	136
FIGURA 124 TLFEI_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0 SECONDI	137
FIGURA 125 TLFEI_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 200 SECONDI	138
FIGURA 126 TLFEI_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400 SECONDI	139
FIGURA 127 TLFEI_01 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 600 SECONDI	140
FIGURA 128 TLFEI_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0 SECONDI	141
FIGURA 129 TLFEI_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 200 SECONDI	142
FIGURA 130 TLFEI_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400 SECONDI	143
FIGURA 131 TLFEI_01 WALL TEMPERATURE TIME STEP 600 SECONDI	144
FIGURA 132 TLFEI_02 BURNING RATE TIME STEP 0 SECONDI	145
FIGURA 133 TLFEI_02 BURNING RATE TIME STEP 200 SECONDI	146
FIGURA 134 TLFEI_02 BURNING RATE TIME STEP 400 SECONDI	147
FIGURA 135 TLFEI_02 BURNING RATE TIME STEP 600 SECONDI	148
FIGURA 136 TLFEI_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0 SECONDI	149
FIGURA 137 TLFEI_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 200 SECONDI	150
FIGURA 138 TLFEI_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400 SECONDI	151
FIGURA 139 TLFEI_02 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 600 SECONDI	152
FIGURA 140 TLFEI_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0 SECONDI	153
FIGURA 141 TLFEI_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 200 SECONDI	154
FIGURA 142 TLFEI_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400 SECONDI	155
FIGURA 143 TLFEI_02 WALL TEMPERATURE TIME STEP 600 SECONDI	156
FIGURA 144 TLFEI_03 BURNING RATE TIME STEP 0 SECONDI	157
FIGURA 145 TLFEI_03 BURNING RATE TIME STEP 200 SECONDI	158
FIGURA 146 TLFEI_03 BURNING RATE TIME STEP 400 SECONDI	159
FIGURA 147 TLFEI_03 BURNING RATE TIME STEP 600 SECONDI	160
FIGURA 148 TLFEI_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0 SECONDI	161
FIGURA 149 TLFEI_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 200 SECONDI	162
FIGURA 150 TLFEI_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400 SECONDI	163
FIGURA 151 TLFEI_03 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 600 SECONDI	164
FIGURA 152 TLFEI_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0 SECONDI	165

FIGURA 153 TLFEI_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 200 SECONDI	166
FIGURA 154 TLFEI_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400 SECONDI	167
FIGURA 155 TLFEI_03 WALL TEMPERATURE TIME STEP 600 SECONDI	168
FIGURA 156 TLFEI_04 BURNING RATE TIME STEP 0 SECONDI	169
FIGURA 157 TLFEI_04 BURNING RATE TIME STEP 200 SECONDI	170
FIGURA 158 TLFEI_04 BURNING RATE TIME STEP 400 SECONDI	171
FIGURA 159 TLFEI_04 BURNING RATE TIME STEP 600 SECONDI	172
FIGURA 160 TLFEI_04 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 0 SECONDI	173
FIGURA 161 TLFEI_04 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 200 SECONDI	174
FIGURA 162 TLFEI_04 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 400 SECONDI	175
FIGURA 163 TLFEI_04 INCIDENT HEAT FLUX TIME STEP 600 SECONDI	176
FIGURA 164 TLFEI_04 WALL TEMPERATURE TIME STEP 0 SECONDI	177
FIGURA 165 TLFEI_04 WALL TEMPERATURE TIME STEP 200 SECONDI	178
FIGURA 166 TLFEI_04 WALL TEMPERATURE TIME STEP 400 SECONDI	179
FIGURA 167 TLFEI_04 WALL TEMPERATURE TIME STEP 600 SECONDI	180
FIGURA 168 CONFRONTO TEMPI DI INNESCO COMPARTIMENTO SUPERIORE MODELLI A DUE PIANI (IN ALTO EPS CON FASCE DI SEPARAZIONE; AL CENTRO EPS CON MARCAPIANO SPORGENTE E IN BASSO EPS PRIVO DI PROTEZIONE PASSIVA)	182
FIGURA 169 CONFRONTO TEMPI DI INNESCO COMPARTIMENTO SUPERIORE MODELLI DI EDIFICIO INTERO (IN ALTO A SINISTRA EPS CON FASCE DI SEPARAZIONE; IN ALTO A DESTRA EPS CON MARCAPIANO SPORGENTE E IN BASSO EPS PRIVO DI PROTEZIONE PASSIVA)	183
FIGURA 170 POSIZIONE DELLE SONDE DI TEMPERATURA IN PROSPETTO E IN PIANTA	184
FIGURA 171 TEMPERATURA DEVICE INTERNI MODELLO EPS CON FASCE DI SEPARAZIONE.....	185
FIGURA 172 TEMPERATURA DEVICE ESTERNI MODELLO EPS CON FASCE DI SEPARAZIONE	185
FIGURA 173 TEMPERATURA DEVICE INTERNI MODELLO EPS CON MARCAPIANO SPORGENTE.....	186
FIGURA 174 TEMPERATURA DEVICE ESTERNI MODELLO EPS CON MARCAPIANO SPORGENTE.....	186
FIGURA 175 TEMPERATURA DEVICE INTERNI MODELLO EPS SENZA ELEMENTI DI PROTEZIONE PASSIVA	187
FIGURA 176 TEMPERATURA DEVICE INTERNI MODELLO EPS SENZA ELEMENTI DI PROTEZIONE PASSIVA	187
FIGURA 177 CONFRONTO TEMPERATURE INTERNE DEI TRE MODELLI ESAMINATI	188
FIGURA 178 CONFRONTO TEMPERATURE ESTERNE DEI TRE MODELLI ESAMINATI	188

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1 S.1-6: CLASSIFICAZIONE IN GRUPPI DI MATERIALI PER RIVESTIMENTO E COMPLETAMENTO	16
TABELLA 2 S.1-7: CLASSIFICAZIONE IN GRUPPI DI MATERIALI PER L'ISOLAMENTO	17
TABELLA 3 M.2-2: FOCOLARI PREDEFINITI [5]	23
TABELLA 4 M.3-2: ESEMPIO DI SOGLIE DI PRESTAZIONE IMPIEGABILI CON IL METODO DI CALCOLO AVANZATO [5].....	25
TABELLA 5 SINTESI SCENARI MODELLO A DUE PIANI.....	69
TABELLA 6 SINTESI SCENARI MODELLO INTERO EDIFICIO.....	71

Abstract

In a context where the energy efficiency of building envelopes is becoming increasingly common accompanied by the growing use of insulating materials greater attention has been drawn to the risk that a fire might involve these materials and spread throughout the structure. The occurrence of tragic events linked to this type of technological solution has prompted both regulatory intervention and the search for alternative approaches capable of ensuring both flexibility and safety.

This thesis, developed within the framework of Fire Safety Engineering, aims to evaluate the fire performance of two different façade configurations insulated with EPS (expanded polystyrene): one featuring protruding horizontal projections (marcapiani) aligned with the horizontal compartmentation lines, and the other with horizontal fire-stopping bands placed in the same positions, compliant with the geometry prescribed by RTV 13. For this purpose, three-dimensional numerical models were created using PyroSim and FDS software, integrating devices for the detection of temperatures and heat fluxes.

The work included 14 simulations: 10 on a reduced two-story model 6 of which were performed under wind conditions and 4 on a model of the full building without wind. The results made it possible to highlight both the critical aspects and specific features of the investigated solutions, also through comparison with a configuration meeting the requirements of the Ministerial Decree of August 3, 2015, and with a solution completely lacking fire prevention measures.

Abstract

In un contesto in cui l'efficientamento energetico delle chiusure d'ambito risulta sempre più frequente, accompagnato dall'utilizzo di materiali isolanti in quantità sempre maggiori ha portato l'attenzione sul rischio che un incendio possa coinvolgere proprio gli isolanti e propagarsi all'intera struttura. Il verificarsi di tragici eventi correlati a questo tipo di soluzioni tecnologiche ha spinto verso un intervento normativo, ma anche verso la ricerca di soluzioni alternative che possano contemporaneamente garantire flessibilità e sicurezza.

La presente tesi, sviluppata nell'ambito della Fire Safety Engineering, ha come obiettivo la valutazione delle prestazioni in caso di incendio di due differenti configurazioni di facciata isolate con EPS (polistirene espanso sinterizzato), una dotata di marcapiani aggettanti in corrispondenza delle compartimentazioni orizzontali e l'altra con fasce di separazione orizzontali nelle medesime posizioni, conformi alla geometria prescritta dalla RTV 13. A tal fine, sono stati realizzati modelli numerici tridimensionali tramite i software PyroSim e FDS, integrando dispositivi per la rilevazione delle temperature e dei flussi termici. Il lavoro ha previsto l'esecuzione di 14 simulazioni: 10 su un modello ridotto a due piani, di cui 6 in condizioni di vento, e 4 su un modello dell'edificio completo in assenza di vento.

I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare le criticità e le peculiarità delle soluzioni indagate anche attraverso il confronto con una soluzione che presenta le caratteristiche previste DM 3 agosto 2015 e con una soluzione completamente sprovvista di misure di prevenzione.

1. Introduzione

1.1 Obiettivi della tesi

Il presente lavoro di tesi è stato svolto presso la società Aigroup S.r.l., che ha fornito supporto tecnico, scientifico e documentale, nell'ambito di un'attività di approfondimento legata all'applicazione dei principi della Fire Safety Engineering in ambito edilizio.

La presente tesi ha l'obiettivo di verificare, mediante l'applicazione dei metodi della Fire Safety Engineering (FSE), il comportamento al fuoco di differenti soluzioni progettuali alternative relative alla facciata di un edificio residenziale di altezza complessiva di 82 metri fuori terra. Nello specifico, la prima soluzione prevede l'utilizzo di materiali e configurazioni conformi alla Regola Tecnica Verticale (RTV 13) del Codice di Prevenzione Incendi, la seconda contempla materiali non conformi ai requisiti minimi in termini di reazione al fuoco, ma prevedendo comunque le fasce di separazione come descritte nel codice di prevenzione incendi, mentre nell'ultimo caso si indaga la possibilità di realizzare la facciata con materiali non conformi per reazione al fuoco e compensando tale criticità con l'inserimento di marcapiani sporgenti con sviluppo geometrico differente alle classiche fasce di separazione come misura alternativa, vi sarà inoltre un'ulteriore conformazione di facciata utilizzata come parametro di confronto, in cui non saranno presenti misure di prevenzione passiva (marcapiani o sporti) che contrastino l'espansione dell'incendio, per poter dimostrare l'effettiva efficacia delle soluzioni di prevenzione rispetto ad una configurazione che risulta sprovvista. Lo studio confronta le prestazioni delle differenti configurazioni, con particolare attenzione alla propagazione verticale dell'incendio lungo la facciata seguendo il percorso dalla FSE. Oltre a contribuire allo studio delle performance antincendio delle facciate, la tesi si propone di evidenziare i vantaggi e i limiti dell'approccio prestazionale rispetto a quello prescrittivo, analizzando il ruolo della progettazione ingegneristica nella risoluzione di problematiche complesse e nell'ottimizzazione della sicurezza degli edifici. Questo argomento risulta particolarmente cruciale, considerando il numero di eventi catastrofici riguardanti le facciate che si sono susseguiti negli anni e quanto l'integrazione dei metodi dell'ingegneria possa essere di supporto a una progettazione efficiente e su misura per la salvaguardia della vita umana, dei beni e dell'ambiente.

1.2 Struttura del lavoro

Il lavoro si apre con una cornice introduttiva volta a contestualizzare l'importanza della sicurezza antincendio nelle facciate degli edifici, in particolare alla luce delle più recenti normative e dell'approccio ingegneristico alla prevenzione. A seguire, viene delineato il quadro normativo e metodologico di riferimento: sono analizzati i principi fondamentali della Fire Safety Engineering (FSE), il Codice di Prevenzione Incendi e la Regola Tecnica Verticale n. 13, dedicata alle facciate. Sarà anche presentato un breve excursus sulla gestione della prevenzione incendi a livello internazionale, tra queste, si segnalano la BS 8414 (Regno Unito) e la NFPA 285 (Stati Uniti), che propongono metodi sperimentali per la verifica della resistenza al fuoco e della propagazione verticale delle fiamme lungo le facciate. Un confronto tra i criteri di prova, i limiti di prestazione e le strategie di classificazione consentirebbe di evidenziare analogie e divergenze, fornendo uno sguardo più ampio sull'approccio globale alla sicurezza antincendio delle facciate. Successivamente, viene presentata l'analisi delle diverse configurazioni di facciata, differenti per geometrie, materiali e soluzioni progettuali. Vengono specificati i dettagli tecnici necessari a comprenderne il comportamento al fuoco, approfondendo le motivazioni che giustificano le scelte progettuali. Il lavoro prosegue con la descrizione teorica degli strumenti software utilizzati: PyroSim, sviluppato dalla società Thunderhead Engineering, è un software di modellazione avanzata degli incendi che fornisce un'interfaccia grafica per il simulatore FDS (Fire Dynamics Simulator) sviluppato dal National Institute of Standards and Technology (NIST), la combinazione di questi strumenti ha permesso la modellazione della parte geometrica con l'inserimento delle correlate caratteristiche tecniche/numeriche degli elementi. Vengono dunque illustrate le ipotesi di modellazione, le condizioni al contorno e le principali scelte parametriche, evidenziando le difficoltà e il percorso che ha portato alle scelte. Si passa poi all'esposizione dei risultati ottenuti dalle simulazioni di incendio, elencando e motivando i valori ottenuti, confrontandoli con i requisiti normativi vigenti e con i criteri di prestazione richiesti per garantire un livello adeguato di sicurezza. Vengono inoltre individuati alcuni interventi progettuali che potrebbero migliorare le prestazioni di soluzioni meno performanti. Il lavoro si conclude con una sintesi dei principali risultati emersi e con alcune riflessioni sui possibili sviluppi futuri, tra cui l'integrazione di metodi avanzati di simulazione, l'analisi di scenari alternativi di incendio e l'estensione dello studio ad altre tipologie edilizie.

1.3 Contesto normativo e tecnico

Per il presente lavoro di tesi si è fatto riferimento a due normative che allo stato attuale rappresentano il riferimento principale per la progettazione di edifici ad uso di civile abitazione:

- Il **D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151**: ha introdotto un'importante riforma nel sistema della prevenzione incendi in Italia, con l'obiettivo di semplificare e razionalizzare i procedimenti amministrativi, garantendo al contempo elevati standard di sicurezza. Il regolamento ha aggiornato l'elenco delle attività soggette ai controlli dei Vigili del Fuoco, sostituendo quello previgente del 1982 con un nuovo elenco di 80 attività, definite secondo criteri più moderni e strutturati. Una delle principali innovazioni è la classificazione delle attività in tre categorie (A, B e C), basata su livello di rischio, complessità e dimensione dell'attività stessa. A ciascuna categoria corrisponde un iter amministrativo differenziato: per le attività di Categoria A è prevista la semplice presentazione della SCIA, per la Categoria B la SCIA è accompagnata da una valutazione tecnica che può essere oggetto di verifica a campione, mentre per la Categoria C è obbligatoria una valutazione preventiva da parte dei Vigili del Fuoco. Il decreto riconosce inoltre un ruolo centrale al professionista antincendio, iscritto negli elenchi ministeriali, il quale assume maggiore responsabilità nella progettazione e nella conformità dell'attività agli obiettivi di sicurezza. Il D.P.R. 151/2011 rappresenta quindi un passaggio fondamentale verso un sistema più flessibile e proporzionato al rischio, che favorisce la semplificazione amministrativa senza compromettere la tutela della sicurezza antincendio. Nel caso studio di questa tesi l'allegato I identifica l'edificio ad uso civile abitazione con altezza complessiva di 88 metri come **Attività 77C**.
- Il **DM 3 agosto 2015** (Codice di Prevenzione Incendi) rappresenta un importante punto di svolta nella normativa tecnica antincendio italiana. Esso introduce un approccio innovativo alla progettazione della sicurezza, basato su criteri prestazionali e su una struttura modulare e flessibile, in contrapposizione allo schema prescrittivo tradizionale. Il Codice si inserisce in continuità con il D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151, che ha riformato il quadro amministrativo della prevenzione incendi, semplificando le procedure e responsabilizzando maggiormente il progettista antincendio. In questo contesto, il Codice fornisce lo strumento tecnico-operativo per dare attuazione agli obiettivi del D.P.R. 151, consentendo soluzioni progettuali più adatte alle specificità delle attività, anche attraverso l'uso di metodologie ingegneristiche come la Fire Safety Engineering. La struttura del Codice, i suoi principi fondanti e le modalità applicative saranno approfonditi nei paragrafi successivi. L'edificio oggetto di studio viene in questo caso normato dalla **RTV14 "Edifici di civile abitazione"** e della **RTV13 "Chiusure d'ambito degli edifici civili"**, per quanto concerne gli obiettivi della tesi nello specifico l'attenzione sarà focalizzata su quest'ultima, essendo un'indagine di confronto tra differenti soluzioni progettuali di facciata.

1.4 Eventi storicamente rilevanti

Lo studio del comportamento al fuoco delle facciate un ruolo sempre più centrale nella progettazione antincendio, soprattutto in relazione agli edifici di media e grande altezza. Le facciate non sono solo elementi architettonici e di involucro, ma possono rappresentare vie preferenziali per la propagazione verticale dell'incendio, compromettendo gravemente l'efficacia delle compartimentazioni interne e la sicurezza degli occupanti. La crescente diffusione di materiali innovativi, spesso combustibili, impiegati per ragioni estetiche, prestazionali o energetiche (come rivestimenti ventilati, pannelli compositi o isolanti sintetici), ha reso evidente la necessità di considerare la facciata come un elemento attivo nel rischio incendio, e non più neutro o passivo. In questo contesto, l'analisi di alcuni incendi significativi avvenuti in edifici dotati di facciate ventilate o rivestite con materiali combustibili ha avuto un impatto fondamentale nel sollevare l'attenzione a livello normativo e progettuale. Di seguito si riportano alcuni tra i casi più noti e rappresentativi, che hanno evidenziato in modo drammatico le criticità legate alla progettazione e alla verifica del comportamento al fuoco delle facciate.

- Grenfell Tower:



Figura 1 Incendio Grenfell tower [1]

Luogo	North Kensington, Londra (UK)
Data e Ora di inizio	14 giugno 2017 00:54 AM
Piani dell'edificio	24 piani (edificio residenziale sociale)
Origine dell'incendio	Frigorifero difettoso in un appartamento al quarto piano
Velocità di propagazione	Le fiamme hanno raggiunto il tetto in circa 15 minuti
Materiale di facciata coinvolto	Pannelli in ACM (Alluminio con anima in polietilene) altamente combustibili + isolante in poliisocianurato (PIR)
Meccanismo di propagazione	Effetto camino tra facciata e sottostruttura metallica; fusione dell'EPS/PIR e colata di gocce infiammabili
Occupanti	Circa 293 (residenti stimati)
Vittime	72 vittime confermate
Valore danni	circa 114 milioni di euro
Indagine ufficiale	Grenfell Tower Inquiry (fase 1 e 2)
Conclusioni principali	- I pannelli di rivestimento non conformi alle norme antincendio - Le istruzioni "stay put" si sono rivelate fatali - Mancata compartimentazione e barriere tagliafuoco insufficienti
Conseguenze normative	- Revisione delle normative britanniche sulle facciate (BS 8414 e Building Regs Part B) - Bando dell'uso di materiali combustibili in edifici alti (>18 m) - Obbligo di ispezione e rimozione delle facciate in ACM con anima in PE

- **Torre dei Moro:**



Figura 2 Incendio Torre dei Moro [2]

Luogo	Via Antonini, Milano (zona Sud)
Data e Ora di inizio	29 agosto 2021 intorno alle 17:30
Piani dell'edificio	18 piani (edificio residenziale)
Origine dell'incendio	Da accertare
Velocità di propagazione	Rapida, lungo la facciata, per effetto camino e materiali combustibili
Materiale di facciata coinvolto	Rivestimento in pannelli compositi (Larsen PE con anima plastica)
Meccanismo di propagazione	Effetto camino tra facciata
Occupanti	80 famiglie residenti
Vittime	17 feriti lievi; nessun morto
Valore danni	Stimati oltre 25 milioni di euro
Conseguenze normative	Rinnovato il dibattito sulla sicurezza delle facciate e materiali ignifughi

- **Valencia Campanar:**



Figura 3 Incendio Valencia [3]

Luogo	Valencia, quartiere Campanar
Data e Ora di inizio	23 Febbraio 2024 17:30
Piani dell'edificio	14 piani e 10 piani (complesso residenziale)
Origine dell'incendio	Da accertare
Velocità di propagazione	Rapida, per effetto del vento e materiali combustibili
Materiale di facciata coinvolto	Lastre di alluminio con anima in polietilene
Meccanismo di propagazione	Forte vento
Occupanti	138 famiglie residenti 450 occupanti
Vittime	14 feriti lievi; 10 morti
Valore danni	Stimati oltre 26,5 milioni di euro

Questi sono solo alcuni esempi di incendi che hanno trovato come via preferenziale di espansione le facciate, incontrando condizioni favorevoli dovute ai materiali utilizzati per la realizzazione stessa delle chiusure d'ambito (in particolare gli elementi da attenzionare sono gli isolanti, che spesso presentano una classificazione di reazione al fuoco bassa, li ch  li rende elementi particolarmente sensibili in situazioni di incendio) e ambientali (vento e calore). Questi edifici non erano gli unici ad usufruire di queste tecnologie e con l'attenzione sempre crescente verso l'isolamento termico al fine di migliorare le prestazioni energetiche sar  sempre pi  importante una progettazione attenta delle chiusure d'ambito nell'ottica della prevenzione incendi per poter evitare il ripetersi di questo tipo di eventi catastrofici.

2. Inquadramento normativo e metodologico

2.1 Il Codice di Prevenzione Incendi struttura e principi

Il principale obiettivo del decreto è quello di semplificare la progettazione antincendio, puntando a soluzioni che, pur garantendo il medesimo livello di sicurezza, siano più semplici, realizzabili e comprensibili. Lo scopo perseguito dal normatore è stato quello di racchiudere in un testo unico, armonico e sistematico, il maggior numero di disposizioni applicabili nel campo della prevenzione incendi, sostituendo il precedente panorama normativo frammentato. La sua struttura modulare consente di comporre soluzioni progettuali adeguate alle caratteristiche specifiche dell'attività, mentre la flessibilità permette di scegliere tra diverse opzioni, sia prescrittive sia prestazionali. Nell'ambito delle opzioni prestazionali, si delinea la possibilità di adottare soluzioni alternative, a condizione che venga dimostrata la loro efficacia nel rispetto degli obiettivi di sicurezza previsti. Dimostrazione che può avvenire attraverso prove di laboratorio, letteratura scientifica, normative estere e attraverso i metodi ingegneristici (FSE). Infatti il DM 3 agosto 2015 risulta una normativa innovativa, aprendo la strada a un approccio non esclusivamente prescrittivo, ma garantendo la possibilità di un approccio prestazionale moderno e scientificamente fondato che riconosce e integra formalmente l'approccio della Fire Safety Engineering (FSE) nella progettazione antincendio.

Il Codice si articola in quattro macro aree:

- (Sezione G “Generalità”) in una parte generale ha una funzione generale e trasversale, definisce i criteri generali e i principi comuni per la progettazione antincendio, validi per tutte le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi.
- (Sezione S “Strategia antincendio”) definisce le 10 strategie antincendio generali, dette anche regole tecniche orizzontali, perché sono valide per ogni tipologia di attività soggetta. Per ciascuna strategia, vengono individuati i livelli di prestazione, da adottare in funzione del rischio dell'attività, in seguito le soluzioni conformi, ossia soluzioni progettuali già predefinite dal Codice e applicabili direttamente e in fine soluzioni alternative, che richiedono una valutazione ingegneristica più approfondita, con documentazione tecnica di supporto.
- (Sezione V “Regole tecniche verticali”) è la sezione del codice in continuo aggiornamento, ogni capitolo è dedicato ad una singola tipologia di attività. Propedeuticamente all'interno di ogni capitolo vengono definite le classificazioni e le definizioni necessarie per l'approccio alla prevenzione incendi di un'attività con le sue peculiarità. Le strategie presenti nei capitoli della sezione V sono complementari (quando forniscono indicazioni aggiuntive) o sostitutive (quando specificano soluzioni più adatte rispetto a quelle orizzontali, perché tarate su una particolare attività).

- (Sezione M “Metodi”) è dedicata alla progettazione prestazionale, definisce l’iter per la dimostrazione di soluzioni alternative o in deroga attraverso i metodi dalla Fire Safety Engineering. Attraverso la sezione M vengono normati e standardizzati i documenti da produrre, la metodologia con cui vengono individuati gli scenari, la modellazione del focolare e le verifiche da effettuare per valutare la conformità delle soluzioni proposte agli obiettivi di sicurezza antincendio.

2.2 La Regola Tecnica Verticale (RTV 13): Chiusure d'ambito degli edifici civili

La crescente attenzione verso la sicurezza degli edifici, in particolare a seguito degli eventi catastrofici verificatisi negli anni a livello internazionale (come l'incendio della Grenfell Tower a Londra nel 2017), ha evidenziato la necessità di normare con maggiore precisione il comportamento al fuoco delle facciate degli edifici. In questo contesto si inserisce la Regola Tecnica Verticale n. 13 (RTV 13), introdotta con il Decreto del Ministero dell'Interno del 30 marzo 2022, che rappresenta un'integrazione al Codice di Prevenzione Incendi (DM 3 agosto 2015). La regola tecnica stabilisce i criteri tecnici per la progettazione e realizzazione delle chiusure d'ambito degli edifici civili, al fine di limitare la propagazione dell'incendio attraverso l'involucro edilizio esterno. L'obiettivo è garantire un livello di sicurezza antincendio adeguato, tenendo conto delle diverse caratteristiche tipologiche e dimensionali degli edifici, dei materiali utilizzati nelle facciate e delle loro modalità costruttive. La RTV 13 si applica alle chiusure d'ambito degli edifici civili soggetti alle norme del Codice di Prevenzione Incendi, ovvero quegli edifici ricadenti tra le attività elencate nell'allegato I del DPR 151/2011 e rientranti nel campo di applicazione del Codice (art. 1 del DM 3 agosto 2015). Gli edifici civili includono, a titolo esemplificativo (edifici residenziali; strutture sanitarie e socio-sanitarie; attività scolastiche; edifici alberghieri e ricettivi; edifici direzionali, commerciali o per uffici). La RTV si applica sia a nuove costruzioni, sia in caso di interventi significativi su edifici esistenti, qualora comportino modifiche sostanziali alla chiusura d'ambito. Di seguito vengono riportate una raccolta di definizioni che risultano basilari per l'applicazione corretta delle strategie di prevenzione incendi in relazione alle chiusure d'ambito, in quanto aiutano a identificare i punti critici dell'involucro edilizio da proteggere o da trattare con materiali e tecnologie adeguate.

2.2.1 Tecnologie costruttive delle chiusure d'ambito

Il DM 30 marzo 2022 fornisce alcune definizioni tecniche fondamentali per comprendere le soluzioni e le applicazioni della RTV 13:

- **Chiusura d'ambito:** è l'elemento edilizio che definisce il limite esterno dell'edificio rispetto all'ambiente esterno. Comprende le facciate verticali, ma anche le coperture inclinate e orizzontali, purché fungano da separazione tra spazi interni ed esterni. (Figura 4)
- **Facciata:** è una porzione di chiusura d'ambito che si sviluppa in senso verticale, indipendentemente dal sistema tecnologico adottato (a parete continua, ventilata, doppia pelle, ecc.). (Figura 4)
- **Chiusura non opaca:** qualsiasi porzione di facciata che consenta il passaggio della luce o della visione (es. vetrate, serramenti trasparenti o semitrasparenti).
- **Fascia di separazione:** porzione di chiusura d'ambito costituita da uno o più elementi costruttivi aventi classe di resistenza al fuoco determinata e materiali classificati per reazione al fuoco, atta a limitare la propagazione orizzontale o verticale dell'incendio.
- **Facciata semplice:** Composta da un singolo strato o più strati senza intercapedine d'aria, include facciate rivestite con cappotto termico e facciate in mattoni o blocchi dotati di intercapedine d'aria non ventilata. (Figura 5)
- **Facciata continua:** Costituita da elementi di intelaiatura orizzontali e verticali con pannelli opachi o vetrati, presenta una continuità dell'involucro rispetto alla struttura portante, che generalmente è arretrata rispetto al piano della facciata. (Figura 5)
- **Facciata doppia pelle:** è una particolare tipologia costruttiva di involucro esterno, caratterizzata dalla presenza di due strati separati da un'intercapedine d'aria continua (ventilata in modo naturale o meccanico), che corre lungo l'altezza dell'edificio, può essere ispezionabile o non ispezionabile, a seconda della dimensione dell'intercapedine e della possibilità di accesso per la manutenzione. (Figura 5)

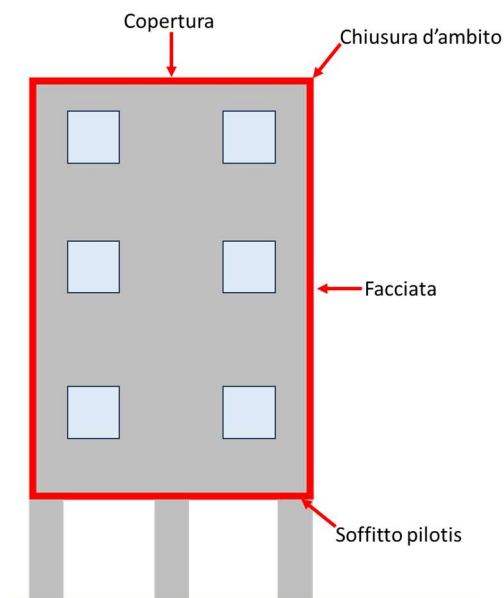


Figura 4 Chiusura d'ambito

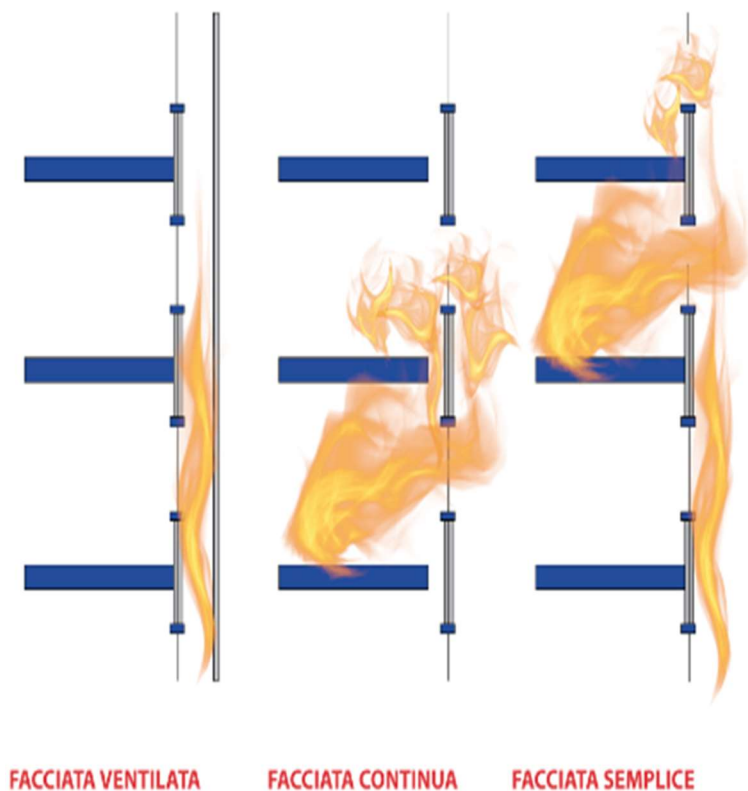


Figura 5 Sistemi tecnologici di facciata [4]

2.2.2 Scenari d'incendio in facciata

Gli scenari tipici per cui può verificarsi l'innesco e la conseguente propagazione dell'incendio in facciata sono principalmente di due tipologie:

Incendio originato all'interno: l'incendio si sviluppa nei locali interni e può coinvolgere la facciata attraverso le aperture (serramenti), con possibilità di propagazione verso l'esterno e nuovamente all'interno innescando incendi secondari ai piani superiori, attraverso le componenti vetrate rotte per effetto del calore, proseguendo lungo la facciata esterna in presenza di materiali di rivestimento combustibili o per effetto camino nelle intercapedini (es. facciate a doppia pelle). Il codice per prevenire questo tipo di incendio suggerisce come misure preventive l'impiego di barriere allineate con le partizioni interne dei compartimenti definite fasce di separazione; utilizzo di materiali di rivestimento con reazione al fuoco almeno B-s3,d0 o superiore in base alla classificazione dell'edificio; inserimento di



Figura 6 Propagazione incendio originato all'interno [8]

elementi interruttori di fiamma interni alle intercapedini, che essendo realizzate in materiale intumescente reagiscono al calore provocato dall'incendio espandendosi e provocando di conseguenza la chiusura dell'intercapedine impedendo il passaggio di fumi e calore e limitando la propagazione. (Figura 6)

- **Incendio originato all'esterno:** in questo caso l'incendio si sviluppa fuori dall'edificio e la facciata rappresenta la prima superficie coinvolta (es. incendio di un veicolo, cassonetto, vegetazione o edificio adiacente), la modalità di innesco delle chiusure d'ambito può avvenire per contatto diretto delle fiamme, per irraggiamento termico o per la diffusione di materiale incandescente volatile, specie se rivestita con materiali infiammabili o per il possibile coinvolgimento delle aperture, con ingresso delle fiamme o fumo all'interno, in questo caso le misure preventive prevedono oltre a quelle illustrate in precedenza, in aggiunta viene prevista una distanza di separazione tra le strutture per evitare l'innesco per irraggiamento sui rivestimenti derivante da un incendio in un edificio adiacente.

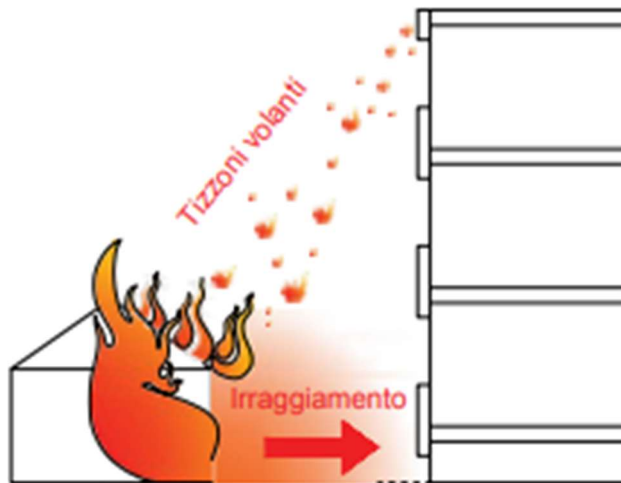


Figura 7 Propagazione incendio originato all'esterno [8]

2.2.3 Reazione al fuoco dei materiali

La reazione al fuoco dei materiali, come precedentemente evidenziato, rappresenta un elemento centrale nella progettazione antincendio. Nella Regola Tecnica dedicata alle chiusure d'ambito degli edifici civili, viene riservata un'apposita sezione a questo parametro, riconoscendone l'importanza nei meccanismi di innesco e propagazione dell'incendio. In particolare, per la determinazione dei livelli prestazionali minimi richiesti, il Codice di Prevenzione Incendi individua come parametri di input l'altezza complessiva dell'attività e il numero di occupanti presenti, al fine di classificare la struttura e definire coerentemente i requisiti di sicurezza delle chiusure d'ambito.

- SA: chiusure d'ambito di:
 - i. edifici aventi le quote di tutti i piani comprese tra $-1 \text{ m} < h \leq 12 \text{ m}$, affollamento complessivo ≤ 300 occupanti e che non includono compartimenti con R_{vita} pari a D1, D2;
 - ii. edifici fuori terra, ad un solo piano;

- SB: chiusure d'ambito di edifici aventi quote di tutti i piani ad $h \leq 24$ m e che non includono compartimenti con R_{vita} pari a D1, D2;
- SC: chiusure d'ambito di altri edifici.

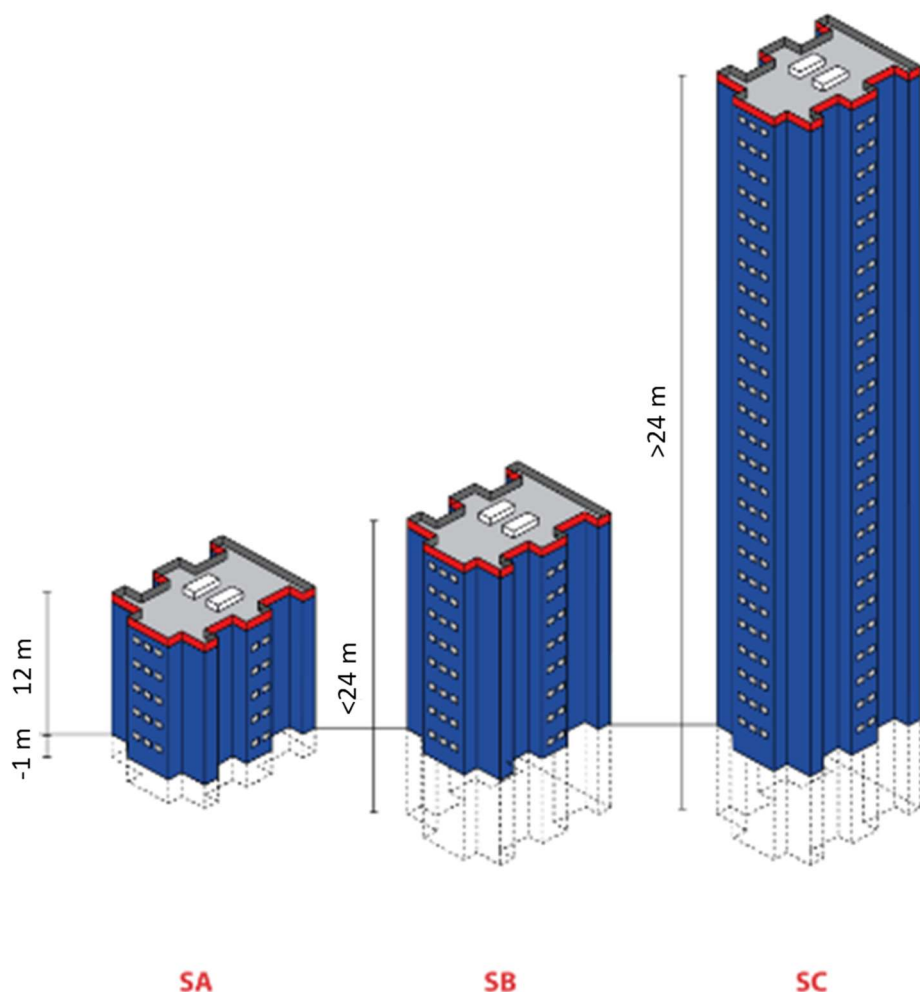


Figura 8 Classificazione RTV13 [4]

La classificazione SA non prevede l'obbligo di rispettare requisiti minimi di reazione al fuoco. Al contrario, per le chiusure d'ambito rientranti nelle classi SB e SC, è richiesta l'adozione di materiali appartenenti rispettivamente ai gruppi GM2 e GM1, in funzione del livello di rischio e delle prestazioni attese. I materiali per i quali si richiede la verifica della classe di reazione al fuoco sono i seguenti:

- a. Isolanti termici, come ad esempio cappotti non facenti parte di sistemi in kit;
- b. Sistemi di isolamento esterno in kit, come i sistemi ETICS o cappotti certificati come sistema;
- c. Guarnizioni, sigillanti e materiali di tenuta, nel caso in cui occupino complessivamente una superficie superiore al 10% della superficie lorda della chiusura d'ambito;
- d. Altri componenti, con esclusione dei componenti vetrati, qualora occupino più del 40% della superficie lorda della chiusura d'ambito.

Una volta individuato il gruppo di materiali (GM1, GM2 o GM3), si procede con la determinazione della classe di reazione al fuoco richiesta, facendo riferimento al Capitolo S.1 del Codice di Prevenzione Incendi. Tale capitolo fornisce i criteri di classificazione dei materiali in funzione della loro destinazione d'uso. In particolare, ogni tipologia di materiale viene classificata in base al suo impiego specifico all'interno dell'edificio. Ad esempio, gli isolanti termici sono oggetto della *Tabella S.1-7* del Capitolo S.1, che stabilisce le classi minime di reazione al fuoco in funzione della categoria di rischio dell'attività e delle caratteristiche del sistema costruttivo. All'interno della sezione V13 viene inoltre inserita la seguente precisazione: “*Nel caso in cui la funzione isolante della facciata sia garantita da un insieme di elementi unitamente commercializzati come kit, la classe di reazione a fuoco è riferita al kit nelle sue condizioni finali di esercizio e considerato il materiale di rivestimento. Negli altri casi gli elementi sono considerati materiali per l'isolamento, ai fini della prestazione di reazione al fuoco secondo il capitolo S.1.*” [5]. Quindi risulta indispensabile ai fini della tesi la consultazione della *Tabella S.1-6*.

Descrizione materiali	GM1	GM2	GM3
	EU	EU	EU
Rivestimenti a soffitto [1]	A2_s1,d0	B-s2,d0	C_s2,d0
Controsoffitti, materiali di copertura [2], pannelli di copertura [2], lastre di copertura [2]			
Pavimentazioni sopraelevate (superficie nascosta)			
Rivestimenti a parete [1]	B-s1,d0		
Partizioni interne, pareti, pareti sospese			
Rivestimenti a pavimento [1]	Bfl-s1	Cfl-s1	Cfl-s2
Pavimentazioni sopraelevate (superficie calpestabile)			
[1] Qualora trattati con prodotti vernicianti ignifughi omologati ai sensi del DM 6/3/1992, questi ultimi devono essere idonei all'impiego previsto e avere la classificazione indicata di seguito (per classi differenti da A2): GM1 e GM2 in classe 1; GM3 in classe 2; per i prodotti vernicianti marcati CE, questi ultimi devono avere indicata la corrispondente classificazione.			
[2] Si intendono tutti i materiali utilizzati nell'intero pacchetto costituente la copertura, non soltanto i materiali esposti che costituiscono l'ultimo strato esterno.			

Tabella 1 S.1-6: Classificazione in gruppi di materiali per rivestimento e completamento [5]

Descrizione materiali	GM1	GM2	GM3
	EU	EU	EU
Isolanti protetti [1]	C-s2,d0	D-s2,d2	E
Isolanti lineari protetti [1], [3]	C _L -s2,d0	D _L -s2,d2	E _L
Isolanti in vista [2]	A2-s1,d0	B-s2,d0	B-s3,d0
Isolanti lineari in vista [2], [3]	A2 _L -s1,d0	B _L -s3,d0	B _L -s3,d0
[1] Protetti con materiali non metallici del gruppo GM0 oppure prodotti di classe di resistenza al fuoco K 10 e classe minima di reazione al fuoco B-s1,d0. [2] Non protetti come indicato nella nota [1] della presente tabella. [3] Classificazione riferita a prodotti di forma lineare destinati all'isolamento termico di condutture di diametro massimo comprensivo dell'isolamento di 300 mm.			

Tabella 2 S.1-7: Classificazione in gruppi di materiali per l'isolamento [5]

Le sigle indicano le classi europee individuate nella UNI EN 13501-1:2019, di seguito vengono elencati i significati:

Classi principali

- Grado di combustibilità
 - A1 = Incombustibile, nessun contributo all'incendio
 - A2 = Combustibilità limitata, contributo all'incendio molto limitato
 - B = Combustibile, contributo limitato all'incendio
 - C = Combustibile, basso contributo all'incendio
 - D = Combustibile, medio contributo all'incendio
 - E = Combustibile, elevato contributo all'incendio
 - F = Combustibile, estremamente infiammabile

Classi complementari

- Produzione di fumo
 - s1 = Emissione di fumi molto limitata, bassa velocità
 - s2 = Emissione di fumi moderata, media velocità
 - s3 = Emissione di fumi elevata, alta velocità
- Gocciolamento
 - d0 = Assenza di gocciolamento
 - d1 = Gocciolamento limitato
 - d2 = Non classificato
- L = Isolanti termici lineari

2.2.4 Sistemi di protezione passiva (Fasce di separazione)

Le fasce di separazione sono porzioni di chiusura d'ambito posizionate nelle facciate in corrispondenza delle proiezioni degli elementi di compartimentazione orizzontale (solai) e verticale (setti), nonché lungo le linee di separazione tra compartimenti contigui, con lo scopo di limitare la propagazione dell'incendio sia in direzione verticale sia orizzontale attraverso l'involucro esterno dell'edificio. Le fasce di separazione devono rispettare degli standard di caratteristiche costruttive e prestazionali di reazione e resistenza al fuoco

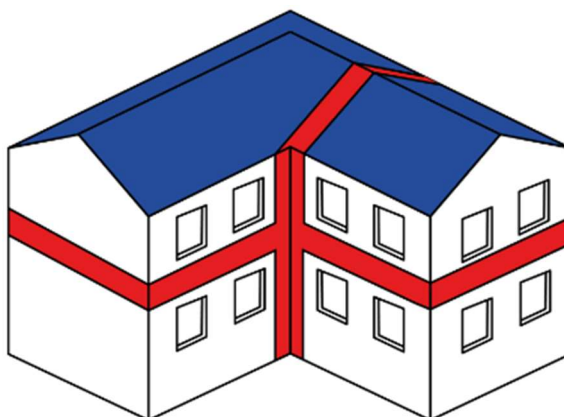


Figura 9 Esempio fasce di separazione [4]

- Reazione al fuoco: i materiali impiegati per le fasce devono avere classe di reazione al fuoco non inferiore ad A2-s1,d0 secondo UNI EN 13501-1.
- Resistenza al fuoco: le fasce di separazione, se non rappresentano elementi portanti, devono soddisfare classe E 30-ef o E 30-ef(i), mentre sono elementi portanti, classe minima RE 30-ef (o RE 30-ef(i)) secondo UNI EN 13501-2.

In copertura, le fasce devono garantire uno sviluppo minimo di 1,00 m e possedere classe di comportamento al fuoco esterno BROOF t2, t3 o t4 oppure classe di resistenza al fuoco EI 30.

- Fasce orizzontali (sezioni verticali di facciata): sviluppo orizzontale complessivo $\geq 1,00$ m, misurato in pianta lungo la proiezione del solaio (illustrazione V.13-2).
- Fasce verticali (sezioni orizzontali di facciata): sviluppo verticale complessivo $\geq 1,00$ m, misurato in elevazione lungo la proiezione del setto.
- Diedri: se la fascia forma un angolo $\alpha < 90^\circ$ (ad esempio in corrispondenza di spigoli o rientranze), il requisito di larghezza minima diventa:

$$L_{\min} = 1,00 + (d_{s,3} - 1) \cdot \cos \alpha$$

dove $d_{s,3}$ è la distanza di separazione tra compartimenti definita al par. S.3.11 del Codice.

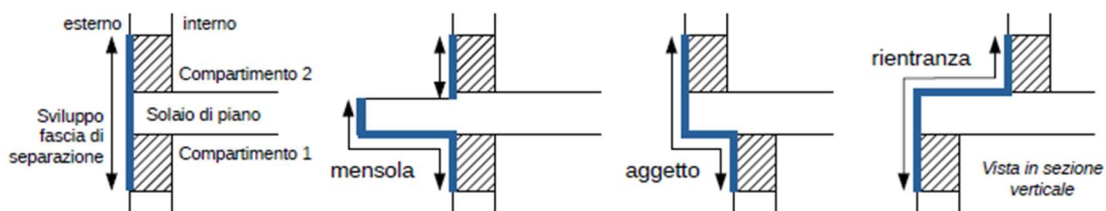


Illustrazione V.13-2: Esempi di fascia di separazione orizzontale in facciata

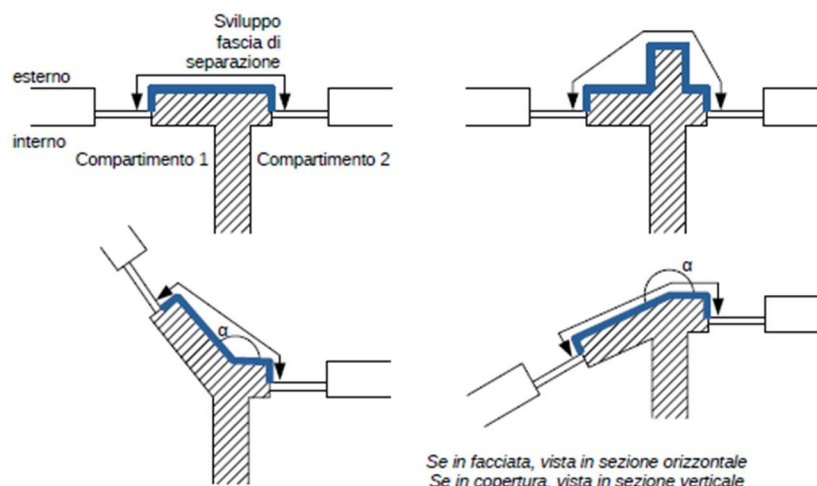


Illustrazione V.13-3: Esempi di fascia di separazione verticale in facciata o in copertura

Figura 10 Estratto dal Codice di prevenzione incendi (geometria delle fasce di separazione) [5]

Le fasce devono essere continue e prive di discontinuità non trattate; eventuali giunti di dilatazione devono essere realizzati con materiali omogenei o con appositi sigillanti classificati almeno A2-s1,d0 e corredati da elementi costruttivi in classe E 30-ef.

2.3 Metodologie prestazionali e approccio ingegneristico con la Fyre Safety Engineering

2.3.1 Capitolo M1 (Metodologia di progettazione dell'ingegneria della sicurezza antincendio)

Il capitolo M1 del Decreto Ministeriale 3 agosto 2015 (Allegato I) costituisce la base metodologica per l'applicazione dell'approccio prestazionale alla sicurezza antincendio, noto anche come "performance-based design". Tale approccio affianca i metodi prescrittivi tradizionali e ne supera i limiti di rigidità, consentendo al progettista di dimostrare, attraverso analisi quantitative e qualitative, che le soluzioni antincendio adottate garantiscono il raggiungimento di obiettivi di sicurezza definiti in termini di prestazioni misurabili. Il processo metodologico previsto dalla Regola M1 si articola in due fasi strettamente correlate: l'analisi preliminare e l'analisi quantitativa.

- **Analisi preliminare:** il progettista definisce innanzitutto le funzioni critiche da tutelare, quali la salvaguardia della vita umana, la protezione dei beni sensibili e la continuità operativa dell'attività. Sulla base delle caratteristiche del caso

studio vengono individuate le soglie di prestazione, ossia i parametri fisici e fisiologici che non devono essere superati durante lo sviluppo dell'incendio. Tali soglie possono riguardare la visibilità minima lungo le vie di esodo, la temperatura massima tollerabile dalle strutture portanti, i livelli di concentrazione di gas tossici e la durata minima di evacuazione richiesta affinché tutti gli occupanti raggiungano un luogo sicuro. Si procede all'identificazione degli scenari di incendio credibili, che comprendono sia le modalità di innesco e propagazione del fuoco sia il comportamento degli occupanti e l'efficacia degli impianti antincendio attivi (rivelatori, allarmi, sprinkler). Tra questi scenari se ne seleziona un sottoinsieme rappresentativo, costituito dai casi più critici in termini di potenziale di danno e complessità di gestione, motivando le eventuali esclusioni.

- L'analisi quantitativa si fonda sulla modellazione del fenomeno incendio mediante l'utilizzo di curve termiche e modelli fluidodinamici. Le curve nominali (per esempio la tipica curva t^2) vengono impiegate per le verifiche preliminari, mentre le simulazioni avanzate tramite software CFD (ad esempio FDS o PyroSim) consentono di riprodurre fedelmente lo sviluppo del calore e dei prodotti della combustione all'interno dei compartimenti. A ciascuno scenario selezionato viene associato un carico d'incendio specifico, calcolato come rapporto tra il potere calorifico dei materiali presenti e la superficie di progetto, nonché un insieme di parametri termofisici relativi alla produzione e stratificazione dei fumi, alla velocità di crescita del fuoco e alla propagazione delle alte temperature. Attraverso queste simulazioni vengono determinati il tempo disponibile di esodo (Available Safe Egress Time, ASET) e il tempo richiesto per l'esodo (Required Safe Egress Time, RSET). La progettazione si considera soddisfacente solo qualora ASET risulti maggiore di RSET, comprensivo di un adeguato margine di sicurezza che tenga conto delle incertezze di modellazione e delle variazioni operative reali.

A completamento dell'attività di analisi, la sezione M1 stabilisce come deve essere realizzata la redazione di una relazione tecnica esaustiva, nella quale devono essere riportati tutti i passaggi metodologici, le assunzioni effettuate, i parametri di input, i risultati delle simulazioni e il confronto con le prestazioni attese. Tale documentazione include planimetrie e sezioni, grafici di evoluzione di temperatura, visibilità e concentrazione di gas tossici, nonché schede tecniche dei prodotti e delle soluzioni costruttive adottate.

2.3.2 Capitolo M.2 (Scenari di incendio per la progettazione prestazionale)

Il capitolo M2 si concentra sull'individuazione, sulla selezione e sulla caratterizzazione degli scenari di incendio di progetto, elemento imprescindibile per la progettazione antincendio con un'ottica prestazionale. In questo ambito, è necessario tenere in considerazione l'intero insieme degli eventi credibili che possono dar luogo

a un incendio, a partire dalla natura e dalla localizzazione dei possibili inneschi fino alle modalità di propagazione del fuoco e dei fumi e al comportamento degli occupanti. Durante la fase di identificazione vengono quindi analizzati tutti i fattori che influenzano l'evoluzione dell'incendio: la disponibilità di materiali combustibili, le caratteristiche di ventilazione naturale o forzata, la presenza e l'efficacia dei sistemi antincendio attivi (rivelatori, allarmi, sprinkler) e le dinamiche di esodo degli individui. Una volta mappato il panorama completo dei rischi, si procede alla selezione di un sottoinsieme di scenari rappresentativi, caratterizzati da un potenziale di danno elevato e da una certa probabilità di accadimento. L'obiettivo non è esaminare ogni combinazione possibile, bensì individuare i casi più critici e significativi. Può essere utile per guidare ad una scelta obbiettiva l'utilizzo dell'albero degli eventi, che è uno strumento logico-grafico impiegato per esplorare in modo sistematico tutte le possibili evoluzioni di un incidente a partire da un evento iniziale. Si parte da un "nodo di innesco" (ad esempio, il malfunzionamento di un'apparecchiatura), procedendo verso destra, si costruiscono una serie di rami che rappresentano il successo o il fallimento dei principali sistemi di sicurezza o delle misure di mitigazione (impianti di rilevazione, sistemi di spegnimento, procedure di evacuazione, ecc.). Ogni cammino dall'origine al termine dell'albero corrisponde a uno specifico scenario di incidente, caratterizzato da un insieme di condizioni (combinare) che ne determinano l'esito. In fase di progettazione antincendio, si concentrano le risorse di modellazione e verifica solo su quei percorsi la cui probabilità combinata (ed impatto potenziale) risulta significativa: in questo modo si evita di dover simulare manualmente centinaia di ipotesi poco probabili e si garantisce che i casi più critici e verosimili siano analizzati in dettaglio. Per ciascuno scenario identificato si deve poi procedere alla sua quantificazione, definendo la curva di incendio di progetto e i relativi parametri termofisici. Una volta individuati gli scenari resta da individuare il parametro più significativo per descrivere la dinamica e la severità di un fuoco, la curva RHR (Rate of Heat Release) che rappresenta l'andamento della potenza termica liberata da un incendio in funzione del tempo.

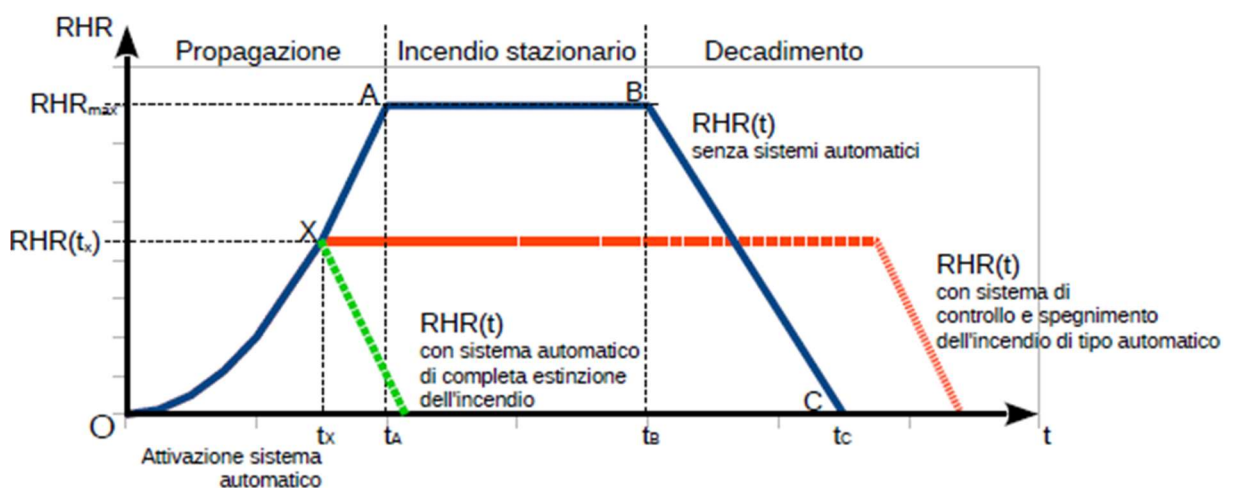


Figura 11 Rappresentazione delle fasi dell'incendio attraverso la curva RHR [5]

La curva RHR caratteristica dell'incendio può essere ricavata principalmente in tre modi:

- Letteratura, che attraverso prove di laboratorio e metodi attendibili pubblicano curve RHR che possono essere riconosciute in fase di progettazione per un gran numero di elementi che possono partecipare all'incendio, un esempio possono essere le curve contenute all'interno dell' SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.
- Stima della curva, è il metodo analitico proposto all'interno del codice di prevenzione incendi per dare un valore quantitativo ad un incendio per il qual non si ha a disposizione una curva RHR già testata. La curva come mostrato in *Figura 13*, viene suddivisa in tre fasi Propagazione, Incendio stazionario e Decadimento, e attraverso i dati di input (carico d'incendio, velocità di crescita e valore d picco) viene calcolato lo sviluppo dell'intera curva, che inoltre può essere anche caratterizzato attraverso il taglio della curva per rappresentare i sistemi di protezione attiva che ne limitano lo sviluppo o ne procurano l'estinzione anticipata.
- Focolare predefinito, viene proposto anch'esso dal codice e rappresenta una semplificazione cautelativa della curva RHR, che può essere utilizzata in fase di progettazione dopo aver valutato che il focolare oggetto di studio ne risulti adeguatamente rappresentato.

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio α	150 s (fast)	75 s (ultra-fast)
RHRmax totale RHRmax per m2 di superficie del focolare	5 MW 250-500 kW/m2 [1]	50 MW 500 -1000 kW/m2 [1]
Resa in particolato Ysoot	Pre flashover: 0,07 kg/kg [2,3] Post flashover: 0,14 kg/kg [2,3]	Pre flashover: 0,18 kg/kg [4] Post flashover: 0,36 kg/kg [4]
Resa in monossido di carbonio YCO	Pre flashover: 0,10 kg/kg [5] Post flashover: 0,40 kg/kg [5]	
Calore di combustione effettivo ΔH_C	20 MJ/kg [3]	
Resa in biossido di carbonio YCO2	1,5 kg/kg [3,6]	
Resa in acqua YH2O	0,82 kg/kg [3,6]	
Frazione di RHR in irraggiamento (Radiative fraction)	35% [3]	
[1] Da impiegare in alternativa all'RHRmax totale, considerando la massima superficie del focolare, pari al compartimento antincendio nel caso di carico di incendio uniformemente distribuito, ma che può essere un valore inferiore nel caso d'incendio localizzato. [2] Robbins A P, Wade C A, Study Report no 185 "Soot Yield Values for Modelling Purposes - Residential Occupancies", BRANZ, 2008 [3] "C/VM2 Verification method: Framework for fire safety design", New Zealand Building Code [4] "SFPE handbook of fire protection engineering", NFPA, 4th ed., 2008. Tabella 3-4.16, pag. 3-142, da polyurethane flexible foams. [5] Stec A A, Hull T R, "Fire Toxicity", Woodhead Pub., 2010. § 2.4 con $\Phi = 1,25$ (underventilated fire) [6] In alternativa alle rese YCO2 e YH2O, si può imporre nel codice di calcolo il combustibile generico CH2O0,5.		

Tabella 3 M.2-2: Focolari predefiniti [5]

In esito a queste analisi, si dispone di una serie di scenari di progetto completi di tutte le informazioni necessarie per le verifiche prestazionali: curva di calore rilasciato (RHR), produzione di fumo, temperatura, visibilità, concentrazione di agenti pericolosi e tempi di esodo associati. Questi dati costituiscono il punto di partenza per il calcolo dei tempi disponibili di fuga (ASET) e dei tempi richiesti (RSET), nonché per la definizione delle strategie di mitigazione e controllo dell'incendio. L'intera procedura, inclusa la motivazione delle scelte e i risultati di modellazione, viene documentata in un capitolo dedicato della relazione tecnica di progetto, con l'obiettivo di garantire la massima trasparenza e ripetibilità dell'analisi prestazionale.

2.3.3 Capitolo M3 (Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale)

Il capitolo M3 del Decreto Ministeriale 3 agosto 2015 (Allegato I) focalizza interamente l'attenzione alla protezione della vita umana attraverso un approccio prestazionale all'esodo antincendio. L'obiettivo centrale di M3 è assicurare che ogni occupante, indipendentemente dalla propria posizione iniziale, possa raggiungere un luogo sicuro prima che le condizioni interne diventino inaccettabili per le funzioni vitali. A tal fine, il capitolo introduce due grandezze fondamentali: il Required Safe Egress Time (RSET), ovvero il tempo necessario perché un occupante percepisca l'allarme, avvii il movimento e percorra l'intero tragitto di fuga fino al luogo sicuro, e l'Available Safe Egress Time (ASET) (*Figura 14*), che rappresenta il tempo disponibile prima che le condizioni ambientali variabili in base ai casi, quali visibilità, temperatura e concentrazione di gas tossici superino i limiti di sicurezza definiti in fase di progettazione (*Tabella 3*).

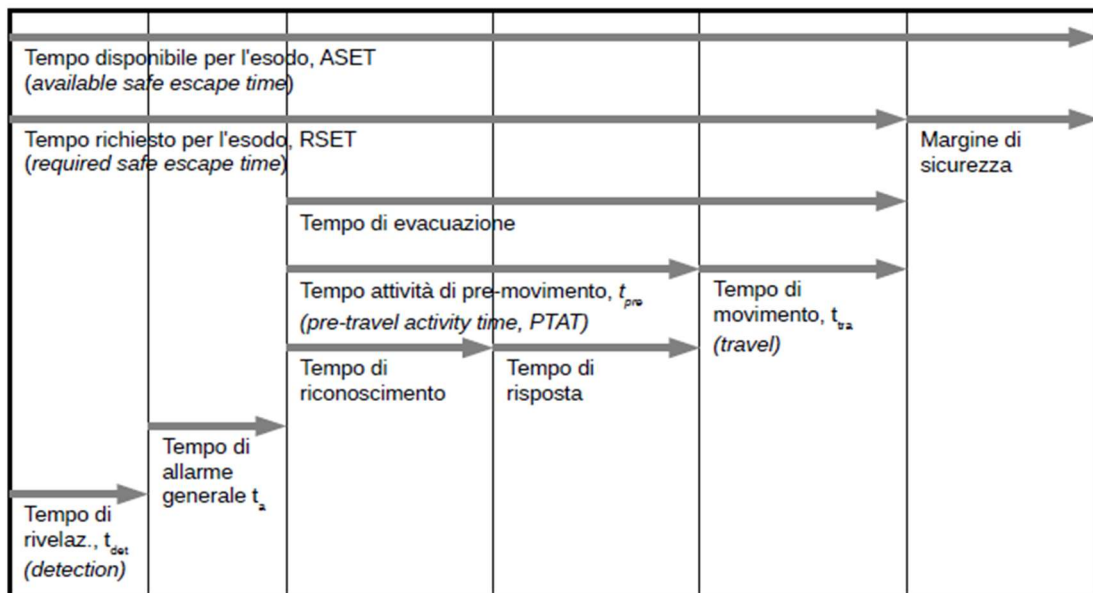


Figura 12 M.3-1: Confronto tra ASET ed RSET [5]

Modello	Prestazione	Soglia di prestazione	Riferimento
Oscuramento della visibilita da fumo	Visibilita minima di pannelli riflettenti, non retroilluminati, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 10 m Occupanti in locali di superficie lorda < 100m²: 5 m	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 5 m Soccorritori in locali di superficie lorda < 100m²: 2,5 m	[1]
Gas tossici	FED, fractional effective dose e FEC, fractional effective concentration per esposizione a gas tossici e gas irritanti, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 0,1	ISO 13571:2012, limitando a 1,1% la porzione di occupanti incapacitati al raggiungimento della soglia
		Soccorritori: nessuna valutazione	-
Calore	Temperatura massima di esposizione	Occupanti: 60°C	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 80°C	[1]
Calore	Irraggiamento termico massimo da tutte le sorgenti (incendio, effluenti dell’incendio, struttura) di esposizione degli occupanti	Occupanti: 2,5 kW/m2	ISO 13571:2012, per esposizioni inferiori a 30 minuti
		Soccorritori: 3 kW/m2	[1]
[1] Ai fini di questa tabella, per soccorritori si intendono i componenti delle squadre aziendali opportunamente protetti ed addestrati alla lotta antincendio, all’uso dei dispositivi di protezione delle vie aeree, ad operare in condizioni di scarsa visibilit�. Ulteriori indicazioni possono essere desunte ad esempio da documenti dell’Australian Fire Authorities Council (AFAC) per hazardous conditions.			

Tabella 4 M.3-2: Esempio di soglie di prestazione impiegabili con il metodo di calcolo avanzato [5]

La progettazione prestazionale contenuta in M3 si basa sul principio imprescindibile che l'ASET superi sempre il RSET con un adeguato margine di sicurezza. Questo margine, che tiene conto delle incertezze legate ai comportamenti umani, alle prestazioni degli impianti di allarme e alla variabilità delle condizioni d'incendio, è generalmente compreso tra un valore pari al 100% del RSET e in caso di specifiche valutazioni sull'affidabilità dei dati di input impiegati nella progettazione prestazionale, è consentito assumere $t_{\text{marg}} \geq 10\% \cdot \text{RSET}$, ma in ogni caso deve essere

superiore ai 30 secondi. Nella (*Figura 14*) vengono chiaramente illustrati i diversi intervalli temporali che compongono il RSET:

- t_{det} : tempo di rivelazione, è determinato dalla presenza o meno di un sistema di rivelazione incendio e dalla tipologia di impianto
- t_a : il tempo necessario all'avvio dell'allarme generale dovuto anche al tipo di gestione della sicurezza
- t_{pre} : composto dal tempo di riconoscimento da parte degli occupanti e dal tempo di risposta che riguarda le procedure che l'occupante effettuerà prima di iniziare il movimento verso le uscite
- t_{tra} : è l'effettivo tempo di movimento per raggiungere un luogo sicuro

Per la determinazione dell'ASET, il capitolo M3 prescrive l'uso di modelli semplificati o di simulazioni numeriche che consentano di ricostruire l'evoluzione dell'incendio e degli effetti sulle condizioni ambientali interne. Tali modelli calcolano l'andamento della stratificazione del fumo, la distribuzione delle temperature e la diffusione dei gas tossici in funzione del tempo, fornendo curve di visibilità e concentrazione che, in corrispondenza dei percorsi di esodo, indicano il momento esatto in cui si raggiungono i valori critici. Una volta confrontati RSET e ASET, la relazione di progetto espone in dettaglio i risultati ottenuti, evidenziando eventuali punti di debolezza e proponendo misure correttive, quali riduzione delle distanze di esodo, miglioramento dei sistemi di allarme o incremento della capacità di estrazione dei fumi. La documentazione tecnica, parte integrante dell'approccio M3, include grafici temporali che comparano i due profili di tempo, planimetrie delle vie di fuga annotate con i valori di RSET e ASET, e tabelle riassuntive dei parametri di simulazione. Nonostante la maggiore complessità rispetto al metodo prescrittivo, l'approccio prestazionale delineato in M3 offre un elevato grado di flessibilità progettuale e assicura un controllo quantitativo e documentato della sicurezza antincendio.

3. Caso studio

3.1 Inquadramento generale del caso esemplificativo oggetto della Tesi

L'edificio oggetto di analisi è una torre residenziale di nuova progettazione, caratterizzata da una significativa altezza complessiva di 82 metri fuori terra. La struttura si sviluppa su 24 piani residenziali e 2 livelli interrati destinati a uso autorimessa. Il fabbricato si presenta isolato, privo di connessioni strutturali con edifici adiacenti, ed è stato concepito secondo le normative tecniche vigenti. Dal punto di vista strutturale, l'edificio è realizzato in cemento armato, con un telaio regolare in elevazione e una configurazione in pianta che varia con l'altezza. I primi 17 piani presentano una pianta più ampia, organizzata attorno a un corpo scala centrale, con sei unità abitative per piano. Nei sette piani superiori, la pianta si riduce, ospitando tre unità abitative per piano.

Le unità abitative nei livelli inferiori (*Figura 15*) sono così articolate:

- 4 appartamenti con una camera matrimoniale e una camera singola evidenziati nella pianta con il colore **ARANCIONE**;
- 2 appartamenti con sola camera matrimoniale evidenziati in pianta con il colore **AZZURRO**.

Nei livelli superiori (*Figura 16*) (pianta ridotta):

- 2 appartamenti con una camera matrimoniale e due camere singole evidenziati nella pianta con il colore **ARANCIONE**;
- 1 appartamento con sola camera matrimoniale evidenziati in pianta con il colore **AZZURRO**.

Complessivamente, l'edificio ospita 123 unità residenziali:

- 102 appartamenti nei primi 17 piani;
- 21 appartamenti nei restanti 7 piani.

Assumendo tra i 2 e i 4 occupanti per unità abitativa, in base all'estensione dell'unità immobiliare, si può stimare una presenza complessiva compresa tra circa 330 e 370 residenti, corrispondente a 123 nuclei familiari. L'involucro esterno dell'edificio rappresenta un aspetto centrale dell'analisi. Le facciate saranno oggetto di approfondimento nei capitoli successivi, in quanto le diverse soluzioni progettuali saranno l'oggetto del presente caso studio.

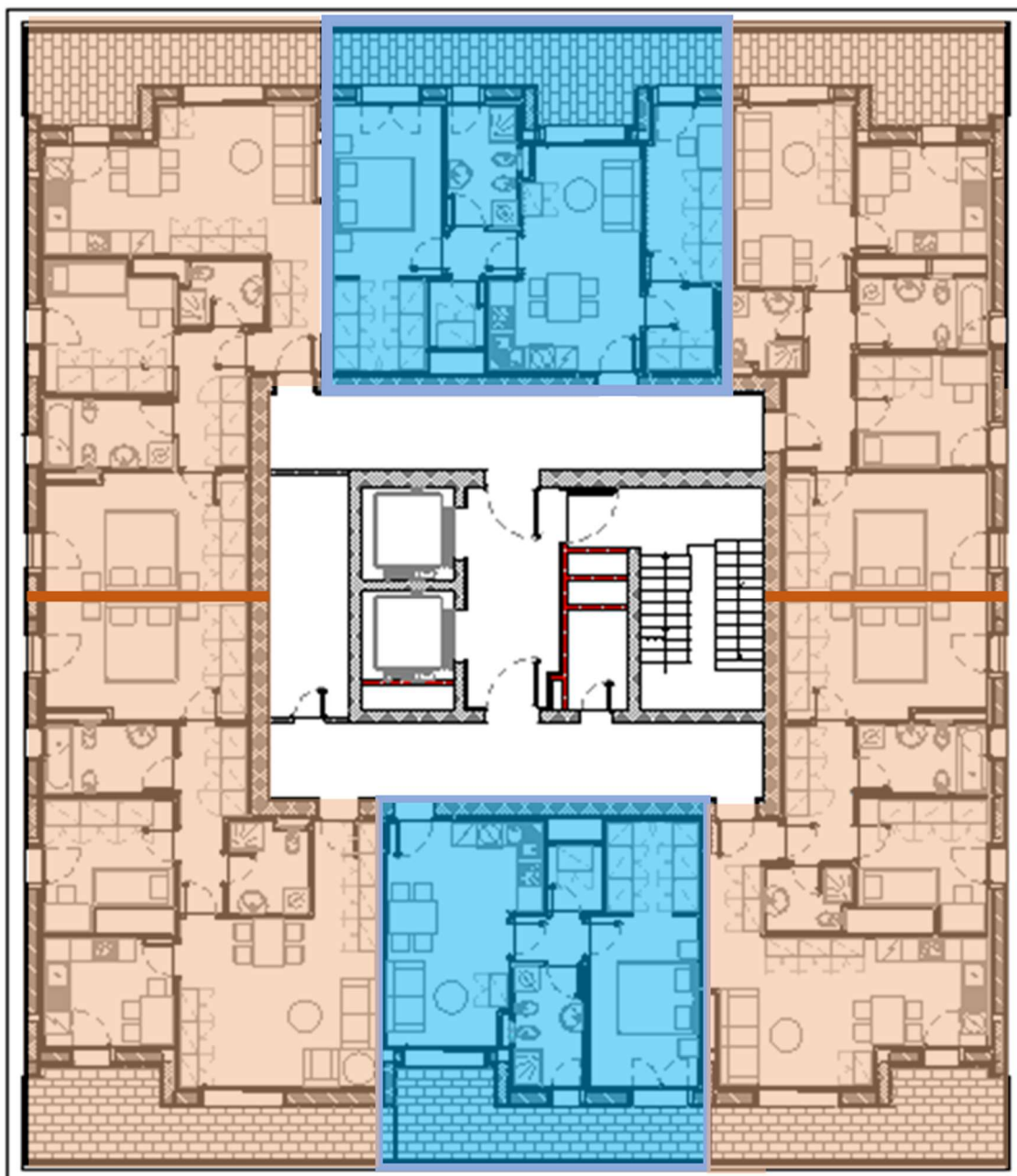


Figura 13 Pianta piano tipo primi 17 piani

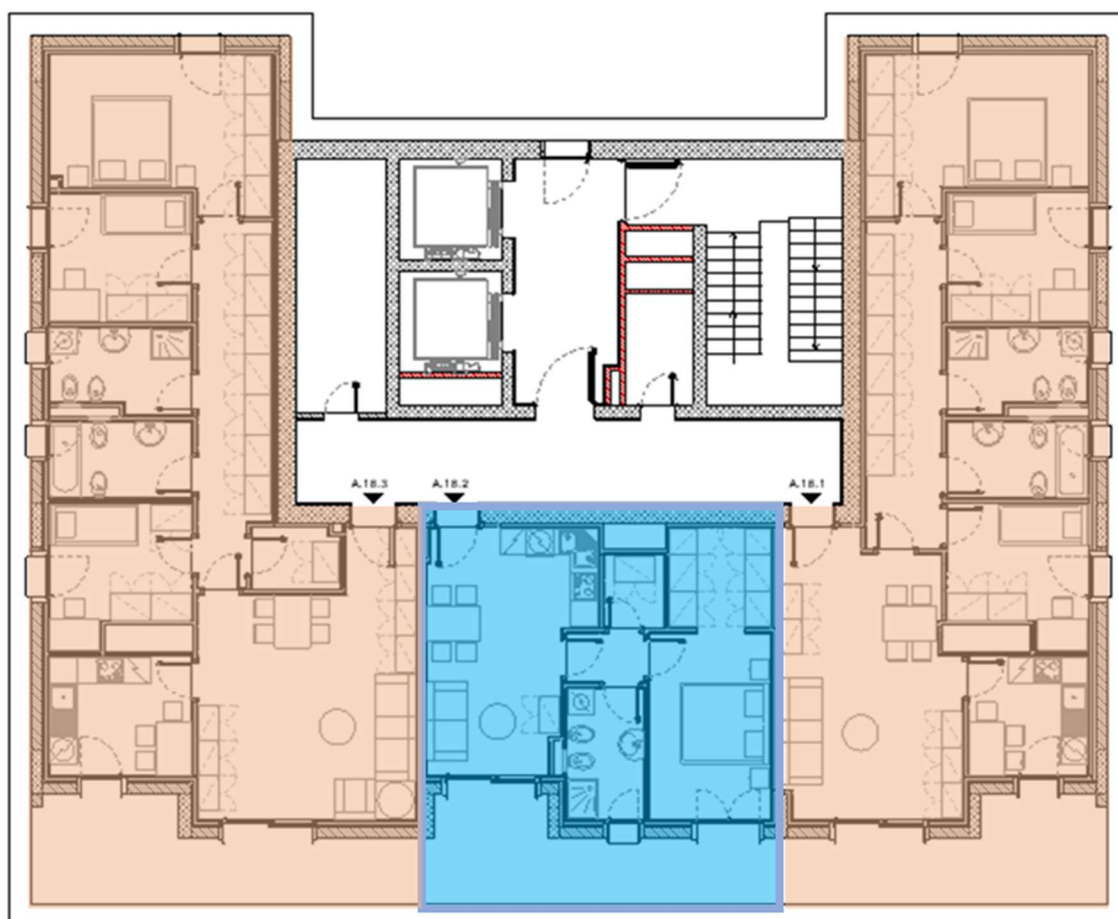


Figura 14 Pianta piano tipo ultimi 7 piani

3.2 Obiettivi della verifica comparativa

L'obiettivo principale della presente verifica comparativa è quello di valutare la prestazione al fuoco delle diverse soluzioni tecnologiche di facciata previste per l'edificio oggetto di studio, con particolare riferimento alla propagazione dell'incendio lungo l'involucro esterno. In particolare, l'analisi si propone di verificare, mediante simulazioni numeriche di incendio, la possibilità di impiegare soluzioni alternative rispetto a quelle indicate dal Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 3 agosto 2015), dimostrando che esse garantiscono un livello di sicurezza equivalente o superiore, in relazione al rischio di propagazione dell'incendio in facciata. Si procederà analizzando il comportamento al fuoco delle diverse configurazioni di facciata, con riferimento alla capacità di impedire o rallentare la propagazione verticale delle fiamme lungo l'involucro, confrontando infine le prestazioni delle soluzioni alternative con quelle delle soluzioni conformi, in termini di:

- Velocità di propagazione dell'incendio;
- Estensione dell'area interessata dalle fiamme;
- Trasmissione del calore ai piani superiori;
- Possibile innesco di nuovi focolai in corrispondenza di aperture (finestre, logge, ecc.).

Dimostrare l'equivalenza prestazionale delle soluzioni alternative supporta la scelta di sistemi di facciata più innovativi e architettonicamente qualificanti, garantendo al contempo il pieno rispetto dei requisiti di sicurezza antincendio e un maggiore controllo sulla dinamica del fuoco. L'obiettivo è inoltre fornire indicazioni operative per la progettazione prestazionale antincendio di edifici di notevole altezza (82 m fuori terra nel caso studio), nei quali la propagazione esterna lungo la facciata costituisce un rischio particolarmente critico.

3.2.1 Soluzione 1

La Soluzione 1 (Figura 15 e 16), è stata ideata come pienamente conforme alla Regola Tecnica Verticale V.13, prevede l'applicazione di fasce di separazione continue lungo le proiezioni dei solai di compartimentazione orizzontale, realizzate con materiali classificati A2-s1,d0 in reazione al fuoco e con prestazioni di resistenza RE 30-ef; tali fasce orizzontali, con sviluppo 1 metro in elevazione, sono state ottenute tramite pannelli coibentati in lana di roccia rinforzata, ancorati a profili di acciaio zincato R 30. La struttura portante della facciata è realizzata in muratura mentre per lo strato isolante è stato ipotizzato con l'utilizzo di ETICS (External Thermal Insulation Composite System) a base di EPS (Polistirene Espanso Sinterizzato) le cui caratteristiche termofisiche rispondenti alla RTV13 saranno illustrate nel capitolo dedicato alla realizzazione del modello.



Figura 15 Soluzione conforme RTV13 vista Sud-Ovest



Figura 16 Soluzione conforme RTV13 vista Nord-Ovest

3.2.2 Soluzione 2

La soluzione 2 (*Figura 17 e 18*), rispetta anch'essa il criterio del codice di prevenzione incendi per la realizzazione di fasce di separazione classificate A2-s1,d0 per la reazione al fuoco e RE 30-ef di resistenza al fuoco con uno sviluppo verticale d'interruzione della facciata di 1 metro, in questo caso la struttura portante resta invariata, ma per l'isolamento si utilizza una soluzione difforme dalla RTV.13, il materiale prescelto è l'EPS (Polistirene Espanso Sinterizzato), in questo caso il materiale non essendo considerato come composito (con una protezione aggiuntiva che ne migliora le prestazioni di reazione e resistenza al fuoco), risulta non conforme alla RTV13 essendo normalmente classificato in classe E, è quindi considerata una soluzione alternativa che per poter essere adottata necessita di dimostrazione, tramite analisi prestazionali, che garantiscano i livelli di sicurezza antincendio equivalenti a quelli ottenuti con i sistemi prescritti dalla normativa.



Figura 17 Soluzione difforme RTV13 per materiale (EPS) vista Sud-Ovest



Figura 18 Soluzione difforme RTV13 per materiale vista (EPS) Nord-Ovest

3.2.3 Soluzione 3

Nella soluzione 3 (Figura 19 e 20), viene proposta un'alternativa al sistema prescrittivo della RTV.13, in cui la compartimentazione verticale della facciata è affidata a marcapiani aggettanti, disposti in corrispondenza delle compartimentazioni orizzontali dell'edificio. Tali elementi geometrici presentano uno spessore di 40 cm e una lunghezza di 80 cm e sono realizzati con materiali aventi classificazione A2-s1,d0 per la reazione al fuoco e resistenza REI 30-ef, che come caratteristiche dovrebbero contribuire efficacemente al contenimento della propagazione dell'incendio lungo la facciata. La struttura portante dell'edificio non subisce modifiche, ma la stratigrafia di facciata, come nella soluzione 2 adotta un materiale isolante non conforme alle indicazioni della RTV.13, l'EPS (Polistirene Espanso Sinterizzato), normalmente classificato in classe E per la reazione al fuoco e privo di protezioni aggiuntive che ne migliorino le prestazioni. Di conseguenza, la proposta rappresenta anche in questo caso una soluzione alternativa e, in quanto tale, richiede un'adeguata valutazione prestazionale che dimostri la capacità dell'intero sistema di garantire livelli di sicurezza antincendio equivalenti o superiori a quelli previsti dalle soluzioni conformi.



Figura 19 Soluzione conforme RTV13 per materiale (EPS) con utilizzo di marcapiano vista Sud-Ovest



Figura 20 Soluzione difforme RTV13 per materiale (EPS) con utilizzo di marcapiano vista Nord-Ovest

È stato inoltre realizzato un ulteriore modello utilizzato (*Figura 21*), come metodo di controllo, nel quale le caratteristiche strutturali restano invariate, il materiale utilizzato per la modellazione delle facciate continua ad essere l'EPS come nelle soluzioni alternative, ma non è presente alcuna misura di prevenzione passiva contro la propagazione dell'incendio in facciata, risultano quindi assenti sia le fasce di separazione che gli aggetti marcapiano.

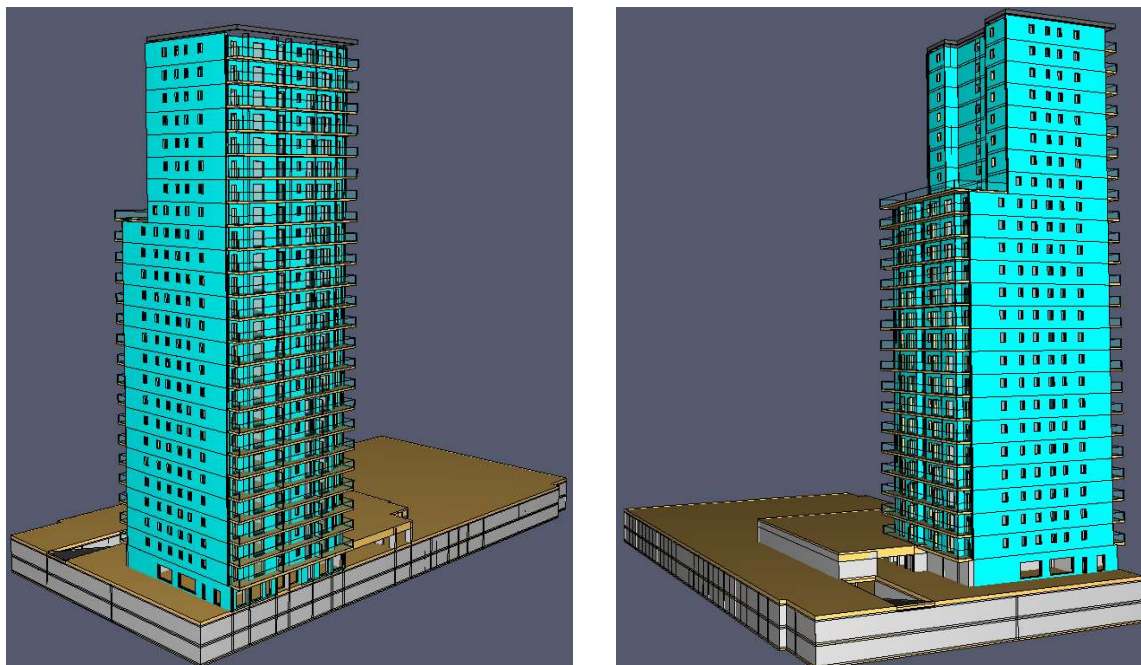


Figura 21 Modello di controllo vista Sud-Ovest a sinistra e vista Nord-Ovest a destra

4. Simulazioni FSE e strumenti utilizzati

4.1 Strumenti: FDS e PyroSim

Questo capitolo è dedicato all'introduzione ai concetti di base per gli strumenti utilizzati per la simulazione, saranno anche introdotti particolari sul modello che verranno in seguito approfonditi nel capitolo successivo dedicato alla modellazione.

Fire Dynamics Simulator (FDS) è un software sviluppato dal National Institute of Standards and Technology (NIST) in collaborazione con il VTT Technical Research Centre of Finland. Si tratta di un codice di fluidodinamica computazionale (CFD) dedicato alla simulazione numerica dell'evoluzione degli incendi in ambienti confinati, è uno strumento di analisi prestazionale, utilizzato nell'ambito della Fire Safety Engineering (FSE) per valutare il comportamento al fuoco di ambienti complessi e prevedere l'efficacia delle misure di protezione antincendio. Il codice risolve numericamente le equazioni fondamentali della fluidodinamica applicate al moto dei gas generati da un incendio. Utilizza un approccio basato su una griglia cartesiana tridimensionale, suddividendo lo spazio in celle (mesh) in cui vengono calcolate le variabili fisiche risolvendo le equazioni di conservazione di massa ed energia. FDS è stato selezionato come codice risolutore per lo sviluppo del lavoro di tesi, in quanto essendo un modello di campo risulta essere il tipo di modello più adatto allo studio di geometrie complesse e nonostante sia un modello generato per le indagini di ambienti confinati risulta adattarsi molto bene anche alla simulazione di incendi che coinvolgono le chiusure d'ambito. Includendo quindi ambienti che non possono essere assimilabili ad ambienti confinati, ma che attraverso la funzione "Open Mesh Boundaries" permette di rendere la mesh che racchiude il modello (normalmente risulta una barriera impenetrabile) una zona di confine aperto che permette quindi ai prodotti di combustione di disperdersi naturalmente e all'aria di fluire nel modello con la possibilità inoltre di poter impostare flussi d'aria che simulino la presenza del vento durante le simulazioni.

Pyrosim è un software di modellazione grafica tridimensionale che funge da interfaccia utente per FDS. Il software è sviluppato da Thunderhead Engineering e si pone l'obiettivo di interporre tra FDS, che necessita di un linguaggio di programmazione per poter impostare i modelli da esaminare, e l'utente, rendendo il processo di modellazione e di impostazione del contesto più rapido ed eliminando la possibilità di errori di logica e sintassi nella scrittura del codice. Le funzioni fondamentali per il corretto utilizzo di Pyrosim sono:

- **Mesh:** Nel contesto delle simulazioni con PyroSim, la definizione della mesh di calcolo rappresenta un passaggio fondamentale, in quanto determina la risoluzione spaziale con cui il motore FDS esegue il calcolo numerico dei fenomeni termo-fluido-dinamici. La mesh è una griglia tridimensionale cartesiana che suddivide il dominio simulato in celle cubiche o rettangolari, all'interno delle quali vengono risolte le equazioni di conservazione di massa ed energia, la propagazione della radiazione termica, il trasporto di massa e i

processi di combustione. La dimensione delle celle influenza direttamente l'accuratezza dei risultati ottenuti e il tempo di calcolo per l'esecuzione della simulazione, celle più piccole aumentano la precisione, ma richiedono maggiore capacità computazionale. Dunque è estremamente importante ottimizzare le mesh per poter ottenere risultati attendibili in tempi accettabili, tenendo sempre in considerazione che il codice prenderà in considerazione solo gli elementi che sono interni alla mesh e tutto ciò che l'attraversa viene troncato sul confine e non verrà preso in considerazione per il calcolo dei risultati. In PyroSim è inoltre possibile definire una o più mesh (multimesh), anche con risoluzioni differenti in zone localizzate per ottimizzare le prestazioni, ma risulta indispensabile seguire le regole di allineamento (Figura) per evitare che si generino errori di calcolo che potrebbero non lasciar avviare la simulazione, bloccarla o invalidarne i risultati ottenuti. Ogni mesh può essere assegnata a un core specifico del processore, permettendo simulazioni parallele (MPI) su più CPU, processo che può essere un notevole risparmio di tempo computazionale se il modello presenta almeno lo stesso numero di mesh rispetto al numero di core del computer che si sta utilizzando per la simulazione, altrimenti il processo risulta essere controproducente. È inoltre essenziale che le mesh coprano completamente l'intero dominio dell'incendio, evitando discontinuità o sovrapposizioni errate. La qualità della mesh influenza anche la stabilità numerica: celle troppo allungate o mal distribuite possono generare errori o instabilità nel calcolo.

Esempi di allineamento corretto della mesh

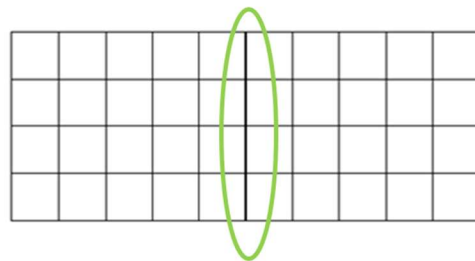


Figura 32. Allineamento ideale della mesh 1:1.

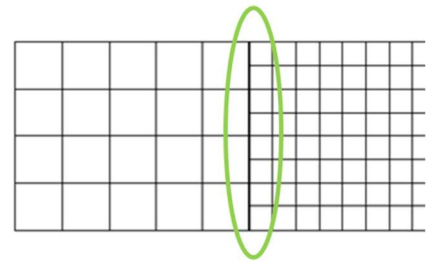


Figura 33. Allineamento 1:n accettabile.

Esempi di allineamento mesh non corretto



Figura 34. Valore discutibile, attenzione.

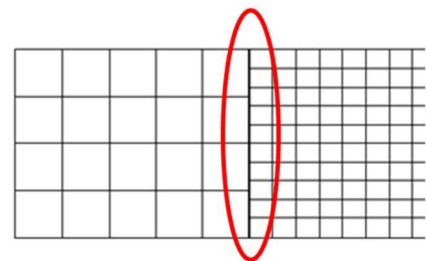


Figura 35. Non consentito in FDS 5.1+, errore.

Figura 22 Esempi di allineamento delle mesh corretti ed errati [6]

- **Definizione delle geometrie:** in PyroSim costituisce il primo passaggio nella costruzione del modello fisico da simulare e riveste un ruolo cruciale per la

coerenza del calcolo numerico. PyroSim utilizza un sistema di modellazione tridimensionale basato su griglie cartesiane, dove le geometrie vengono rappresentate mediante solidi rettangolari (blocchi o muri), piani, aperture, ostacoli e cavità. Gli oggetti possono essere definiti manualmente specificando le coordinate spaziali, disegnati graficamente attraverso l'interfaccia CAD integrata oppure si possono importare geometrie già create direttamente da software CAD o BIM. Ogni oggetto geometrico può essere associato a materiali, superfici, condizioni al contorno e proprietà dinamiche (ad esempio, può essere bruciatore, sensibile alla temperatura innescandosi oppure trasmettendo calore oppure simulare una bocchetta di ventilazione). La modellazione deve rispettare la struttura discreta della mesh FDS: non sono ammessi oggetti con forme complesse (curve o superfici libere) tutto all'interno del modello viene discretizzato alle dimensioni della mesh, ma è possibile ottenere dettagli sufficientemente precisi tramite l'uso di blocchi sovrapposti o disposti in modo scalare. PyroSim consente inoltre di definire geometrie funzionali, come le facciate continue, i marcapiani, i controsoffitti, le cavità ventilate o gli intercapedini, che possono avere un impatto diretto sullo sviluppo e sulla propagazione dell'incendio. Ogni oggetto geometrico è anche parte integrante della definizione della mesh: un errore nella posizione o nelle dimensioni può compromettere la simulazione. La possibilità di visualizzare in tempo reale l'interazione tra geometria e mesh consente all'utente di ottimizzare il modello prima dell'esecuzione, riducendo il rischio di errori numerici e migliorando la fedeltà del risultato. Un problema che purtroppo è stato riscontrato durante il lavoro di tesi riguarda il rapporto tra superfici layered e le mesh, FDS non riconosce la possibilità di attraversamento dei confini tra due mesh differenti ad elementi a cui è stata assegnata una superficie layered (che sono state indispensabili per la modellazione delle lastre della facciata), ciò ha vincolato le simulazioni ad una sola delle facciate dell'edificio, perché non ottimizzando la mesh si sarebbe andati in contro a tempi di simulazione nell'ordine dei mesi per un edificio come quello oggetto del lavoro di tesi.

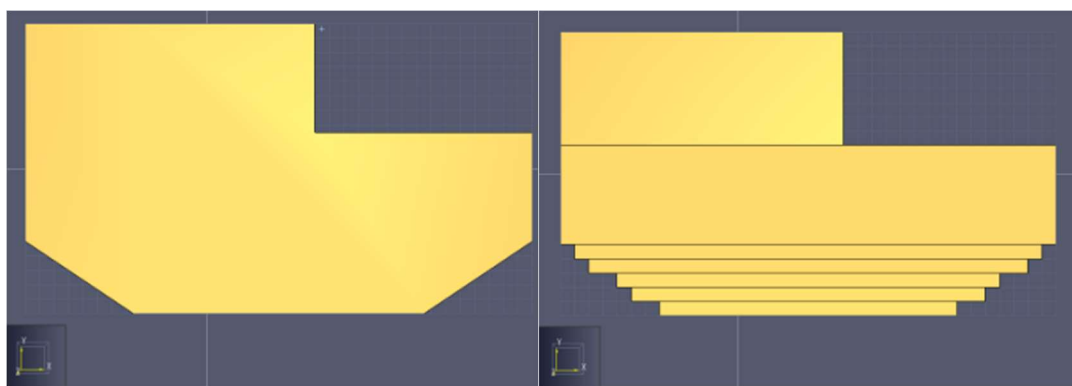


Figura 23 Esempio di discretizzazione dovuta alla mesh [6]

- **Caratterizzazione del focolare:** la corretta caratterizzazione del focolare rappresenta un elemento centrale nella modellazione CFD dell'incendio, in quanto influisce direttamente sulla dinamica dei gas caldi, sullo sviluppo delle temperature e sulla propagazione della fiamma. In PyroSim, il focolare viene definito come una sorgente di rilascio termico (HRR - Heat Release Rate) localizzata in uno o più punti del dominio, mediante ostruzione alla quale viene assegnata la superficie Burner. All'interno del menù di definizione della superficie vengono assegnate le caratteristiche che definiranno le fasi, i prodotti e le temperature che l'incendio genererà. Uno degli elementi fondamentali nella caratterizzazione dell'incendio, quando l'obiettivo della simulazione è indagare lo sviluppo dell'incendio per fini di verifica dei materiali come ad esempio nel lavoro di tesi, è il profilo temporale HRR(t). Questo parametro descrive il rilascio di energia termica che avverrà durante la combustione, può essere impostato per una superficie Burner, ma anche per superfici Layered nel caso si dovesse simulare l'ignizione e l'effettiva combustione di materiali innescati dal focolaio iniziale. Nelle simulazioni di tipo prestazionale, si tende a preferire una modellazione controllata dell'incendio attraverso l'uso di curve di rilascio termico note, come quelle derivate da esperimenti (es. focolari t^2 , curve di crescita lenta/media/rapida o curve reali da test normativi). Il focolare può inoltre essere definito con dimensioni geometriche specifiche (lunghezza, larghezza, altezza) e può avere una fase di accensione ritardata, utile per simulare scenari con più punti di innesco. PyroSim consente di associare alla sorgente anche altri parametri come la produzione di prodotti della combustione (fumo, CO, CO₂, particolato) e la quantità di radiazione emessa, fattori indispensabili per valutare la visibilità oltre all'irraggiamento e la temperatura, come nel caso in cui il processo di FSE preveda la verifica dell'esodo in sicurezza rispettando i valori soglia stabiliti dal Codice di prevenzione incendi nella sezione M3. In sintesi, la corretta definizione del focolare, sia in termini energetici sia geometrici, è essenziale per garantire la concreta rappresentatività dello scenario simulato e per poter valutare, in modo comparativo, l'efficacia di soluzioni progettuali antincendio alternative.
- **Condizioni al contorno:** Le condizioni al contorno rappresentano uno degli aspetti fondamentali nella definizione del modello fisico dell'incendio, in quanto descrivono le interazioni tra il dominio di calcolo e l'ambiente esterno o tra diverse porzioni del sistema modellato. In PyroSim, le condizioni al contorno sono impostate per ogni superficie del dominio (inclusi pavimenti, pareti, soffitti e aperture) e influenzano in modo diretto il comportamento dei gas, il trasferimento di calore e la ventilazione. Una delle condizioni più utilizzate è il "Open Boundary", che consente il libero ingresso o uscita di aria, fumi o calore, simulando l'apertura verso l'ambiente esterno (ad esempio finestre rotte, aperture in facciata, o griglie di aerazione). Altre condizioni possono includere pareti adiabatiche, superfici a temperatura imposta, oppure materiali reattivi soggetti a combustione o pirolisi. Le condizioni al contorno sono essenziali anche per simulare l'effetto della ventilazione naturale o forzata

può essere utile infatti specificare portate d'aria, direzioni del flusso, o la presenza di ventilatori con curve caratteristiche. Inoltre, è possibile definire condizioni al contorno mobili o dinamiche, come porte che si aprono al raggiungimento di una certa temperatura o pressione, o l'attivazione di dispositivi di sicurezza, come ad esempio nel modello trattato in questo documento per il quale attraverso l'utilizzo di device (sensori) e controlli è stato possibile simulare la rottura delle finestre al raggiungimento di un valore soglia. Una corretta definizione delle condizioni al contorno è cruciale per garantire realismo fisico all'interno di una simulazione.

- **Parametri di simulazione:** I parametri di simulazione costituiscono l'insieme delle impostazioni globali che regolano il comportamento numerico, temporale e fisico della simulazione in PyroSim/FDS. Questi parametri determinano come il modello viene calcolato, per quanto tempo e con quale livello di dettaglio. Tra i più importanti troviamo la durata della simulazione (Simulation Time), che definisce il tempo reale da simulare in secondi, e il time step numerico (variabile o fisso), che indica l'intervallo temporale tra due calcoli consecutivi. FDS utilizza un adaptive time step, che si adatta automaticamente per garantire la stabilità della soluzione, in funzione della velocità del flusso, della geometria e della dimensione della mesh. Altri parametri fondamentali includono la frequenza di salvataggio dei dati (Output Interval), che specifica ogni quanto tempo vengono salvati i risultati, e la frequenza dei file di visualizzazione (Slice File, Smokeview Output), che influisce sulla risoluzione temporale delle animazioni. È possibile inoltre attivare o disattivare determinati modelli fisici, come la radiazione, la combustione, il calcolo della visibilità o la produzione di CO/CO₂. Inoltre nella scheda ambiente è possibile modulare le condizioni ambientali iniziali, come temperatura, pressione, umidità ecc, nel caso di questo elaborato in alcuni scenari è stato analizzato il vento che in condizioni di incendio in facciata può comportare notevoli differenze nella propagazione dell'incendio.

Simulation Parameters
✕

Simulation Title:

Time
Output
Environment
Particles
Simulator
Radiation
Angled Geometry
Misc.

☐ Ambient Temperature:
 ☐ Ambient Pressure:
 ☐ Ambient Oxygen Mass Fraction:
 ☐ Ambient Carbon Dioxide Mass Fraction:
 ☐ Configure Wind
 ☐ Relative Humidity:
 ☐ Maximum Visibility:
 ☐ Visibility Factor:
 ☐ Specify Gravity

20.0 °C

1.01325E+5 Pa

0.232378 kg/kg

5.95E-4 kg/kg

Edit...

40.0 %

30.0 m

3.0

X:
Y:
Z:

Constant ▾

Constant ▾

Constant ▾

0.0 m/s²

0.0 m/s²

-9.81 m/s²

Figura 24 Esempio della scheda per la modulazione dei parametri ambientali [6]

pag. 43

4.2 Costruzione del modello geometrico e definizione dei parametri di input

In questo capitolo verrà illustrato tutto ciò che è stato necessario per la realizzazione del modello, sia a livello geometrico che a livello di parametri necessari per caratterizzare le simulazioni. Per la produzione di questo elaborato di tesi inizialmente era stato previsto un unico modello dell'edificio nella sua interezza all'interno del quale sarebbero state effettuate tutte le tipologie di simulazioni, ma già dalle prime simulazioni, nonostante l'ottimizzazione delle mesh e l'utilizzo della possibilità di lanciare le simulazioni con la funzione FDS parallel (che riduce notevolmente i tempi di calcolo in presenza di mesh multiple), si è notato da subito che i tempi per il completamento delle simulazioni risultava proibitivo, in quanto le proiezioni prospettavano un tempo di completamento di circa 220 giorni al termine delle oscillazioni iniziali che si verificano normalmente nelle prime ore dalla partenza di una simulazione. Si è dunque optato per la realizzazione di un ulteriore modello che fa riferimento a soli due piani dell'edificio, con il quale sono state effettuate tutte le tipologie di simulazioni, con vento e senza, mentre per l'edificio completo è stato realizzato un set di simulazioni in cui non è stato contemplato il vento, che risultava l'elemento più dispendioso a livello computazionale per il software.

4.2.1 Mesh

Intero edificio: In una prima fase, è stata testata una mesh uniforme a celle cubiche da $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ m su tutto l'edificio (*Figura 25*), con l'obiettivo di rappresentare fedelmente la geometria complessa della facciata. Tuttavia, il numero di celle risultante (8.578.384) ha comportato tempi di calcolo eccessivi, rendendo la simulazione impraticabile con le risorse disponibili.

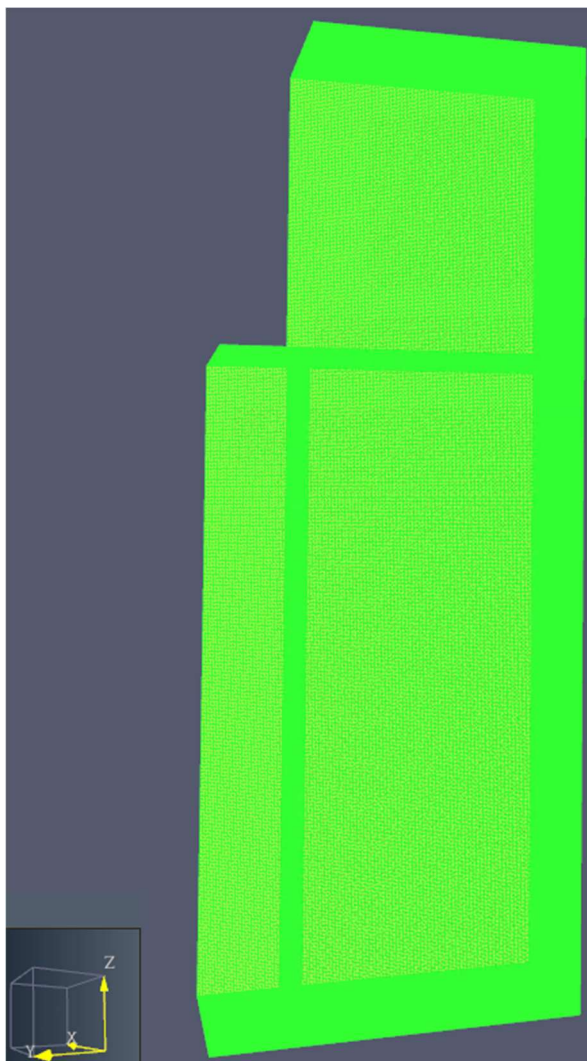


Figura 25 Mesh primo tentativo

Per ridurre l'onere computazionale, si è sperimentata una discretizzazione non uniforme, suddividendo il dominio in tre zone con risoluzioni differenti:

- zona ad alta risoluzione ($0,1 \times 0,1 \times 0,1$ m) in corrispondenza del focolare;
- zona intermedia ($0,2 \times 0,2 \times 0,2$ m) sulla porzione di facciata coinvolta dall'incendio;
- zona a bassa risoluzione ($0,4 \times 0,4 \times 0,4$ m) nel resto dell'edificio.

Questa soluzione (*Figura 26*) ha permesso di ridurre il numero di celle a 2.922.958, ma i tempi di calcolo sono risultati ancora troppo elevati per ottenere simulazioni complete in tempi accettabili.

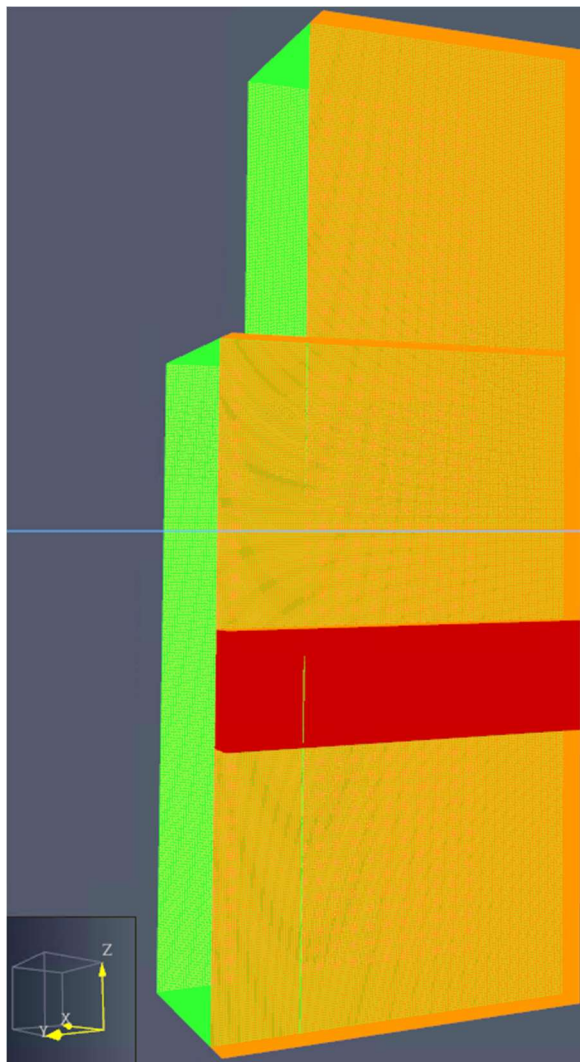


Figura 26 Mesh secondo tentativo

Di conseguenza, si è temporaneamente sospeso lo studio sull'edificio intero, avviando un lavoro di ottimizzazione a partire da un modello ridotto, illustrato nel paragrafo successivo. Grazie alle analisi condotte sul modello ridotto, è stato possibile identificare una configurazione mesh efficace, poi applicata anche al modello globale. La mesh finale è stata realizzata adottando:

- celle da $0,4 \times 0,4 \times 0,2$ m nella porzione inferiore della facciata;
- celle da $0,4 \times 0,4 \times 0,4$ m nella parte superiore dell'edificio;
- una riduzione del dominio di calcolo alla sola facciata coinvolta e a una fascia verticale contenente tutti i piani superiori al focolare e i tre piani inferiori.

Con questa configurazione si è ottenuto un numero complessivo di celle pari a 249.408, rientrando così nei limiti computazionali prefissati e mantenendo un buon livello di dettaglio nella zona critica per lo sviluppo dell'incendio (*Figura 27*).

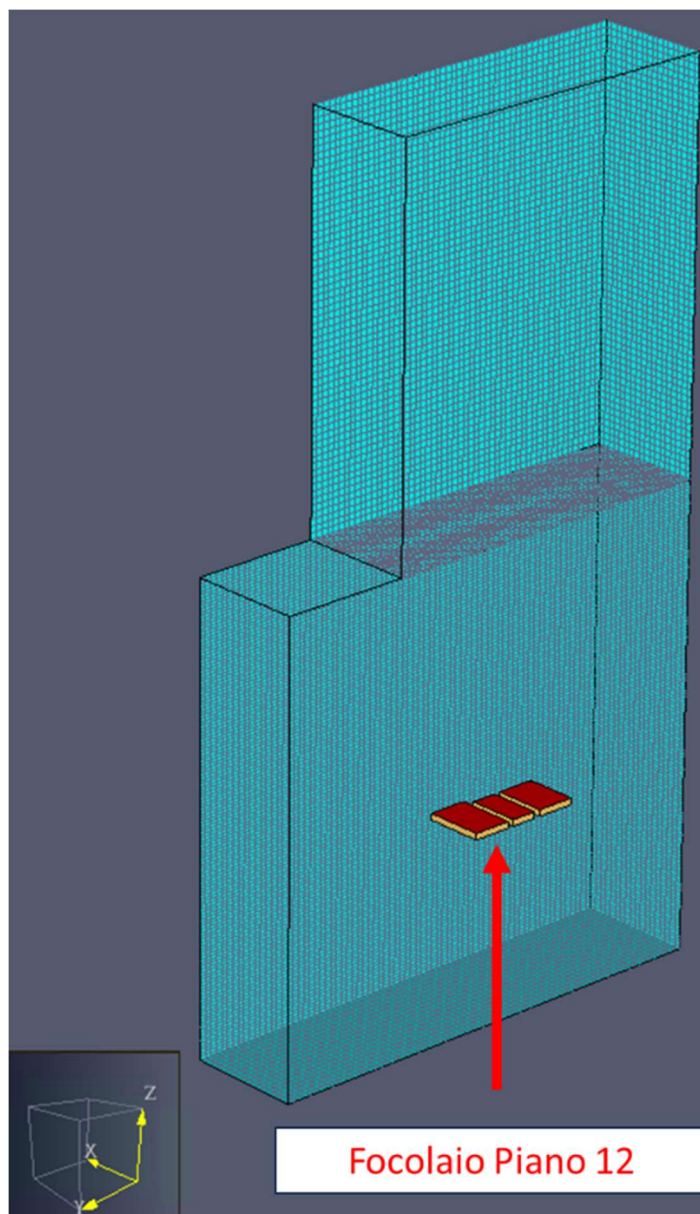


Figura 27 Soluzione definitiva

Modello a 2 piani: Per la fase iniziale di simulazione è stato sviluppato un modello ridotto a due piani, con l'obiettivo di testare configurazioni di mesh che potessero garantire tempi di calcolo accettabili mantenendo una buona risoluzione nella zona critica dell'incendio. La prima configurazione adottata prevedeva una mesh unica con celle regolari di dimensione $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ m, che discretizzava l'intero volume del modello ridotto. Tale configurazione generava 672.144 celle complessive,

comportando tuttavia una durata di simulazione stimata in circa 30 giorni (Figura 28), risultando quindi impraticabile per l'analisi.

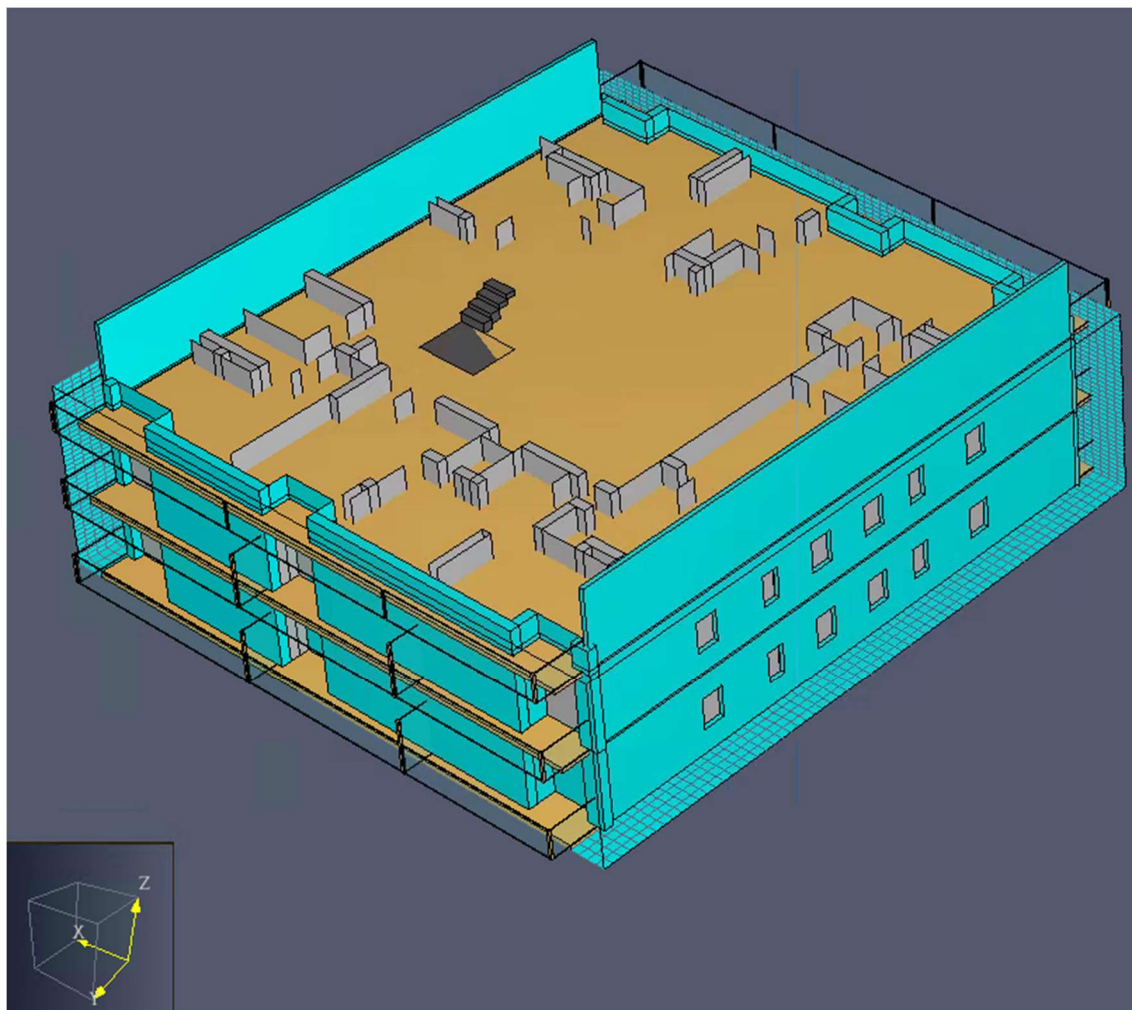


Figura 28 Mesh modello a 2 piani prima configurazione

Per migliorare l'efficienza computazionale, è stata adottata una strategia di mesh a risoluzione variabile, aumentando l'accuratezza verticale e riducendo quella in pianta. In particolare, sono state definite due zone:

- una mesh più dettagliata nella zona delle facciate, con celle da $0,4 \times 0,4 \times 0,2$ m;
- una mesh meno fitta per le aree più distanti dall'incendio, con celle da $0,4 \times 0,4 \times 0,4$ m.

Questa configurazione ha ridotto significativamente il numero di celle a 168.036, con una conseguente diminuzione dei tempi di calcolo a circa due settimane, pur mantenendo una rappresentazione coerente del fenomeno fisico (Figura 29).

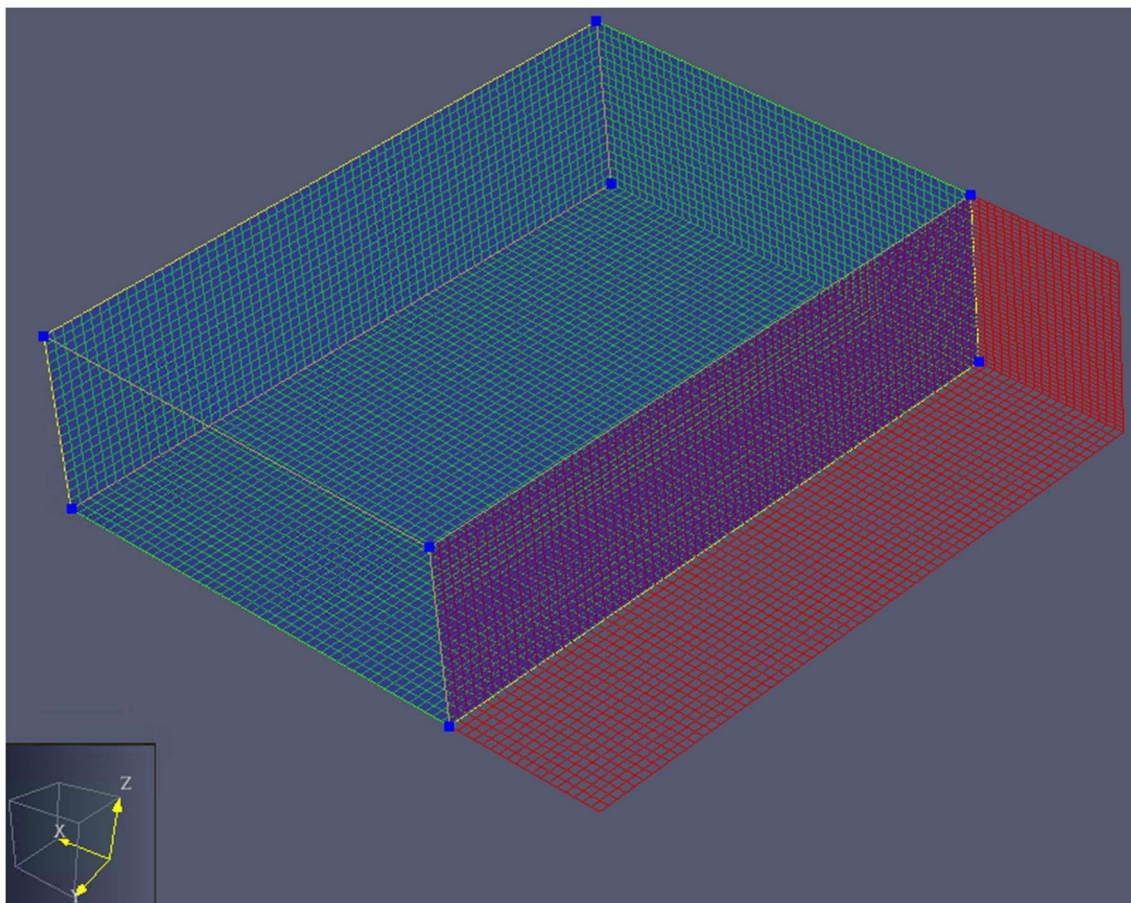


Figura 29 Mesh modello a 2 piani seconda configurazione

Il passaggio decisivo verso la configurazione definitiva è avvenuto con l'introduzione delle superfici "Layered", utilizzate per modellare i pannelli di facciata. Questo tipo di superficie, tuttavia, presenta una limitazione intrinseca nel software FDS: non può estendersi su più mesh. Di conseguenza, è stato necessario adottare una mesh unica e localizzata, che coprisse esclusivamente la zona della facciata direttamente colpita dall'incendio, con celle da $0,4 \times 0,4 \times 0,2$ m. Tale approccio ha consentito una drastica riduzione del numero di celle, scese a 45.144 (Figura 30).

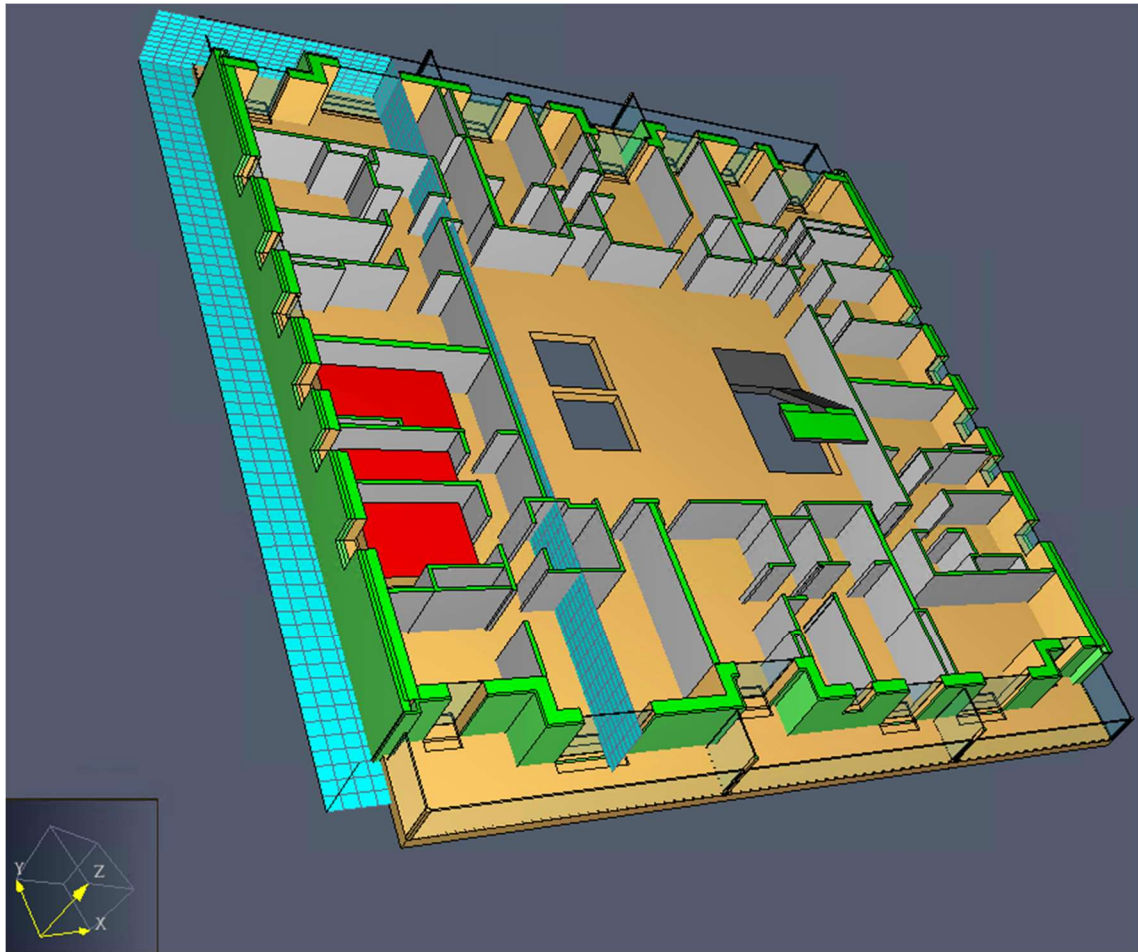


Figura 30 Mesh modello a 2 piani configurazione finale

Questa soluzione non solo ha permesso di ottimizzare i tempi di simulazione per il modello ridotto, ma ha anche reso fattibile l'applicazione della configurazione al modello dell'edificio intero, cosa che, con le configurazioni precedenti, sarebbe stata computazionalmente insostenibile.

4.2.2 Modellazione geometrica

La modellazione geometrica è avvenuta tutta all'interno dell'ambiente di lavoro di Pyrosim, essendo disponibili piante e sezioni CAD, si è proceduto con l'importazione di questi ultimi all'interno del software e con l'utilizzo dei comandi di modellazione (*Figura 31*) si è ricostruito interamente ogni dettaglio della struttura.



Figura 31 Comandi di modellazione geometrica

In particolare sono stati utilizzati il comando Wall per la realizzazione di tutti gli elementi verticali e per le rampe delle scale, il comando Slab per la realizzazione degli elementi con sviluppo orizzontale e il comando Hole per la realizzazione delle aperture delle finestre. Con questo procedimento è stato possibile realizzare l'intero corpo del fabbricato che inizialmente è stato modellato anche con la sezione dedicata ai 2 piani interrati. (*Figura 32*)

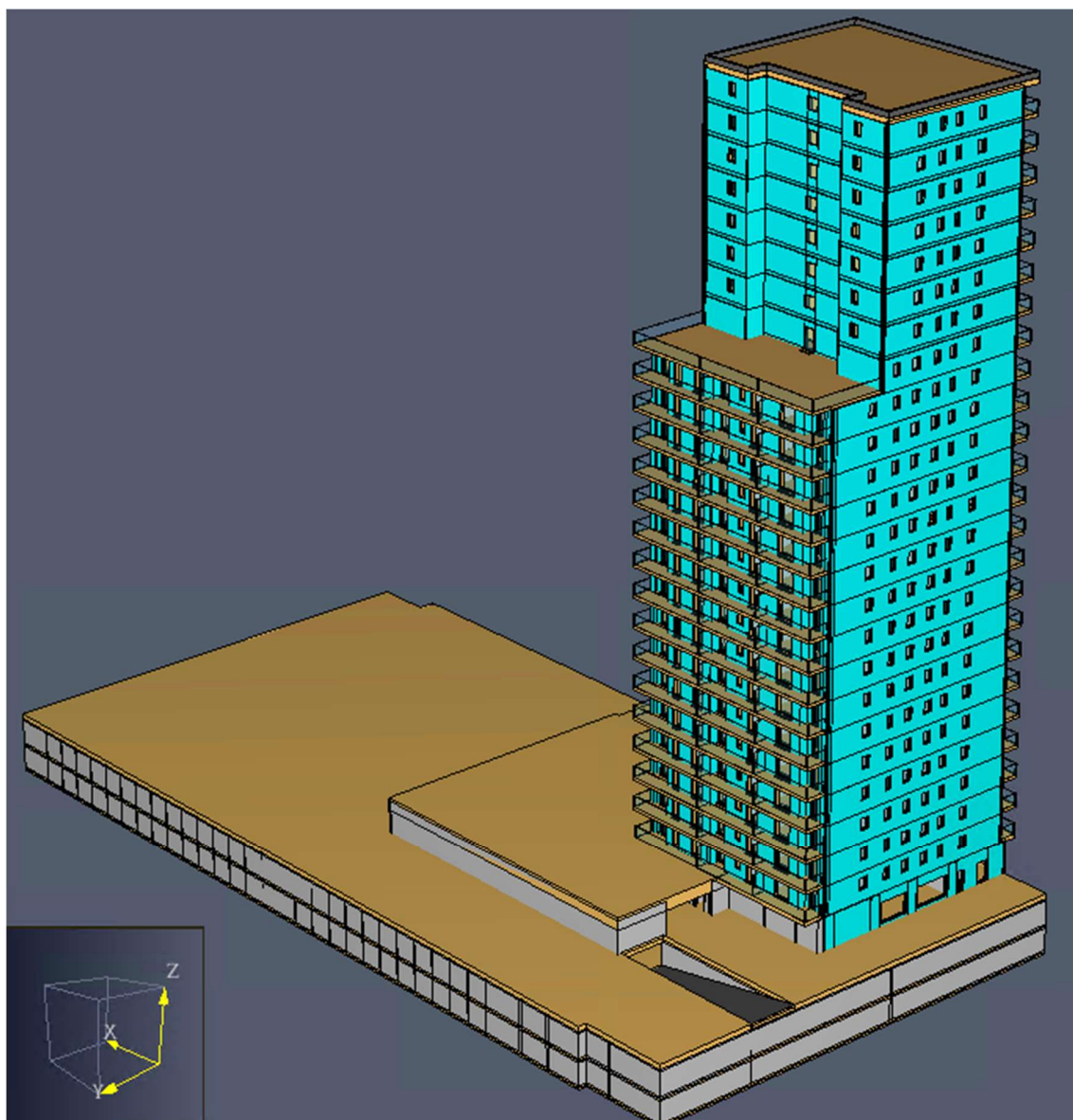


Figura 32 Modello geometrico

4.2.3 Caratterizzazione dell'involucro e dell'incendio

Si è proseguito con il lavoro con la ricerca dei materiali da utilizzare per la caratterizzazione dell'involucro. A tal proposito sono state indispensabili le informazioni contenute nell'articolo: *"Fire Performance of EPS ETICS Facade: Effect of Test Scale and Masonry Cover"*, all'interno del quale sono state reperite tutte le informazioni necessarie per la caratterizzazione dei 2 materiali principali di questo caso studio, l'ETICS e l'EPS. L'articolo analizza il comportamento al fuoco delle facciate isolate con sistemi ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems) a base di EPS (polistirene espanso sinterizzato), concentrandosi in particolare su due fattori: la scala del test di prova (piccola, media o grande) (Figura 33). Gli autori mostrano come la scala del test influenzi in modo significativo i risultati. Nei test su piccola scala (come quelli condotti con il cone calorimeter), si osservano picchi di calore rilasciato molto elevati, ma questi non riflettono fedelmente il comportamento che si verifica su una facciata reale. Infatti, nei test su scala più grande, le dinamiche di propagazione delle fiamme, fusione del materiale e ventilazione cambiano completamente, portando a valori molto più contenuti di rilascio di calore.

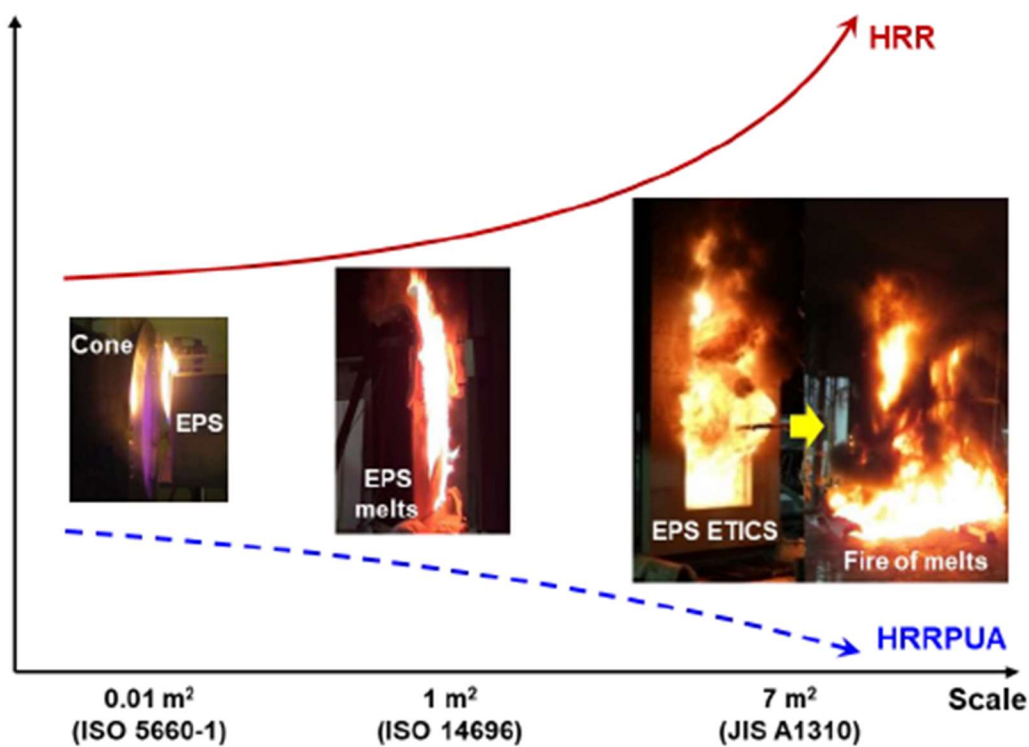


Figura 33 Influenza della grandezza del provino sulle caratteristiche [7]

Da questo articolo sono quindi state individuate le principali caratteristiche dei materiali usati nel modello, i valori utilizzati corrispondono ai risultati sui provini di grande scala, circa 7 m^2 , che come spiegato nell'articolo risultano conservativi se applicati al nostro caso studio con dimensioni notevolmente maggiori.

Curva RHR: nel modello oggetto di studio sono state utilizzate 2 curve RHR, la prima per i pannelli ETICS (Figura 34), la seconda per i pannelli in EPS (Figura 35), mentre non è stato necessario utilizzare una curva RHR per la caratterizzazione del focolare iniziale, in quanto per ridurre i tempi di simulazione si è deciso di modellare un incendio che già dal primo istante si trova nella condizione di flashover, non essendo lo sviluppo dell'incendio nell'appartamento di interesse per gli obiettivi della tesi. Le curve sono state estrapolate dalle immagini attraverso "Engauge Digitizer", un software convertitore di immagini in dati, attraverso i dati raccolti si è potuto dedurre le frazioni da poter inserire in seguito in Pyrosim per caratterizzare il modello.

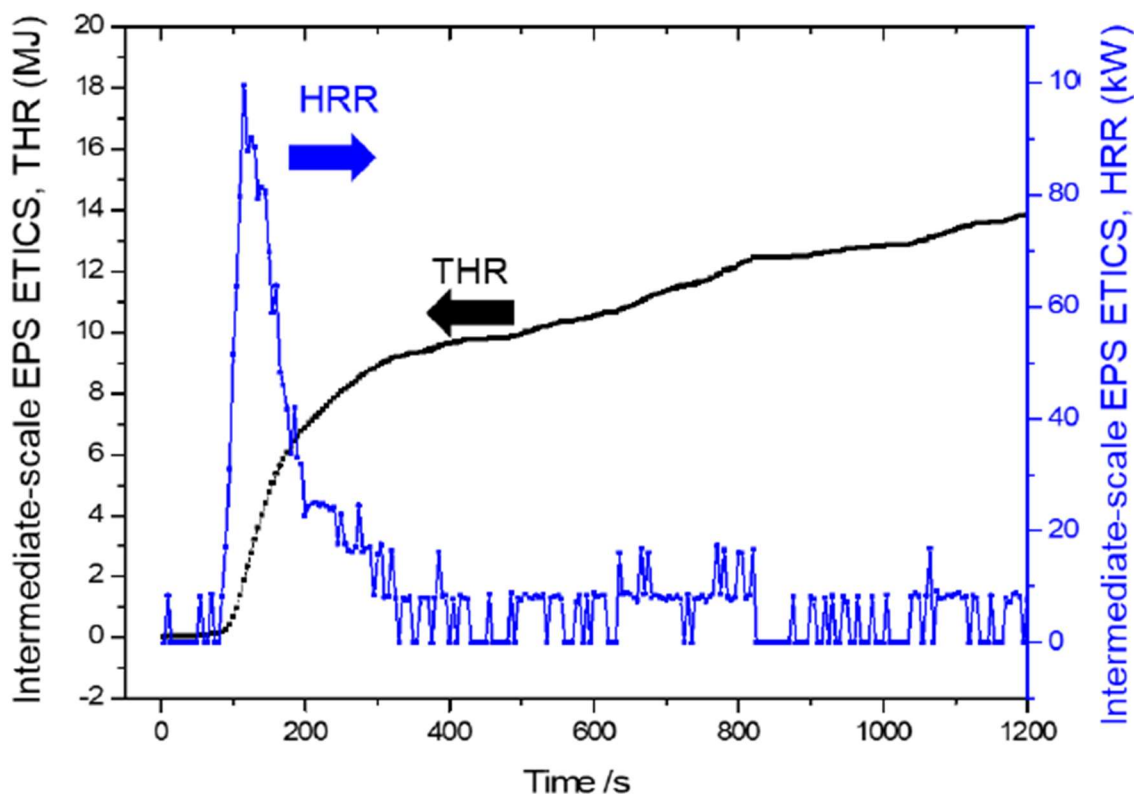


Figura 34 Curva RHR ETICS [7]

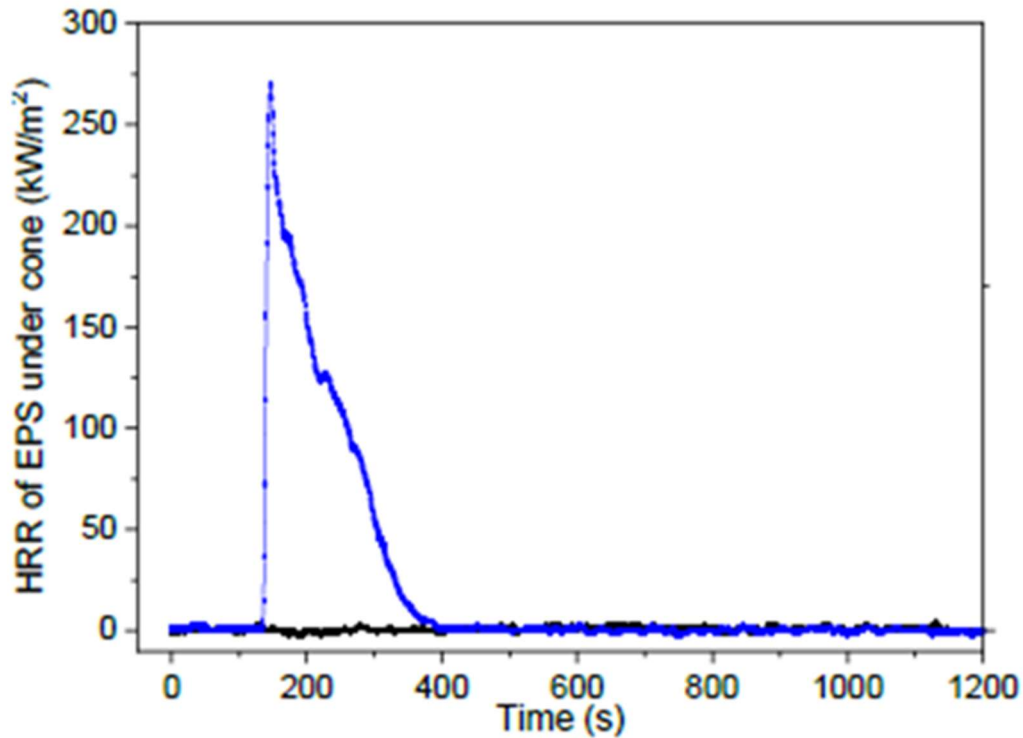


Figura 35 Curva RHR EPS [7]

HRRPUA: il valore di HRRPUA (o più correttamente HRRPUA, Heat Release Rate per Unit Area) rappresenta il tasso di rilascio di calore per unità di superficie, ed è una delle grandezze fondamentali nella valutazione del comportamento al fuoco dei materiali. È una misura diretta della “potenza dell’incendio” sviluppata da un materiale in relazione alla sua superficie. Più è alto il valore di HRRPUA:

- più rapidamente il materiale contribuisce al fuoco;
- maggiore è il carico termico fornito all’ambiente circostante;
- più intenso e pericoloso sarà l’incendio.

Tali valori anche in questo caso sono stati reperiti dal medesimo articolo (Figura 36).

Table 2. The HRR and HRRPUA of small, intermediate, and large fire tests with vertical EPS ETICS.

Parameter	Small scale (0.01 m ²)	Intermediate scale (1 m ²)	Large scale facade (7-m ²)	
	EPS ETICS	EPS ETICS	EPS ETICS	EPS ETICS (w/ barrier)
pHRR [#] (kW)	1.21	100	500	1090
pHRRPUA* (kW/m ²)	137	100	76	165

[#]The HRR contribution from the gas burner is subtracted.

*The small-scale EPS size is 94 mm × 94 mm; the large-scale EPS size is 6.6 m² and 5.9 m² (with fire barrier).

Figura 36 Valori di HRRPUA per ETICS e EPS [7]

Di seguito sono riportate le ulteriori caratteristiche assegnate ai materiali:

☐ Governed by Material
☒ Governed Manually

Heat Release

☒ Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 32,0 kW/m²
☐ Mass Loss Rate: 0,0 kg/(m²·s)
 Ramp-Up Time: Custom Edit Values...
 Extinguishing Coefficient: 0,0 m²/(kg·s)

Ignition

☐ Burn Immediately
☒ Ignite at: 300,0 °C
☐ Heat of Vaporization: 0,0 kJ/kg

☒ Allow obstruction to burn away

&SURF ID='Facciata ETICS', RGB=102,255,102, TEXTURE_MAP='psm_carpet_blue.jpg',
 TEXTURE_WIDTH=0.6096, TEXTURE_HEIGHT=0.6096, HRRPUA=32.0, RAMP_Q='Facciata ETICS_RAMP_Q',
 IGNITION_TEMPERATURE=300.0, BURN_AWAY=.TRUE., MATL_ID(1,1)='EPS',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0, THICKNESS(1)=0.1/

Figura 37 Caratteristiche assegnate alla superficie layered dedicata all'ETICS

☐ Governed by Material
☒ Governed Manually

Heat Release

☒ Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 165,0 kW/m²
☐ Mass Loss Rate: 0,0 kg/(m²·s)
 Ramp-Up Time: Custom Edit Values...
 Extinguishing Coefficient: 0,0 m²/(kg·s)

Ignition

☐ Burn Immediately
☒ Ignite at: 240,0 °C
☐ Heat of Vaporization: 0,0 kJ/kg

☒ Allow obstruction to burn away

&SURF ID='Facciata EPS', COLOR='CYAN', TEXTURE_MAP='psm_carpet.jpg', TEXTURE_WIDTH=0.9144,
 TEXTURE_HEIGHT=0.9144, HRRPUA=165.0, RAMP_Q='Facciata EPS_RAMP_Q',
 IGNITION_TEMPERATURE=240.0, BURN_AWAY=.TRUE., MATL_ID(1,1)='EPS',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0, THICKNESS(1)=0.1/

Figura 38 Caratteristiche assegnate alla superficie layered dedicata all'EPS

Ramping Function Values

Function Input: Time

	Time (s)	Fraction
6	99,83	0,429163
7	101,0	0,5152
8	104,67	0,632678
9	108,3	0,791523
10	109,47	0,879207
11	109,54	0,822964
12	113,14	1,0
13	118,32	0,918976
14	124,69	0,894205
15	133,67	0,816516
16	145,1	0,811625

Insert Row
 Remove Row
 Move Up
 Move Down
 Copy
 Paste
 Cut

Figura 39 Rappresentazione parziale delle frazioni di curva inserite in Pyrosim per l'ETICS

Ramping Function Values

Function Input: Time

	Time (s)	Fraction
1	1,4	-1,753614E-3
2	1,41	1,749882E-3
3	53,42	5,178757E-3
4	82,92	5,133984E-3
5	96,99	0,010369
6	111,11	0,027864
7	132,29	0,054108
8	136,64	0,090889
9	136,82	0,138185
10	137,7	0,371158
11	140,07	0,255543

Insert Row
 Remove Row
 Move Up
 Move Down
 Copy
 Paste
 Cut

Figura 40 Rappresentazione parziale delle frazioni di curva inserite in Pyrosim per l'EPS

Density:		80,0 kg/m ³
Specific Heat	Constant ▾	1,0 kJ/(kg·K)
Conductivity	Constant ▾	0,1 W/(m·K)
Emissivity:		0,9
Absorption Coefficient:		5,0E+4 1/m

Figura 41 Caratteristiche assegnate al materiale ETICS

Density:		34,0 kg/m ³
Specific Heat	Constant ▾	1,442 kJ/(kg·K)
Conductivity	Constant ▾	0,022 W/(m·K)
Emissivity:		0,9
Absorption Coefficient:		5,0E+4 1/m

Figura 42 Caratteristiche assegnate al materiale EPS

Si può notare che i due materiali hanno temperatura di ignizione differente, 240 °C per l'EPS e 300°C per l'ETICS, sono da valutarsi entrambe due temperature cautelative ai fini delle simulazioni.

Altri materiali utilizzati: sono stati modellati per completezza anche:

- La lana di roccia: utilizzata per la realizzazione delle fasce di separazione e gli sporti;
- Il vetro: utilizzato per la realizzazione delle finestre

Con le seguenti caratteristiche:

Density:		128,0 kg/m ³
Specific Heat	Constant ▾	1,04 kJ/(kg·K)
Conductivity	Custom ▾	Edit table...
Emissivity:		0,97
Absorption Coefficient:		5,0E+4 1/m

Figura 43 Caratteristiche assegnate al materiale Lana di roccia

Density:		2225,0 kg/m ³
Specific Heat	Constant ▾	0,835 kJ/(kg·K)
Conductivity	Constant ▾	1,4 W/(m·K)
Emissivity:		0,89
Absorption Coefficient:		5,0E+4 1/m

Figura 44 Caratteristiche assegnate al materiale Vetro

Incendio primario: come accennato nel paragrafo dedicato alle curve RHR, per l'incendio di primo innesco è stata effettuata una semplificazione (l'incendio inizia già in una condizione generalizzata) al fine di ridurre i tempi di simulazione al minimo, risultando lo sviluppo del focolare primario all'interno dell'edificio ininfluente ai fini della verifica della propagazione dell'incendio in facciata. Questa semplificazione ha portando ad un risparmio approssimativo di circa 15-20 minuti di simulazione, che considerando la complessità del modello avrebbero richiesto al software almeno 3 giorni per ogni scenario per essere elaborati. Le altre caratteristiche riguardanti la superficie Burner sono state assunte seguendo le indicazioni del Codice di prevenzione incendi per quanto riguarda il focolare predefinito, nella sezione M2.7 (Figura 45).

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_e	150 s (<i>fast</i>)	75 s (<i>ultra-fast</i>)
RHR _{max} totale RHR _{max} per m ² di superficie del focolare	5 MW 250-500 kW/m ² [1]	50 MW 500 -1000 kW/m ² [1]
Resa in particolato Y _{soot}	Pre flashover: 0,07 kg/kg [2,3] Post flashover: 0,14 kg/kg [2,3]	Pre flashover: 0,18 kg/kg [4] Post flashover: 0,36 kg/kg [4]
Resa in monossido di carbonio Y _{CO}	Pre flashover: 0,10 kg/kg [5] Post flashover: 0,40 kg/kg [5]	
Calore di combustione effettivo ΔH _c	20 MJ/kg [3]	
Resa in biossido di carbonio Y _{CO2}	1,5 kg/kg [3,6]	
Resa in acqua Y _{H2O}	0,82 kg/kg [3,6]	
Frazione di RHR in irraggiamento (Radiative fraction)	35% [3]	

[1] Da impiegare in alternativa all'RHR_{max} totale, considerando la massima superficie del focolare, pari al compartimento antincendio nel caso di carico di incendio uniformemente distribuito, ma che può essere un valore inferiore nel caso d'incendio localizzato.

[2] Robbins A P, Wade C A, Study Report no 185 "Soot Yield Values for Modelling Purposes - Residential Occupancies", BRANZ, 2008

[3] "CVM2 Verification method: Framework for fire safety design", New Zealand Building Code

[4] "SFPE handbook of fire protection engineering", NFPA, 4th ed., 2008. Tabella 3-4.16, pag. 3-142, da polyurethane flexible foams.

[5] Stec AA, Hull T R, "Fire Toxicity", Woodhead Pub., 2010. § 2.4 con Φ = 1,25 (*underventilated fire*)

[6] In alternativa alle rese Y_{CO2} e Y_{H2O}, si può imporre nel codice di calcolo il combustibile generico CH₂O_{0,5}.

Figura 45 Focolare predefinito Codice di prevenzione incendi [5]

Il codice dunque prevede un incendio per attività civili di 5MW, che per una resa più realistica può essere distribuito, la scelta effettuata nel corso della modellazione è stata quella di ripartire il focolare su 20 m² (superficie interna di tre locali confinanti tra loro nello stesso appartamento) assegnando un HRRPUA di 250 kW/m² in modo da raggiungere i 5MW consigliati dalla normativa (Figura 46).

Heat Release

☒ Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 250,0 kW/m²

☐ Mass Loss Rate: 0,0 kg/(m²·s)

Ramp-Up Time: Default 1,0 s

Extinguishing Coefficient: 0,0 m²/(kg·s)

Figura 46 Caratteristiche del focolare primario

Il focolare è stato posizionato nella stessa posizione sia nelle simulazioni dell'intero edificio che in quelle dei soli due piani, precisamente nelle tre camere centrali rispetto alla facciata collocate al piano 12 (Figura 47).



Figura 47 Vista in prospettiva e in pianta del posizionamento del focolare

4.2.4 Device e controlli

In questo lavoro di tesi sono stati utilizzati i device di FDS sia per simulare la rottura delle superfici vetrate attraverso i controlli (comandi disponibili all'interno di Pyrosim), sia per monitorare l'andamento delle temperature all'interno degli appartamenti appartenenti ad altri compartimenti (*Figura 46*). L'obiettivo era valutare se lo sviluppo dell'incendio lungo la facciata potesse determinare condizioni tali da innescare focolai secondari nei piani superiori o adiacenti andando ad annullare la misura di compartimentazione imposta dal codice per questo tipo di edificio facendo riferimento alle sezioni S.3, V13 e V14. Questo tipo di dinamica è infatti ricorrente in diversi casi di incendio significativi che hanno coinvolto le chiusure d'ambito, già analizzati nei capitoli introduttivi del presente elaborato.

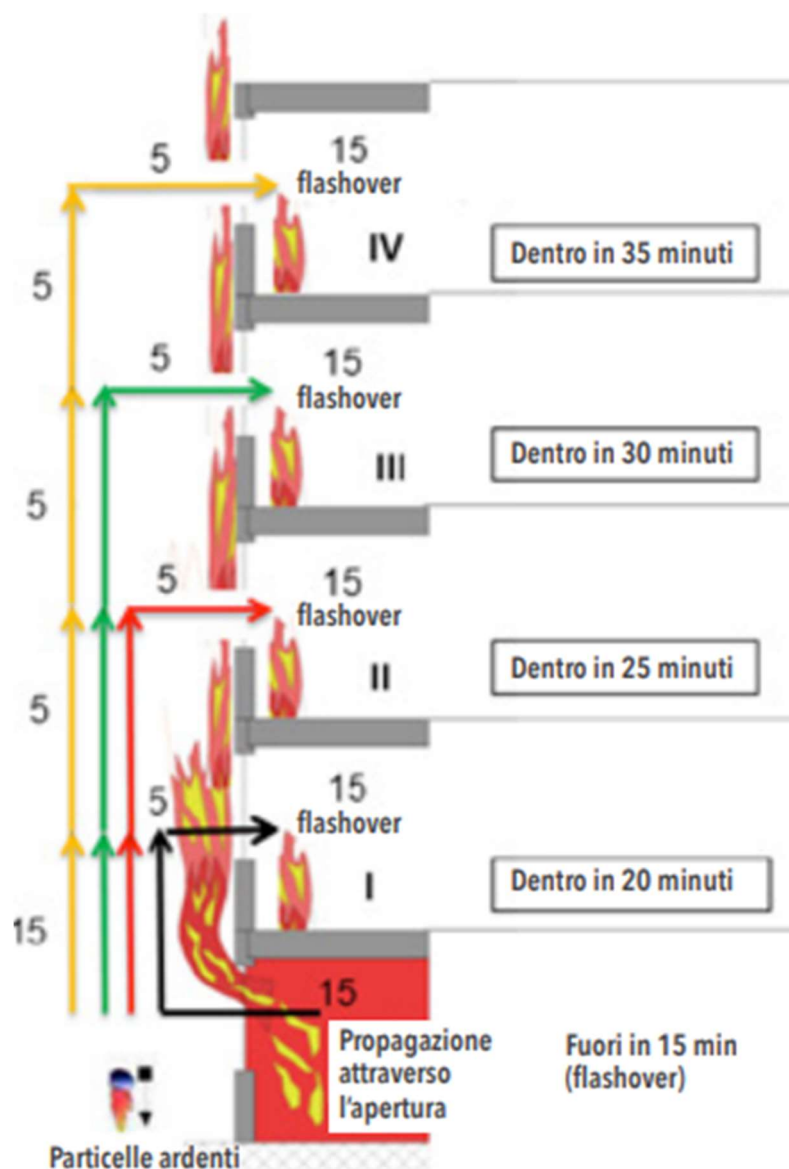


Figura 48 Propagazione dell'incendio in facciata ad altri compartimenti [8]

Per caratterizzare la rottura del vetro sono state effettuate delle ricerche in letteratura che hanno portato a focalizzare l'attenzione su due articoli in particolare:

- Lo studio di Pagni e Joshi affronta il comportamento del vetro in condizioni di incendio, concentrandosi sui meccanismi che determinano la rottura delle superfici vetrate. Gli autori analizzano il fenomeno dal punto di vista termico e meccanico, evidenziando come la differenza di temperatura tra il centro del vetro (che si riscalda più velocemente) e i bordi (ancora relativamente freddi) generi stress termici che, se superiori alla resistenza a trazione del materiale, provocano la rottura. Questo comportamento è descritto attraverso un modello numerico basato sulle equazioni del trasferimento di calore e della meccanica dei solidi. I risultati dello studio mostrano che, per il vetro comune non temprato, la rottura può avvenire anche per differenze di temperatura comprese tra 40 e 100 °C, corrispondenti a temperature del centro vetro intorno a 120–150 °C, mentre i bordi rimangono più freddi. [9]
- Lo studio condotto da Dembele analizza il fenomeno della rottura del vetro in ambienti soggetti a incendio, concentrandosi in particolare sui parametri che influenzano l'insorgenza della rottura per cause termiche. Tra i fattori analizzati, la temperatura di rottura del vetro risulta essere una variabile dipendente non solo dalle condizioni ambientali, ma anche dalle caratteristiche fisiche e geometriche del vetro stesso. In condizioni tipiche si osserva che:
 - La temperatura alla quale si verifica il principio di rottura del vetro varia generalmente tra 150 °C e 300 °C, a seconda del tipo di vetro e delle condizioni di vincolo.
 - Il gradiente termico tra il centro e i bordi del vetro gioca un ruolo cruciale: una differenza di temperatura elevata può generare forti tensioni interne, accelerando il cedimento.
 - Vetri vincolati rigidamente nei telai tendono a rompersi a temperature inferiori, poiché non possono espandersi liberamente.
 - La massa del vetro e il suo spessore influiscono anch'essi: vetri più spessi resistono più a lungo ma possono accumulare più energia prima del cedimento.
 - Le condizioni al contorno come presenza di ombreggiature, isolamento del telaio o esposizione non uniforme al flusso termico influenzano significativamente il momento della rottura. [10]
 -

Alla luce di quanto emerso dalla lettura degli articoli si è valutato di impostare la temperatura a cui il device fa scattare la rottura attraverso il controllo a 200°C, in quanto il device registra la temperatura dell'aria che sarà sicuramente maggiore rispetto a quella del vetro, quindi risulta un valore cautelativo rispetto a quello riportato negli articoli. Infine si è deciso di non far comparire nel modello le finestre dei locali in cui l'incendio ha il suo avvio, in accordo con la scelta di modellare l'incendio primario già in fase di flashover, risulterebbe quindi superfluo l'inserimento delle finestre di quei locali.

Gas-phase Device

Properties | Advanced

Name: Temp Finestra P1 Ovest 01

Tags:

Freeze Output: <Never>

Quantity: Temperature

☒ Enable Setpoint: 200,0 °C

☒ Trigger only once

☐ Initially activated

Trip Direction: Ascending

Location X: -46,2 m Y: 27,1 m Z: 47,41 m

Orientation X: 0,0 Y: 0,0 Z: -1,0

Rotation: 0,0 °

&DEVIC ID='Temp Finestra P1 Ovest 01', QUANTITY='TEMPERATURE',
XYZ=-46.2,27.1,47.41, SETPOINT=200.0/

OK Cancel

Figura 49 Esempio di Device posizionati davanti alle finestre con direzione verso il basso per il controllo dell'esplosione

Gas-phase Device

Properties | Advanced

Name: Temp Interna P1 Ovest 01

Tags:

Freeze Output: <Never>

Quantity: Temperature

☐ Enable Setpoint: 0,0 °C

☒ Trigger only once

☐ Initially activated

Trip Direction: Ascending

Location X: -44,4 m Y: 27,1 m Z: 47,41 m

Orientation X: -1,0 Y: 0,0 Z: 0,0

Rotation: 0,0 °

&DEVIC ID='Temp Interna P1 Ovest 01', QUANTITY='TEMPERATURE',
XYZ=-44.4,27.1,47.41, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

OK Cancel

Figura 50 Esempio di Device posizionati davanti alle finestre con direzione verso l'esterno per il controllo temperatura interna all'edificio

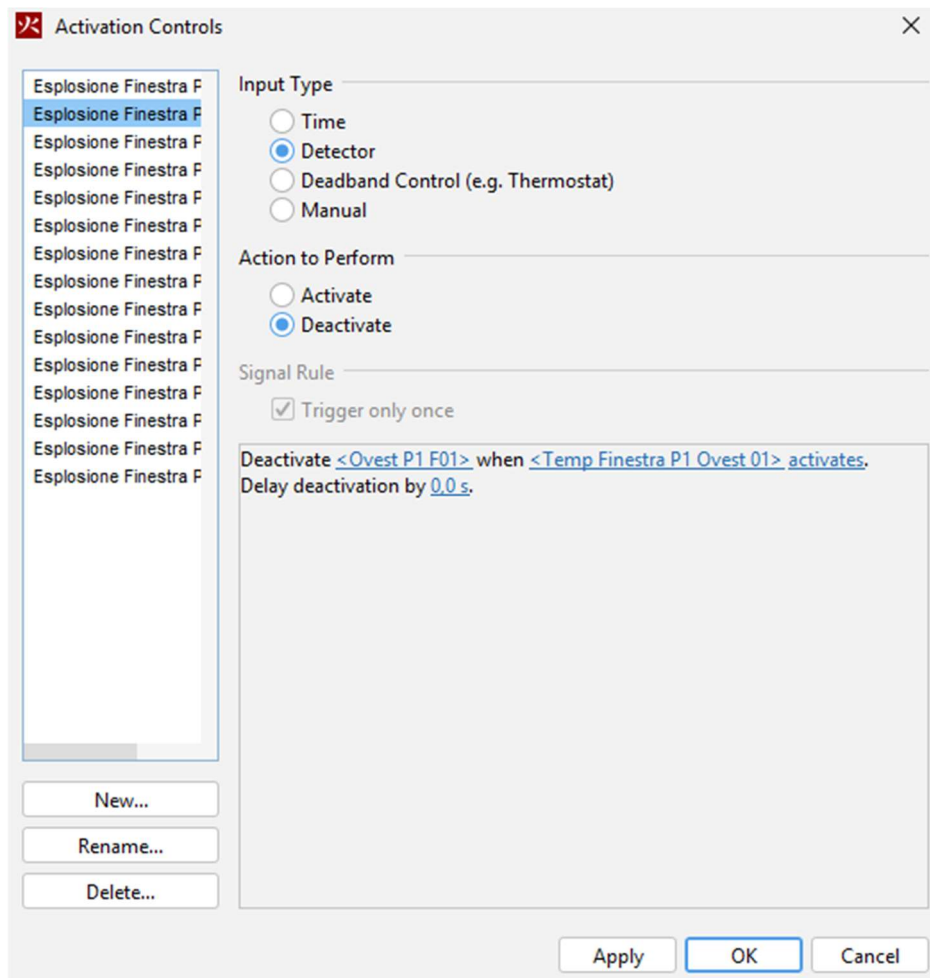
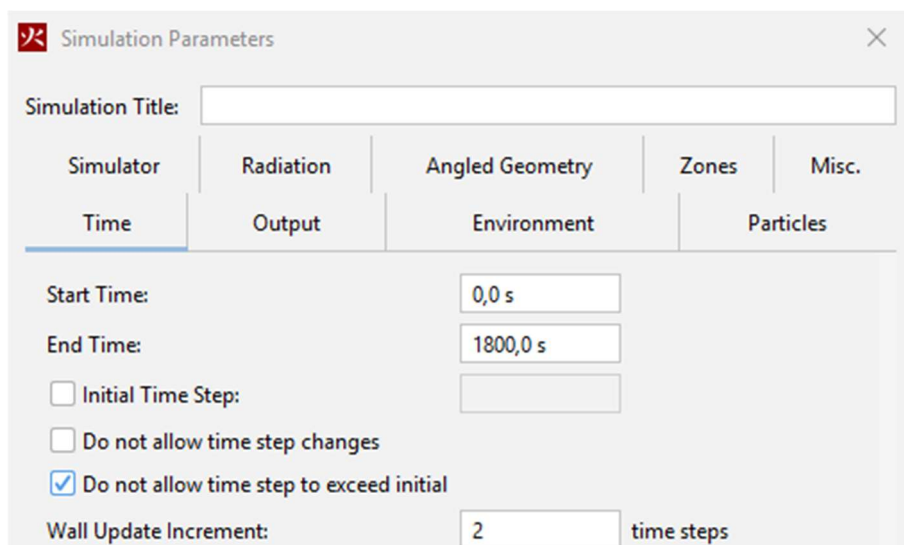


Figura 51 Esempio di impostazione dei controlli utilizzati per simulare l'esplosione delle finestre

4.2.5 Definizione dei parametri di simulazione

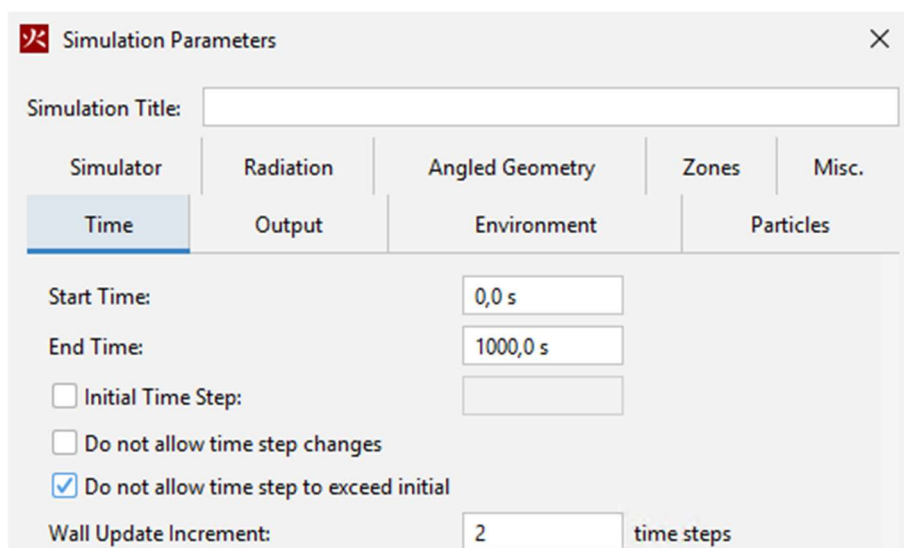
In linea con l'approccio di ridurre i tempi di simulazione sono stati settati i tempi di simulazione differenti per il modello a 2 piani (1800 secondi) (*Figura 52*) e per quello a edificio intero (1000 secondi) (*Figura 53*). Mentre l'intervallo di scrittura dei file di output è stato tenuto comune ad entrambe i modelli (*Figura 54*).



The screenshot shows the 'Simulation Parameters' dialog box with the 'Time' tab selected. The 'Start Time' is set to 0,0 s and the 'End Time' is set to 1800,0 s. The 'Wall Update Increment' is set to 2 time steps. The 'Do not allow time step to exceed initial' checkbox is checked.

Simulation Title:				
Simulator	Radiation	Angled Geometry	Zones	Misc.
Time	Output	Environment	Particles	
Start Time:	0,0 s			
End Time:	1800,0 s			
☐ Initial Time Step:				
☐ Do not allow time step changes				
☒ Do not allow time step to exceed initial				
Wall Update Increment:	2		time steps	

Figura 52 Durata simulazione modello a 2 piani



The screenshot shows the 'Simulation Parameters' dialog box with the 'Time' tab selected. The 'Start Time' is set to 0,0 s and the 'End Time' is set to 1000,0 s. The 'Wall Update Increment' is set to 2 time steps. The 'Do not allow time step to exceed initial' checkbox is checked.

Simulation Title:				
Simulator	Radiation	Angled Geometry	Zones	Misc.
Time	Output	Environment	Particles	
Start Time:	0,0 s			
End Time:	1000,0 s			
☐ Initial Time Step:				
☐ Do not allow time step changes				
☒ Do not allow time step to exceed initial				
Wall Update Increment:	2		time steps	

Figura 53 Durata simulazione modello edificio intero

Option	Interval
☒ Boundary:	2,0 s
☐ Device:	
☐ Heat Release Rate:	
☒ Isosurface:	2,0 s
☐ Particles:	
☐ Profile:	
☒ Restart:	300,0 s
☐ 2D Slice:	
☒ 3D Slice:	2,0 s
☐ HVAC:	

Figura 54 Intervallo di scrittura dei file di output

Per quanto riguarda i file di output oltre a i device descritti in precedenza sono state inserite Slice di temperatura a cadenza regolare per monitorare sia lungo l'asse z sia perpendicolarmente la temperatura in prossimità della facciata (Figura 55). Mentre i risultati più rilevanti sono stati ottenuti dall'inserimento tra i file di output delle Boundaries, che rappresentano un limite fisico o virtuale del dominio di calcolo, in corrispondenza del quale vengono monitorate specifiche condizioni fisiche.

Nello specifico sono state inserite le seguenti Boundaries:

- Burning Rate: rappresenta una superficie su cui avviene la combustione di un materiale solido o stratificato.
- Incident Heat Flux: rappresenta il flusso termico incidente su una superficie, ovvero la quantità di energia termica che arriva su un punto o area della superficie a causa dell'irraggiamento (radiazione termica), della convezione o di entrambi.
- Wall Temperature: rappresenta la temperatura superficiale di una parete o, in generale, di una qualsiasi superficie solida del modello. In FDS, questa temperatura viene calcolata dinamicamente in funzione dello scambio termico con i gas circostanti, dell'esposizione al calore radiante e alla convezione, e delle proprietà termiche del materiale (conducibilità, capacità termica, densità).

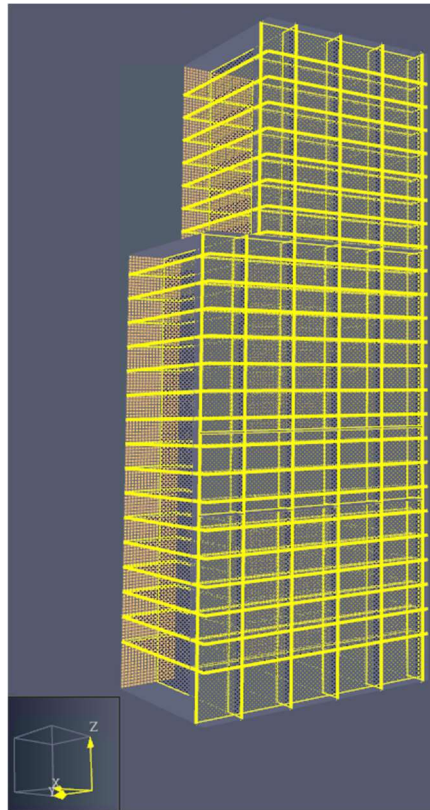


Figura 55 Distribuzione Slice

L'ultimo aspetto da trattare nella definizione dei parametri di simulazione sono le condizioni ambientali (Figura 56), che nel caso oggetto di studio sono state considerate tutte in condizioni standard (temperatura iniziale dell'aria, pressione, umidità ecc), l'unica che è stata considerata variabile è stato il vento, tramite il quale si sono delineati i set di simulazioni che verranno poi illustrati nel paragrafo seguente dedicato agli scenari.

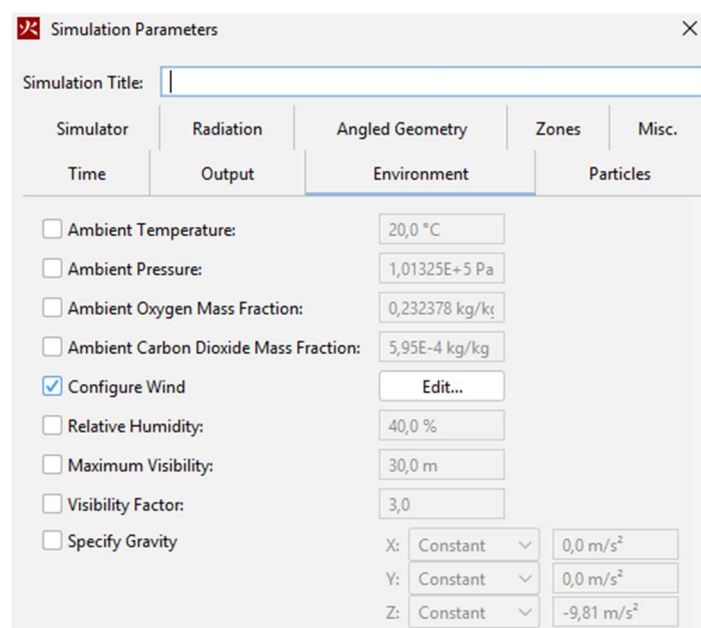


Figura 56 definizione delle condizioni ambientali

4.3 Definizione degli scenari d'incendio

Pyrosim consente al suo interno di definire direttamente al suo interno gli scenari differenti per cui un modello verrà testato, questo permette di poter avere un solo modello per più scenari e non un modello per ogni scenario, ciò risulta utile per un significativo risparmio di memoria di archiviazione del sistema, soprattutto quando i modelli sono particolarmente importanti come dimensioni. Inoltre riduce notevolmente l'ingombro sulla memoria RAM durante lo svolgimento di più simulazioni contemporaneamente avendo un singolo modello aperto per n simulazioni e non n modelli aperti contemporaneamente per eseguire n simulazioni. Per utilizzare gli scenari è stato sufficiente modellare sovrapposti gli elementi che si differenziavano tra gli scenari (come ad esempio le facciate realizzate in EPS e quelle in ETICS) e in seguito quando sono stati definiti gli scenari da verificare sono stati abilitati/disabilitati gli elementi necessari per lo svolgimento della simulazione dello scenario specifico (Figura 57).

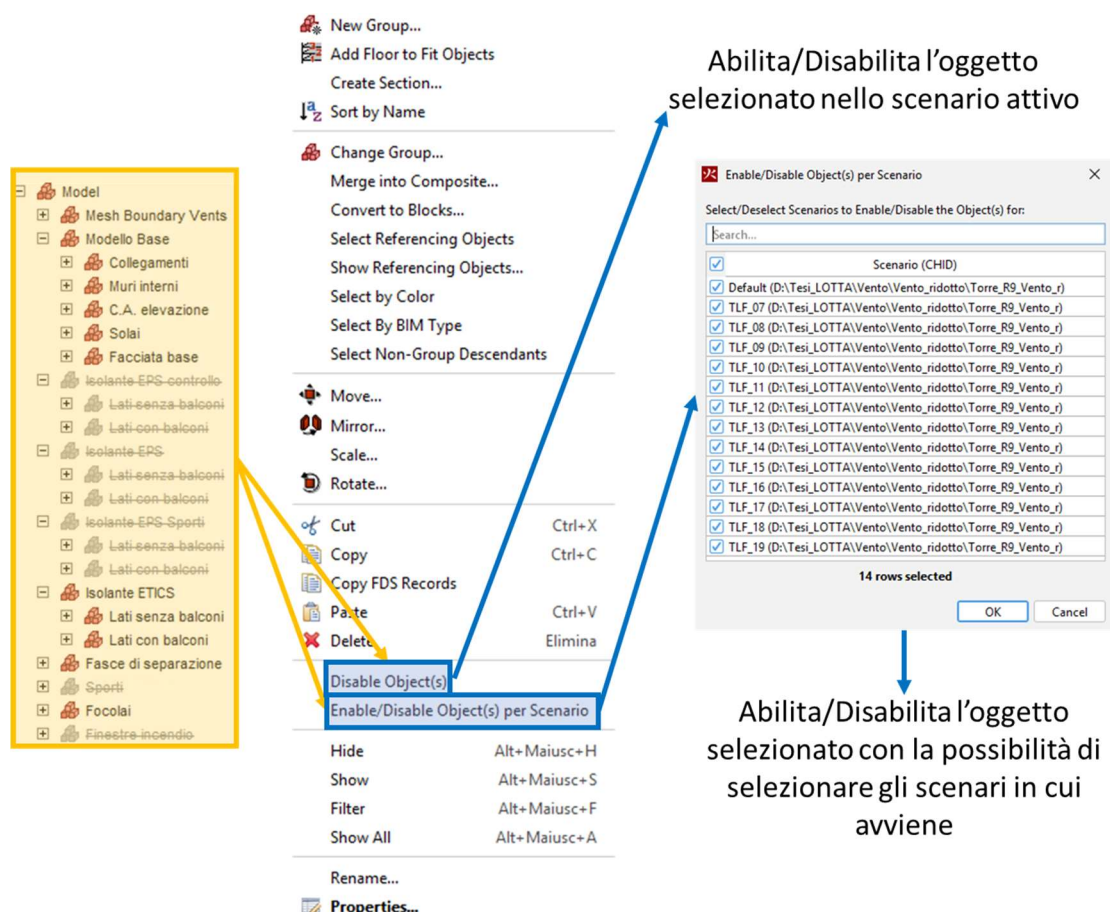


Figura 57 Utilizzo degli scenari in Pyrosim

Di seguito viene riportata la lista degli scenari che sono stati esaminati per il modello a due piani (Tabella) e per il modello dell'edificio intero (Tabella)

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_ET_01	2 Piani	ETICS + Fasce	Est	2m/s
TLF2P_ET_02			Nord	2 m/s
TLF2P_ET_03			\	\
TLF2P_EF_01		EPS + Fasce	Est	2m/s
TLF2P_EF_02			Nord	2 m/s
TLF2P_EF_03			\	\
TLF2P_ES_01		EPS + Sporti	Est	2m/s
TLF2P_ES_02			Nord	2 m/s
TLF2P_ES_03			\	\
TLF2P_E		EPS	\	\

Tabella 5 Sintesi scenari modello a due piani

Per quanto riguarda le simulazioni che prevedono il vento come condizione al contorno, sono state analizzate due direzioni principali per le simulazioni definitive:

- Vento proveniente da Est, che impatta la facciata opposta rispetto a quella interessata dall'incendio;
- Vento proveniente da Nord, che incide tangenzialmente sulla facciata coinvolta, influenzando direttamente il comportamento delle fiamme e dei prodotti della combustione lungo la superficie verticale;

Vento proveniente da Sud, direzione che non è stata considerata, in quanto avrebbe generato una configurazione speculare rispetto al caso del vento da Nord, senza aggiungere nuove informazioni utili all'analisi. La condizione di vento proveniente da Ovest, ovvero frontalmente alla facciata colpita dall'incendio, è stata oggetto di una valutazione preliminare attraverso simulazioni ridotte e semplificate, svolte a diverse intensità di vento (1 m/s e 5 m/s), e replicate per tutte le direzioni. I risultati ottenuti da tali test hanno evidenziato che il vento frontale esercita un effetto di "soffocamento" della fiamma sulla superficie esterna, impedendo l'innesco della facciata anche in presenza di combustibili esposti. Inoltre, la spinta dell'aria generava una propagazione del calore e dei fumi verso l'interno dell'edificio, comportamento non coerente con gli obiettivi della presente analisi, che si concentra sulla propagazione esterna dell'incendio. Per questo motivo, la configurazione con vento da Ovest è stata esclusa dal set definitivo di simulazioni, ritenuta non rappresentativa dello scenario critico di facciata in esame. Di seguito vengono presentati i risultati sintetici delle prove esplorative che hanno portato a tale esclusione.

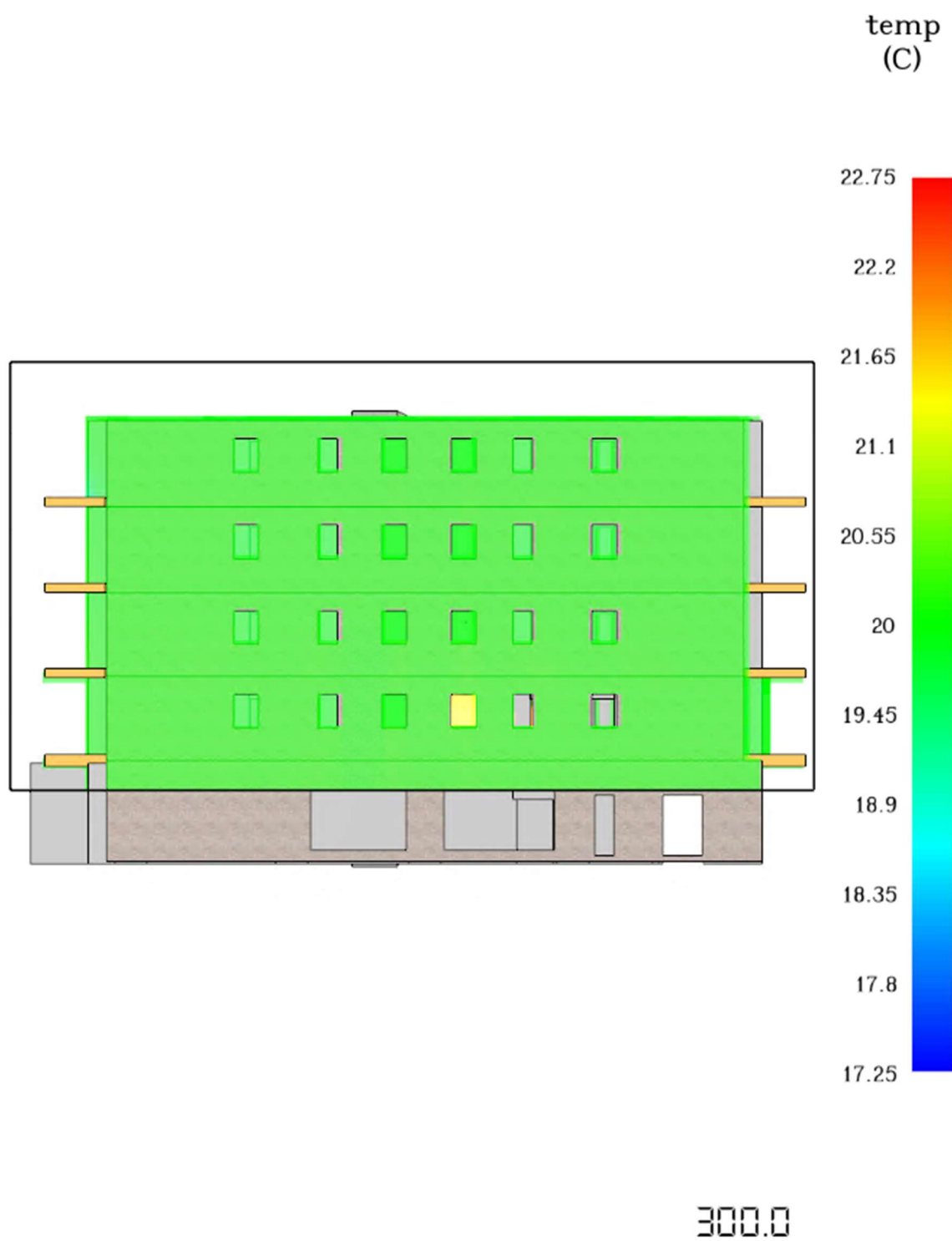


Figura 58 Vento da Ovest 5 m/s

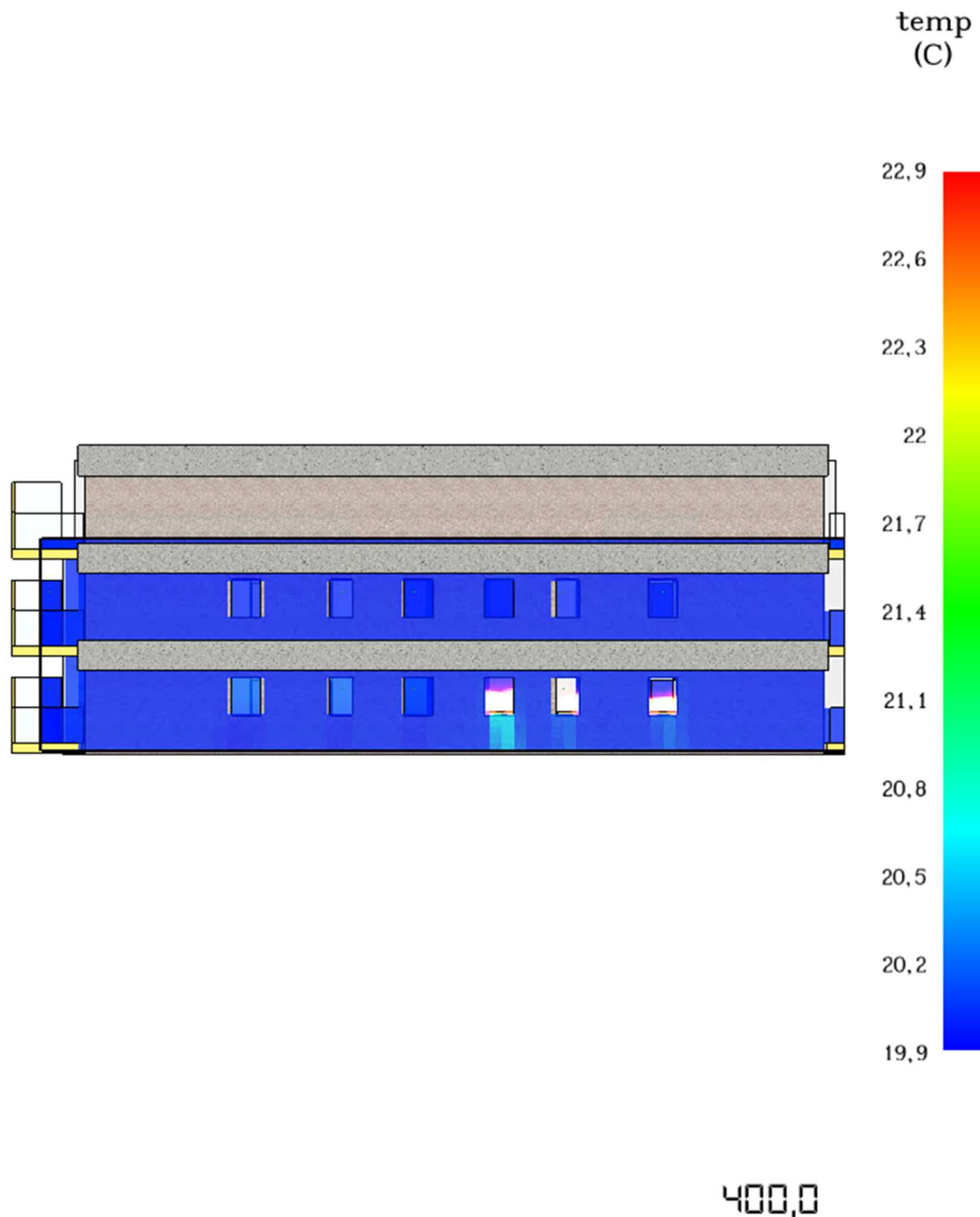


Figura 59 Vento da Ovest 1m/s

Nella tabella seguente vengono riportati gli scenari che sono stati indagati per l'edificio intero, non sono purtroppo stati valutati scenari in cui fosse implementato il vento in quanto i tempi di simulazione lo hanno reso non realizzabile.

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Piano dell'incendio	Vento
TLFEI_01	Intero edificio	EPS + Fasce	12	\
TLFEI_02		EPS + Sporti		
TLFEI_03		EPS		
TLFEI_04		ETICS + Fasce		

Tabella 6 Sintesi scenari modello intero edificio

5. Analisi dei risultati – comportamento al fuoco delle facciate

Nel presente capitolo vengono riportati e analizzati i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche svolte, seguendo l'organizzazione metodologica descritta nei capitoli precedenti. I dati sono strutturati secondo una logica comparativa, finalizzata a valutare l'efficacia delle differenti configurazioni di facciata in relazione al comportamento termico, alla propagazione dell'incendio e al rischio di innesco secondario. Il capitolo è articolato come segue:

- Nel sottocapitolo 5.1 saranno elencati i risultati nell'ordine citato nella *Tabella 5* suddividendo quindi i risultati per set di simulazioni (tecnologia costruttiva di facciata) all'interno di ogni set sarà operata un'ulteriore divisione dei risultati in base alle condizioni al contorno a cui il modello è stato esposto durante la simulazione;
- Nel sottocapitolo 5.2 saranno elencati i risultati concordemente alla *Tabella 6*, non sarà necessaria un'ulteriore suddivisione perché i modelli sono stati elaborati in condizioni standard;
- Nel capitolo 5.3 viene infine proposto un confronto trasversale tra i vari set di simulazioni, sarà dunque ulteriormente ripartito per confrontare i modelli differenti a parità di condizioni ambientali, al fine di evidenziare le differenze prestazionali tra i modelli.

In ogni scenario i dati di output riportati riguardano tre quantità misurabili e rappresentative per la valutazione della propagazione dell'incendio:

- **Burning Rate:** rappresenta la quantità di combustibile che si trasforma in gas combust (vapori infiammabili) per unità di superficie e per unità di tempo l'unità di misura che caratterizza questo parametro è $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Un burning rate elevato porta a un più rapido sviluppo dell'incendio, mentre un tasso basso può indicare una combustione più lenta o limitata.
- **Incident Heat Flux:** si riferisce al flusso termico incidente su una superficie, ovvero la quantità di energia termica per unità di area che colpisce una superficie nell'unità di tempo, l'unità di misura di questo parametro è il kW/m^2 . Risulta un parametro fondamentale per capire se e quando una superficie inizierà a degradarsi, pirolizzare, fondere o bruciare.
- **Wall Temperature:** indica la temperatura della superficie esterna di una parete o di un elemento costruttivo esposto all'incendio, è un indicatore chiave del comportamento termico delle superfici in un incendio. Permette di valutare quanto velocemente una parete si riscalda, l'unità di misura sono i $^{\circ}\text{C}$.

5.1 Risultati modello a due piani

5.1.1 Scenario TLF2P_ET_01

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_ET_01	2 Piani	ETICS + Fasce	Est	2m/s

Lo scenario analizzato è quello corrispondente alla RTV13, con l'utilizzo di ETICS come rivestimento della facciata e la presenza delle fasce di separazione, all'interno del modello strutturato su 2 piani tipo dell'edificio. La condizione al contorno verificata in questo scenario è quella con la presenza di vento proveniente da Est, che impatta dunque sulla facciata opposta a quella interessata dall'incendio.

Burning Rate

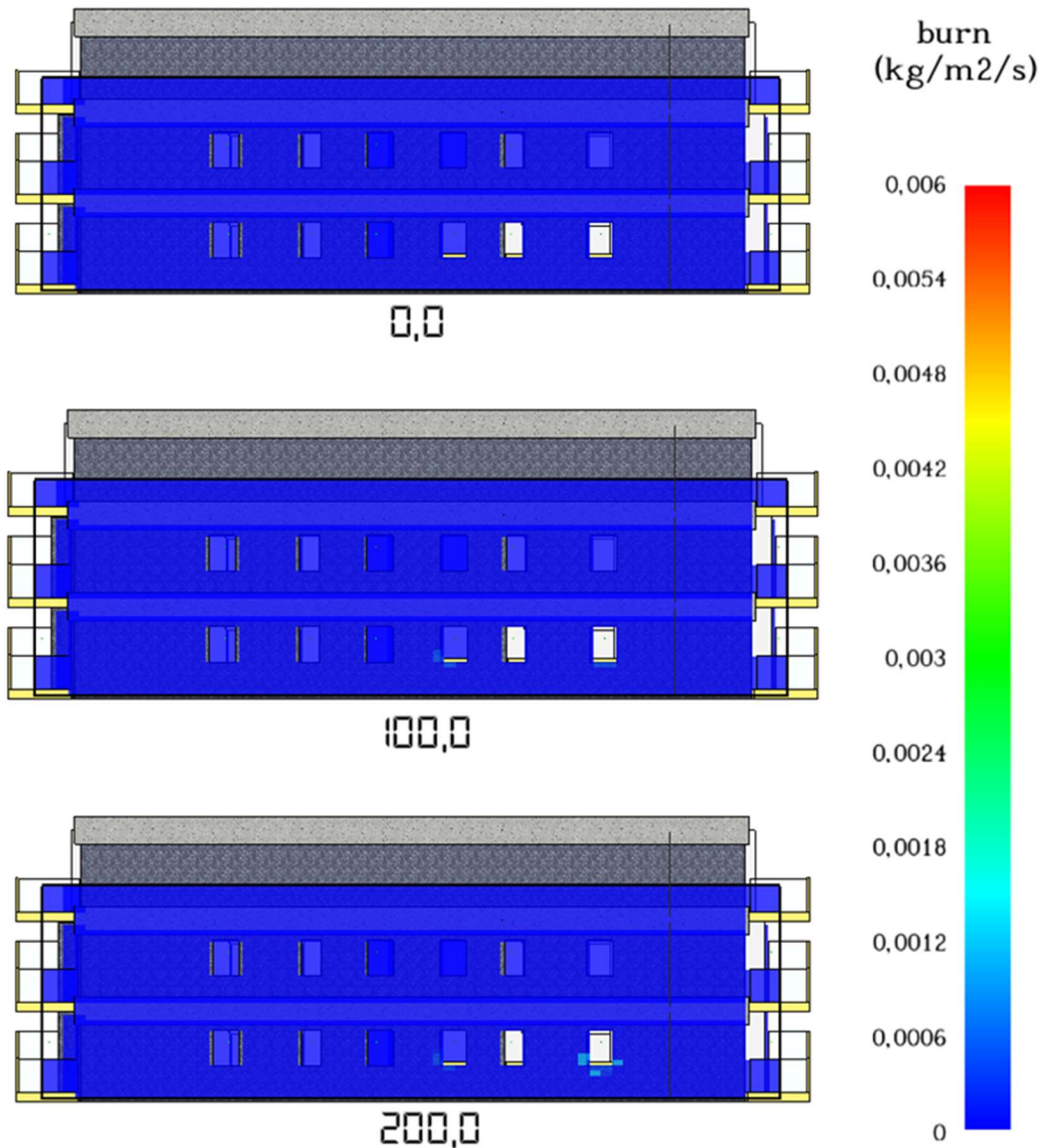


Figura 60 TLF2P_ET_01 Burning Rate Time step 0, 100, 200 secondi

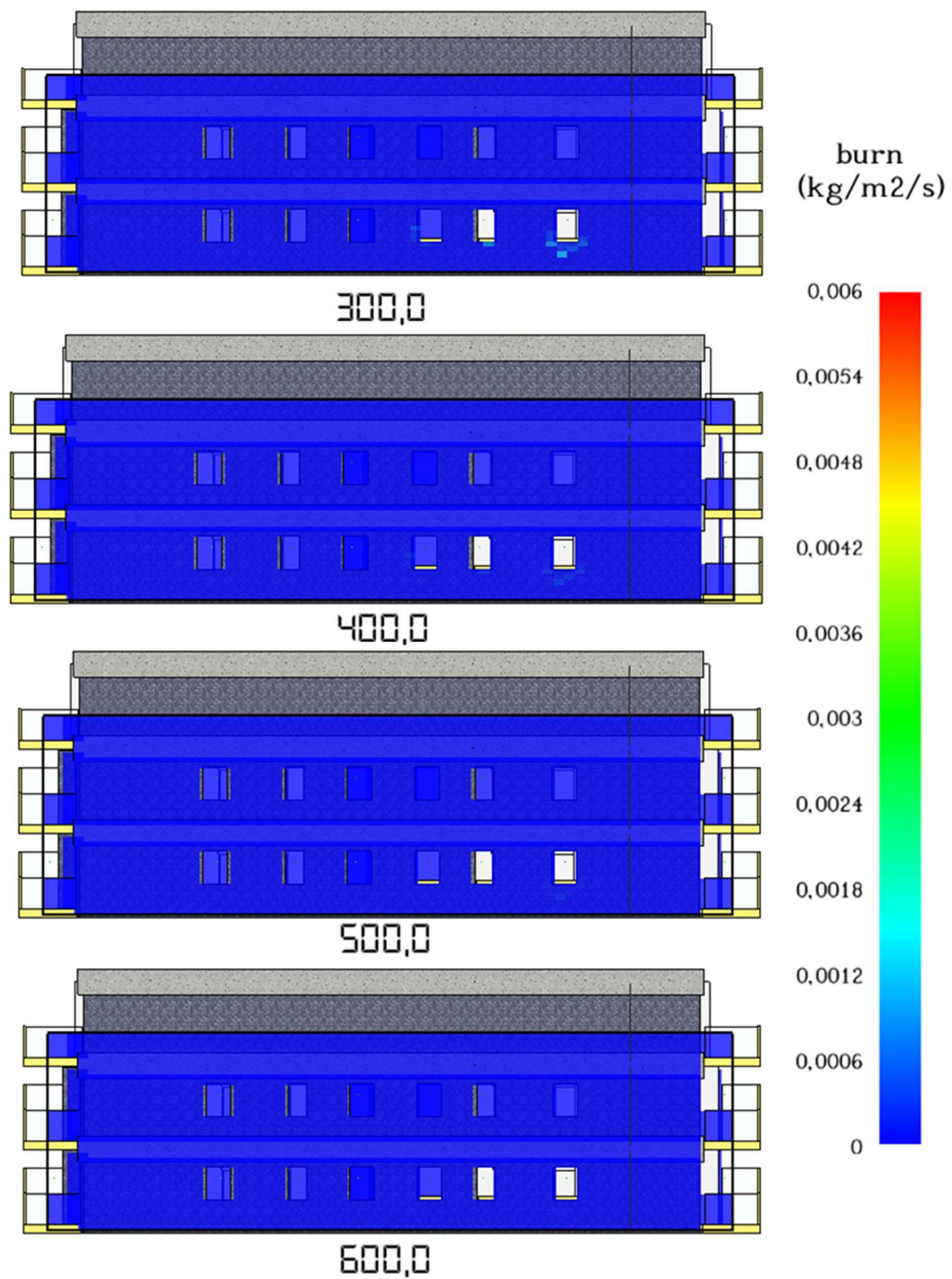


Figura 61 TLF2P_ET_01 Burning Rate Time step 300, 400, 500, 600 secondi

Incident Heat Flux

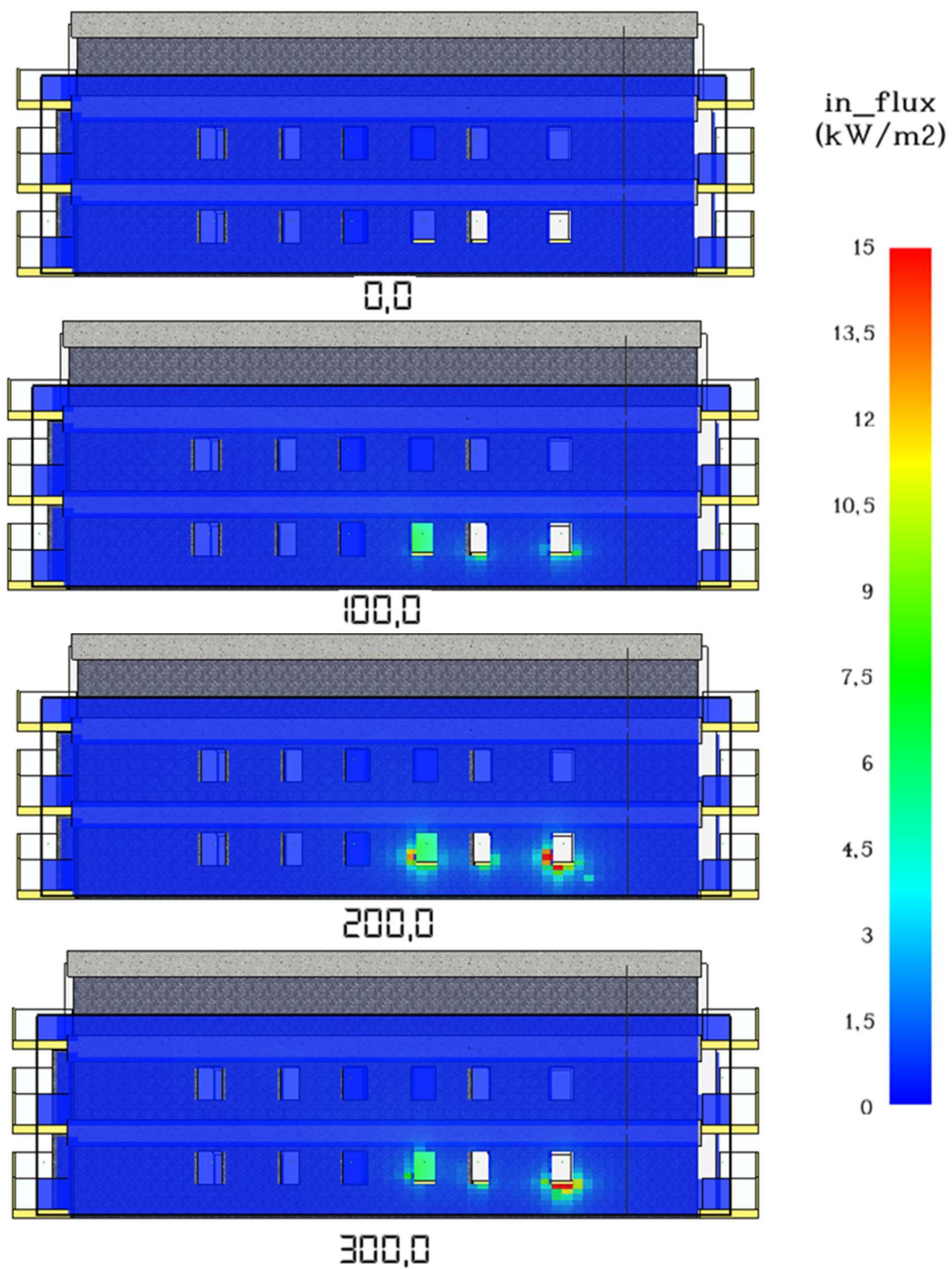


Figura 62 TLF2P_ET_01 Incident Heat Flux Time step 0, 100, 200, 300 secondi

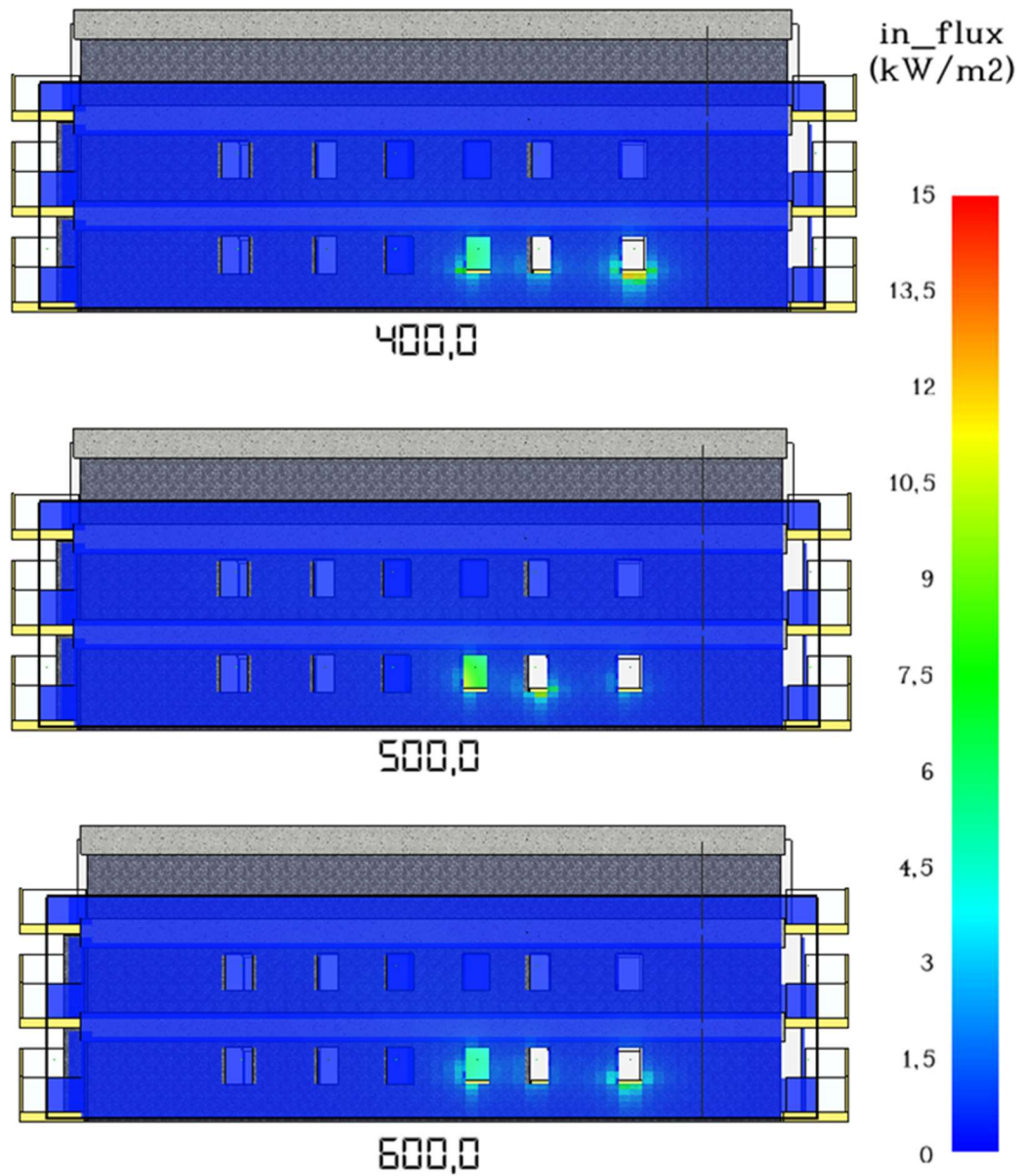


Figura 63 TLF2P_ET_01 Incident Heat Flux Time step 400, 500, 600 secondi

Wall Temperature

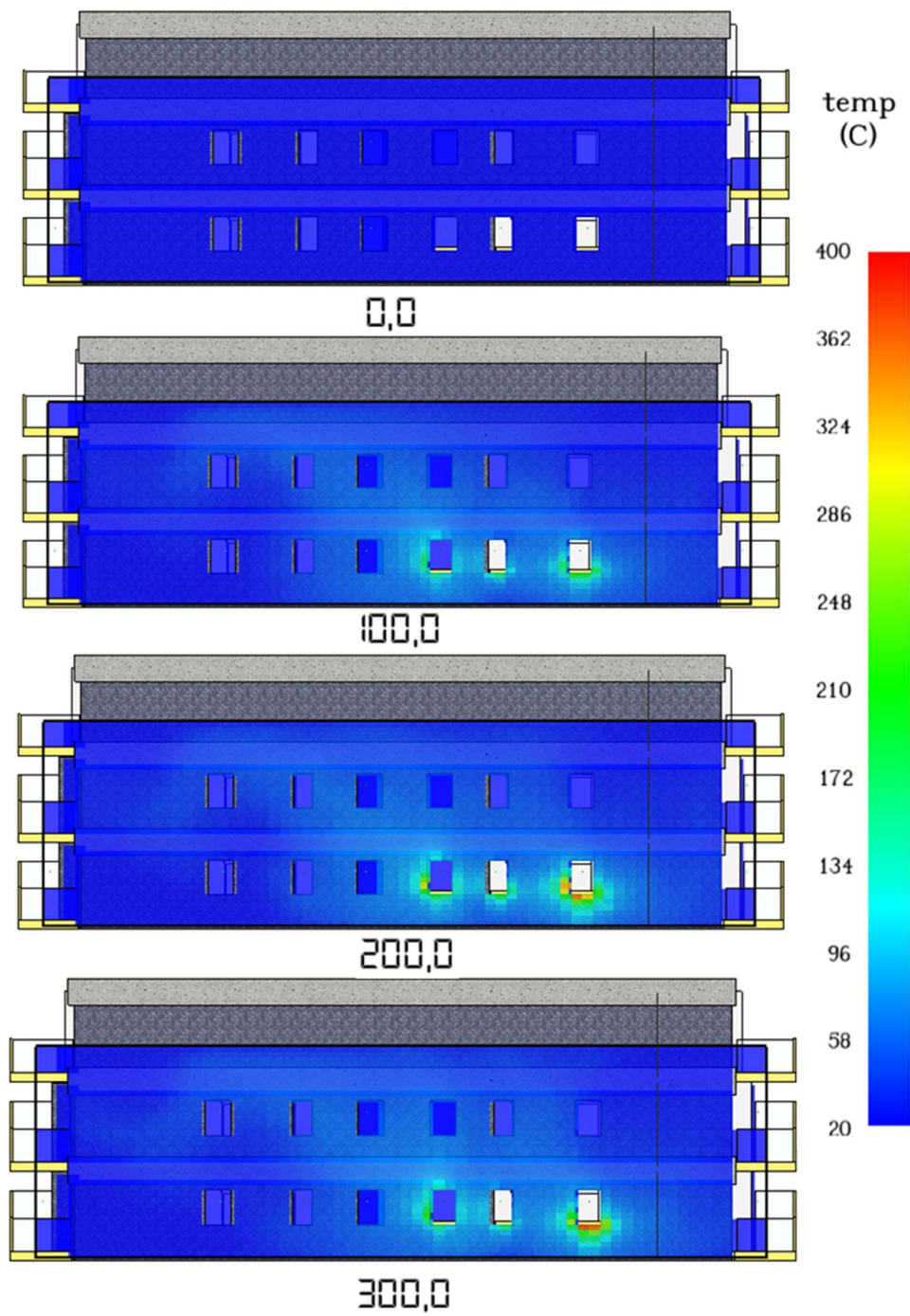


Figura 64 TLF2P_ET_01 Wall Temperature Time step 0, 100, 200, 300 secondi

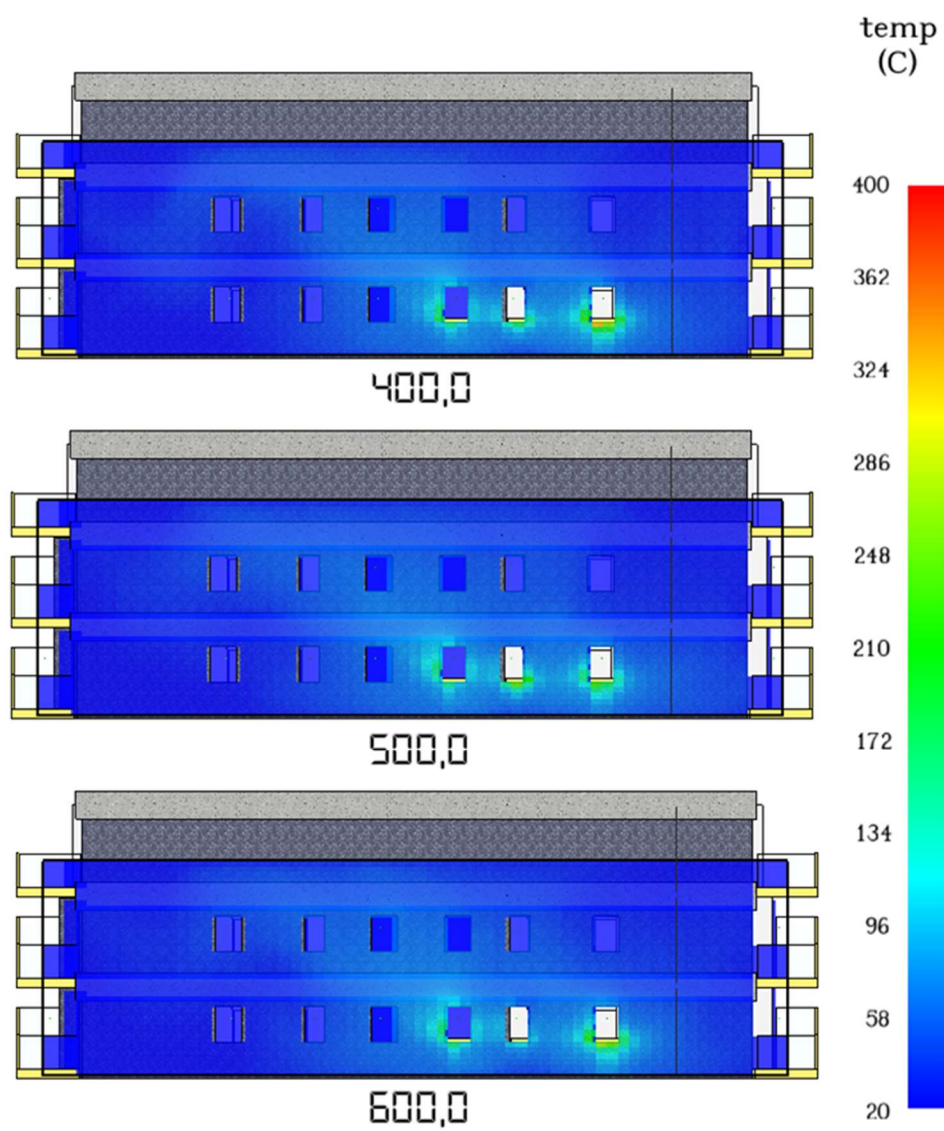


Figura 65 TLF2P_ET_01 Wall Temperature Time step 400, 500, 600 secondi

5.1.2 Scenario TLF2P_ET_02

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_ET_02	2 Piani	ETICS + Fasce	Nord	2m/s

Le tecnologie costruttive presenti in questo scenario sono le medesime del precedente, mentre le condizioni al contorno sono caratterizzate dal vento proveniente da Nord, che colpisce l'involucro tangenzialmente.

Burning Rate

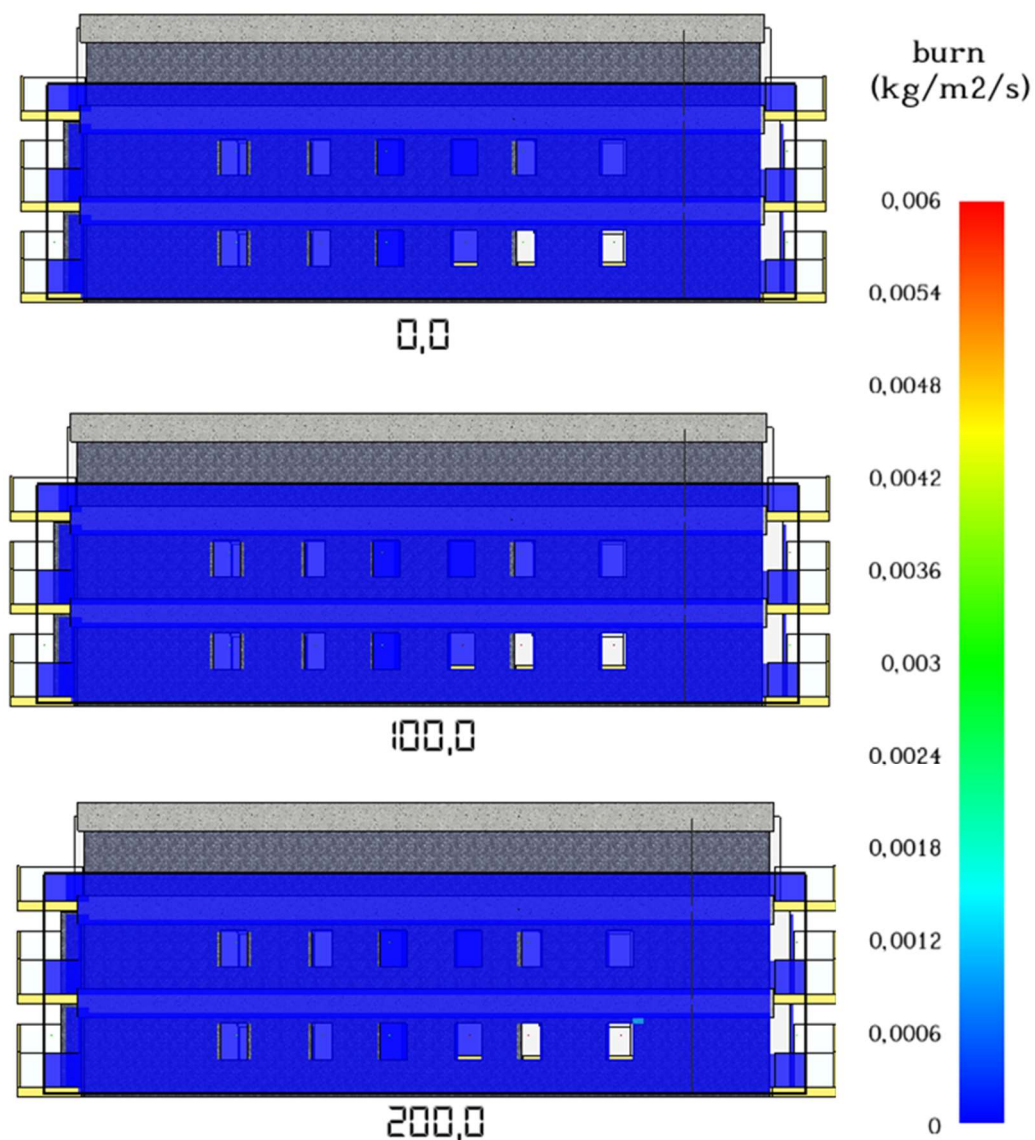


Figura 66 TLF2P_ET_02 Burning Rate Time step 0, 100, 200 secondi

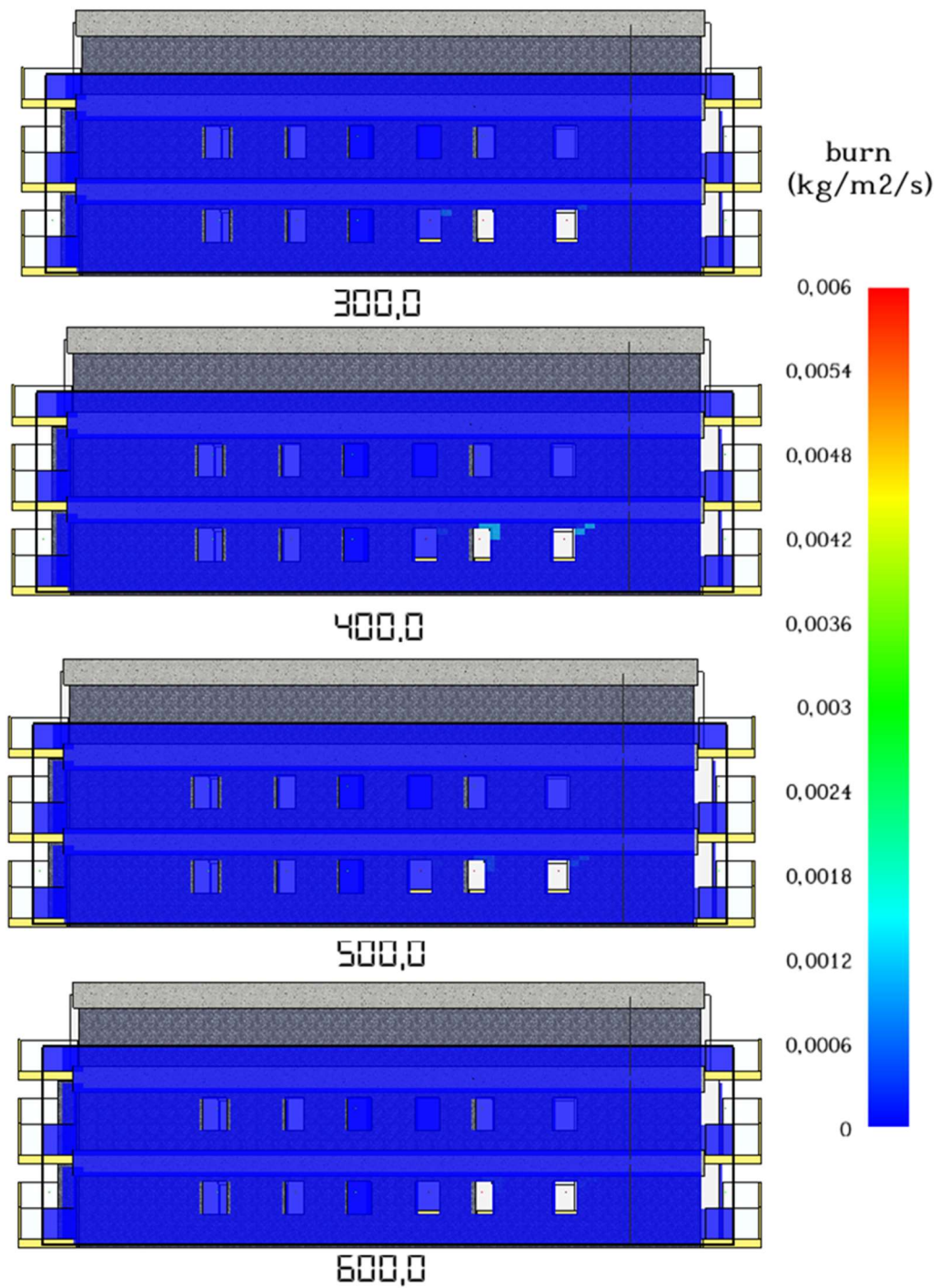


Figura 67 TLF2P_ET_02 Burning Rate Time step 300, 400, 500, 600 secondi

Incident Heat Flux

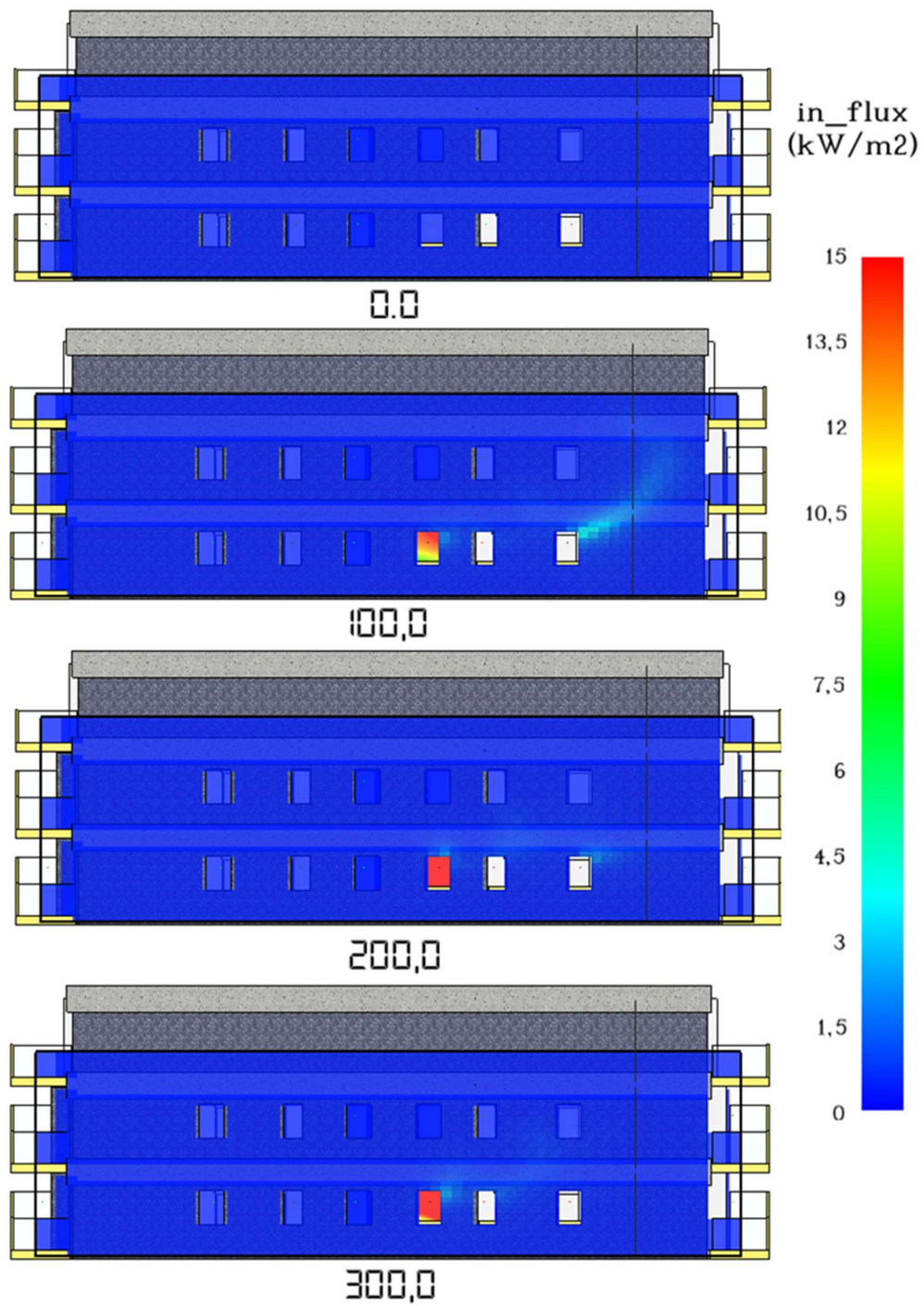


Figura 68 TLF2P_ET_02 Incident Heat Flux Time step 0, 100, 200, 300 secondi

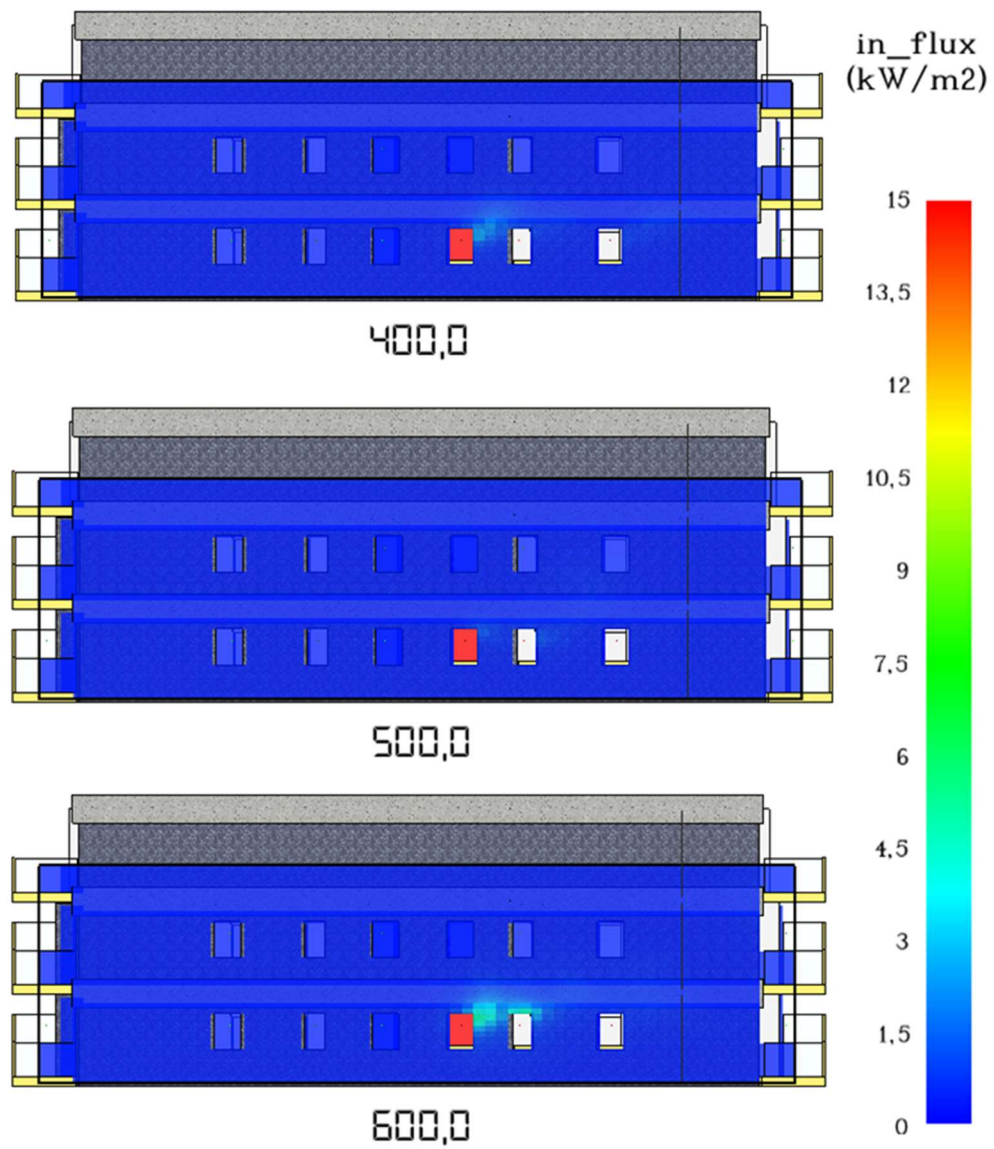


Figura 69 TLF2P_ET_02 Incident Heat Flux Time step 400, 500, 600 secondi

Wall Temperature

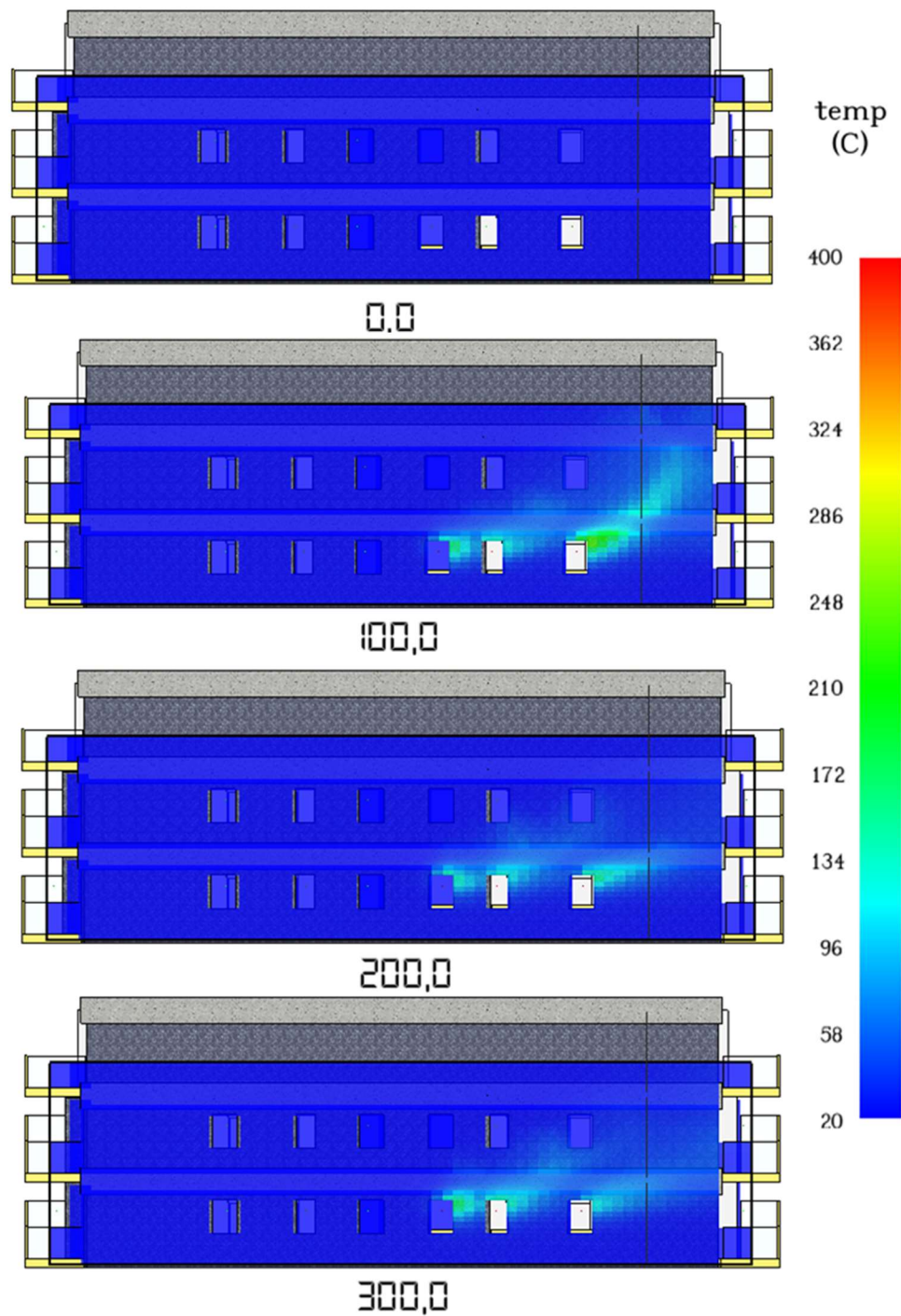


Figura 70 TLF2P_ET_02 Wall Temperature Time step 0, 100, 200, 300 secondi

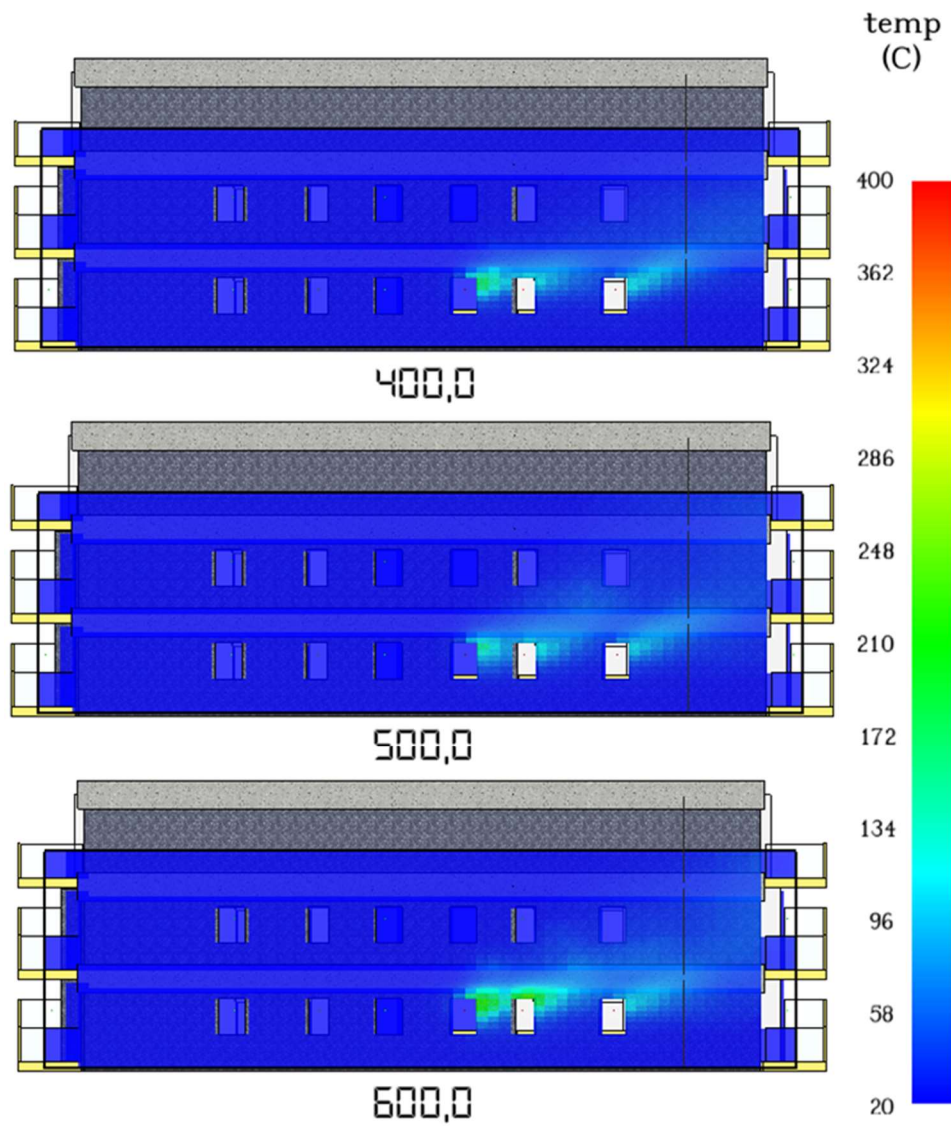


Figura 71 TLF2P_ET_02 Wall Temperature Time step 400, 500, 600 secondi

5.1.3 Scenario TLF2P_ET_03

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_ET_03	2 Piani	ETICS + Fasce	\	\

Lo scenario analizzato rientra nello stesso gruppo di simulazioni delle configurazioni precedenti, differenziandosi unicamente per le condizioni al contorno, che in questo caso non prevedono la presenza di vento.

Burning Rate

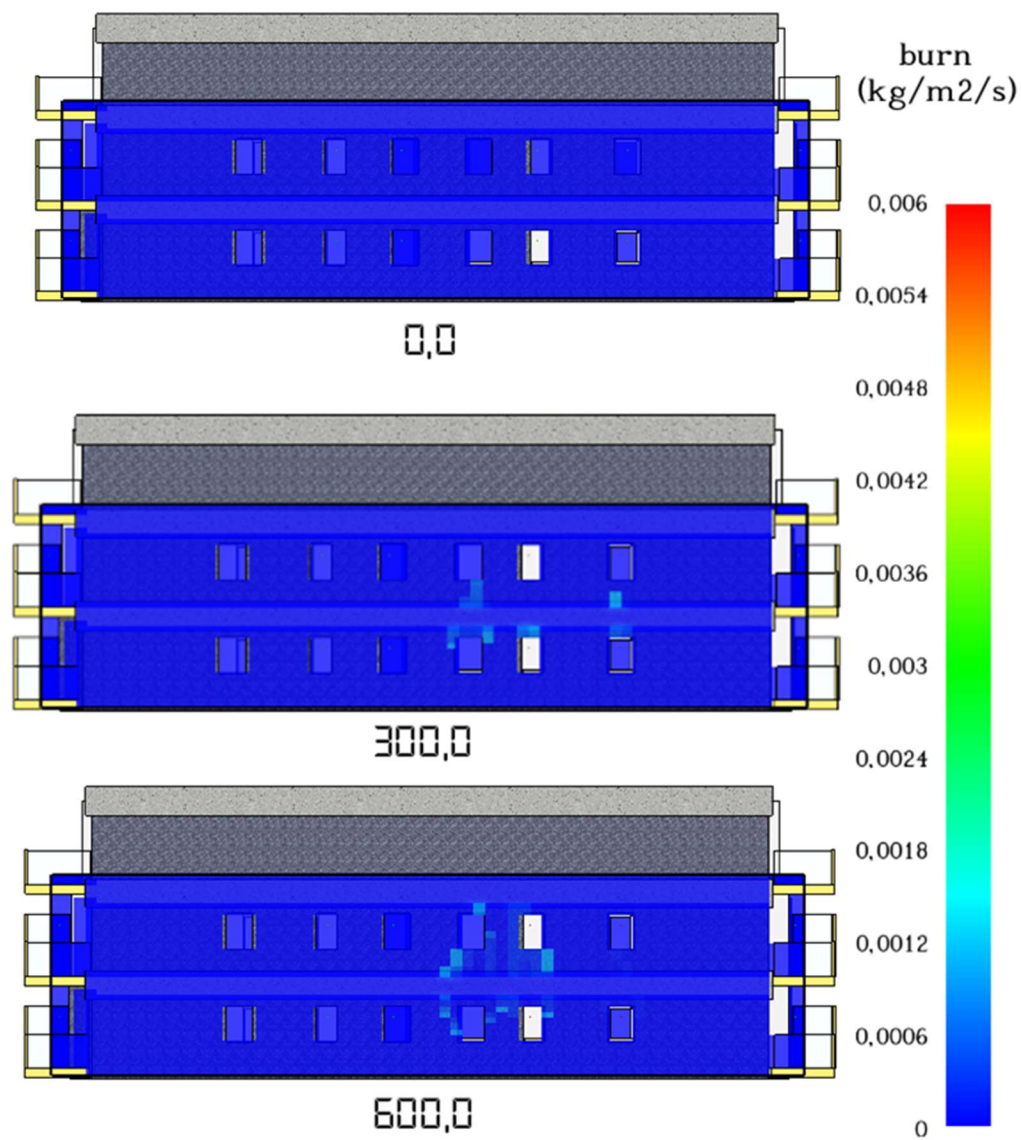


Figura 72 TLF2P_ET_03 Burning Rate Time step 0, 300, 600 secondi

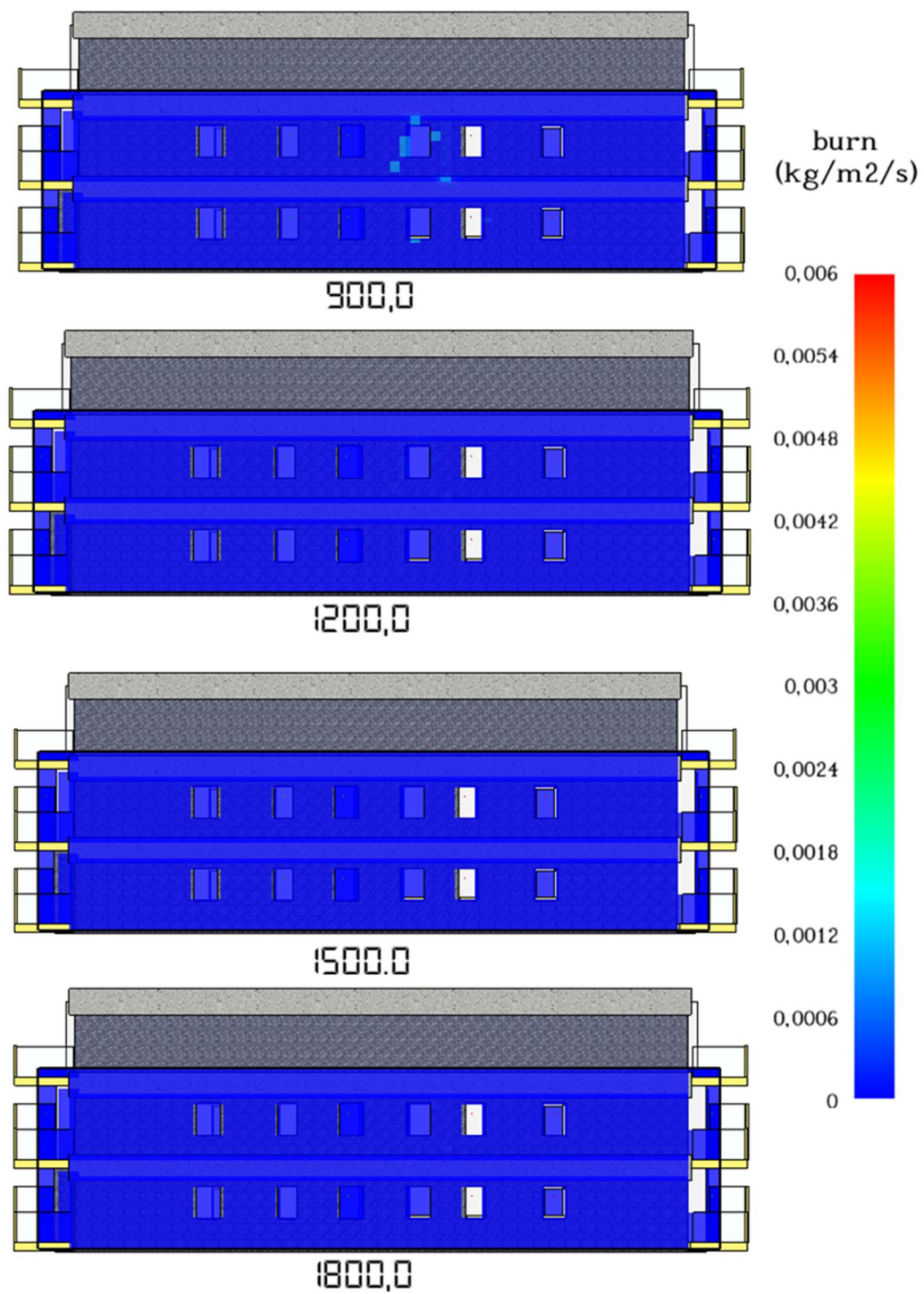


Figura 73 TLF2P_ET_03 Burning Rate Time step 900, 1200, 1500, 1800 secondi

Incident Heat Flux

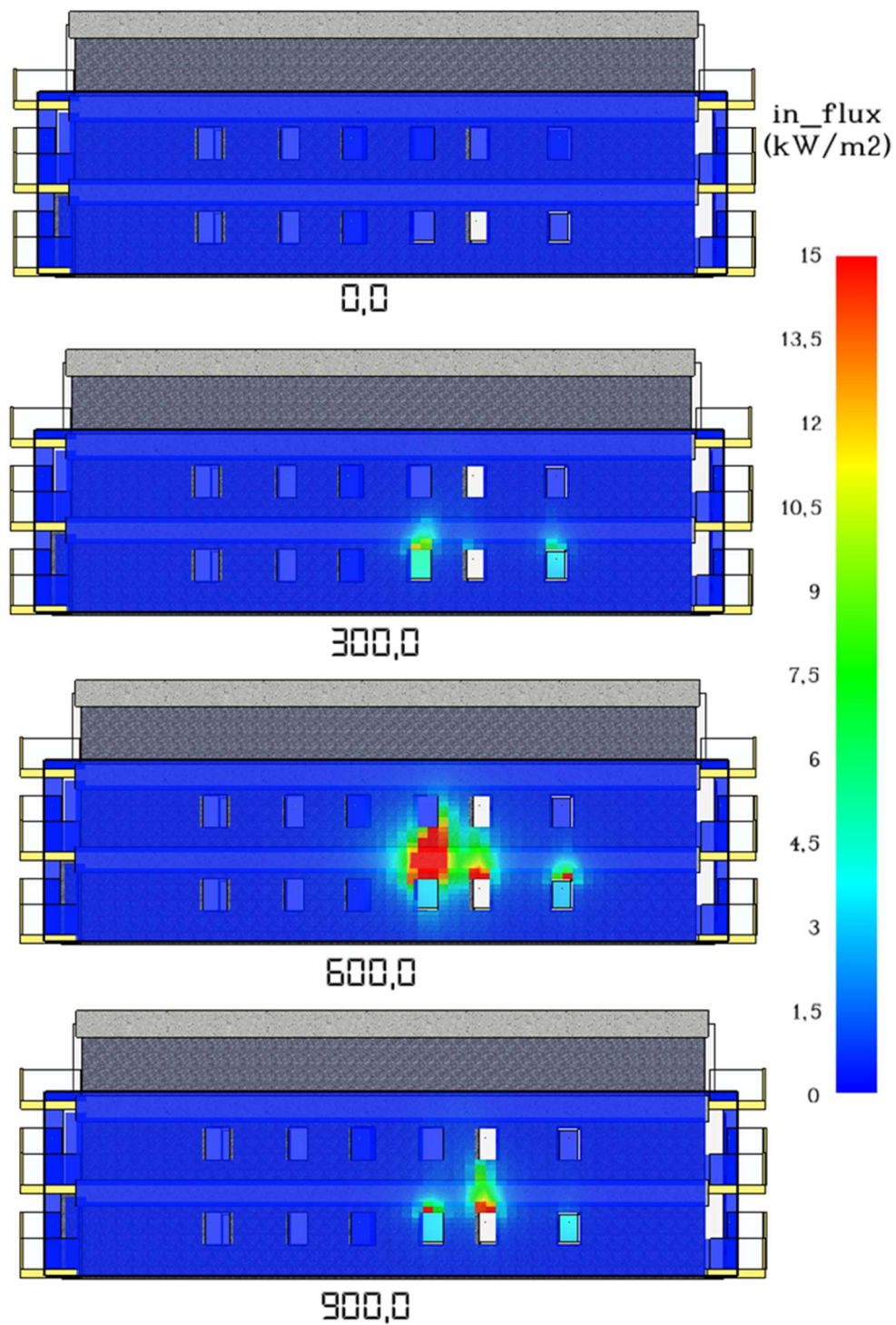


Figura 74 TLF2P_ET_03 Incident Heat Flux Time step 0, 300, 600, 900 secondi

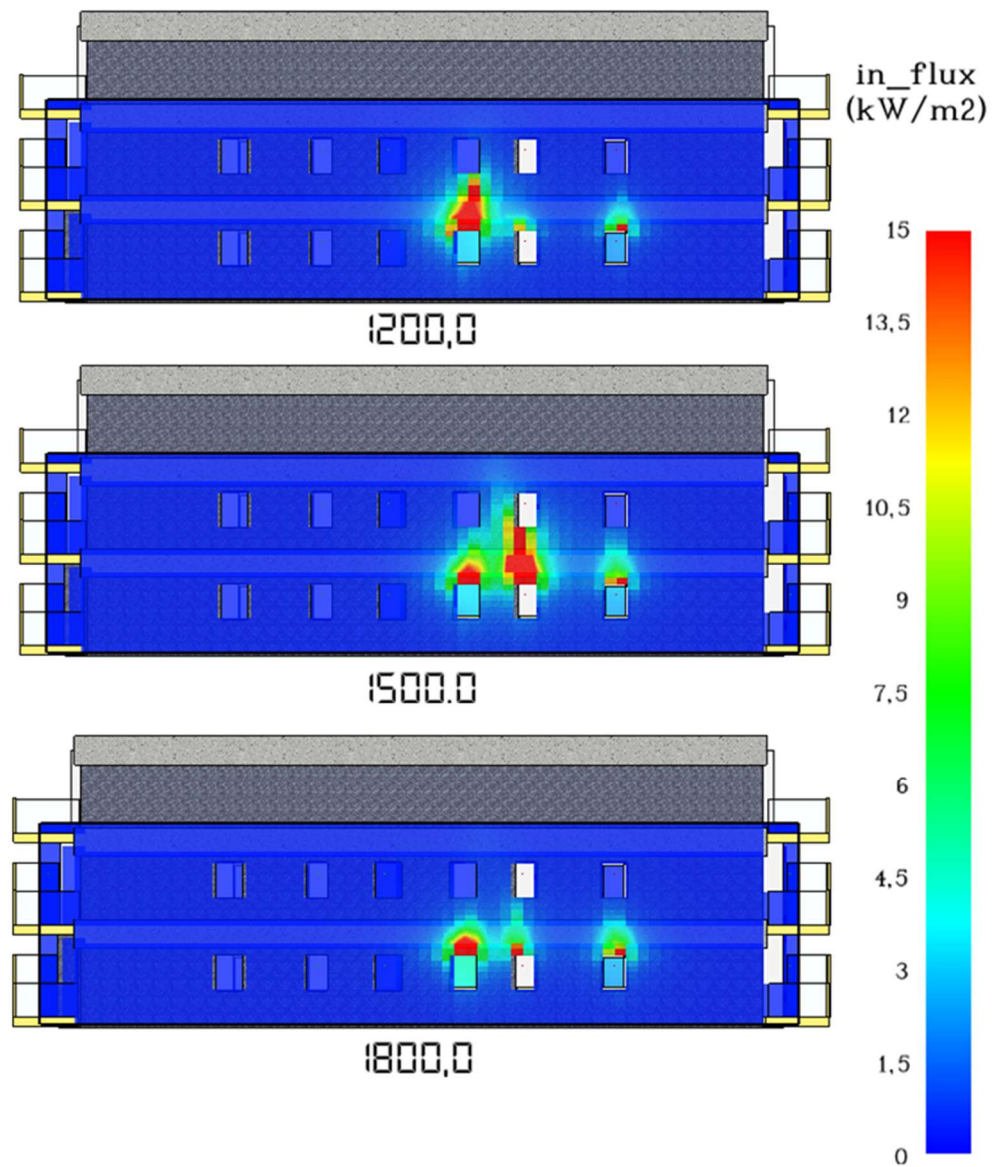


Figura 75 TLF2P_ET_03 Incident Heat Flux Time step 1200, 1500, 1800 secondi

Wall Temperature

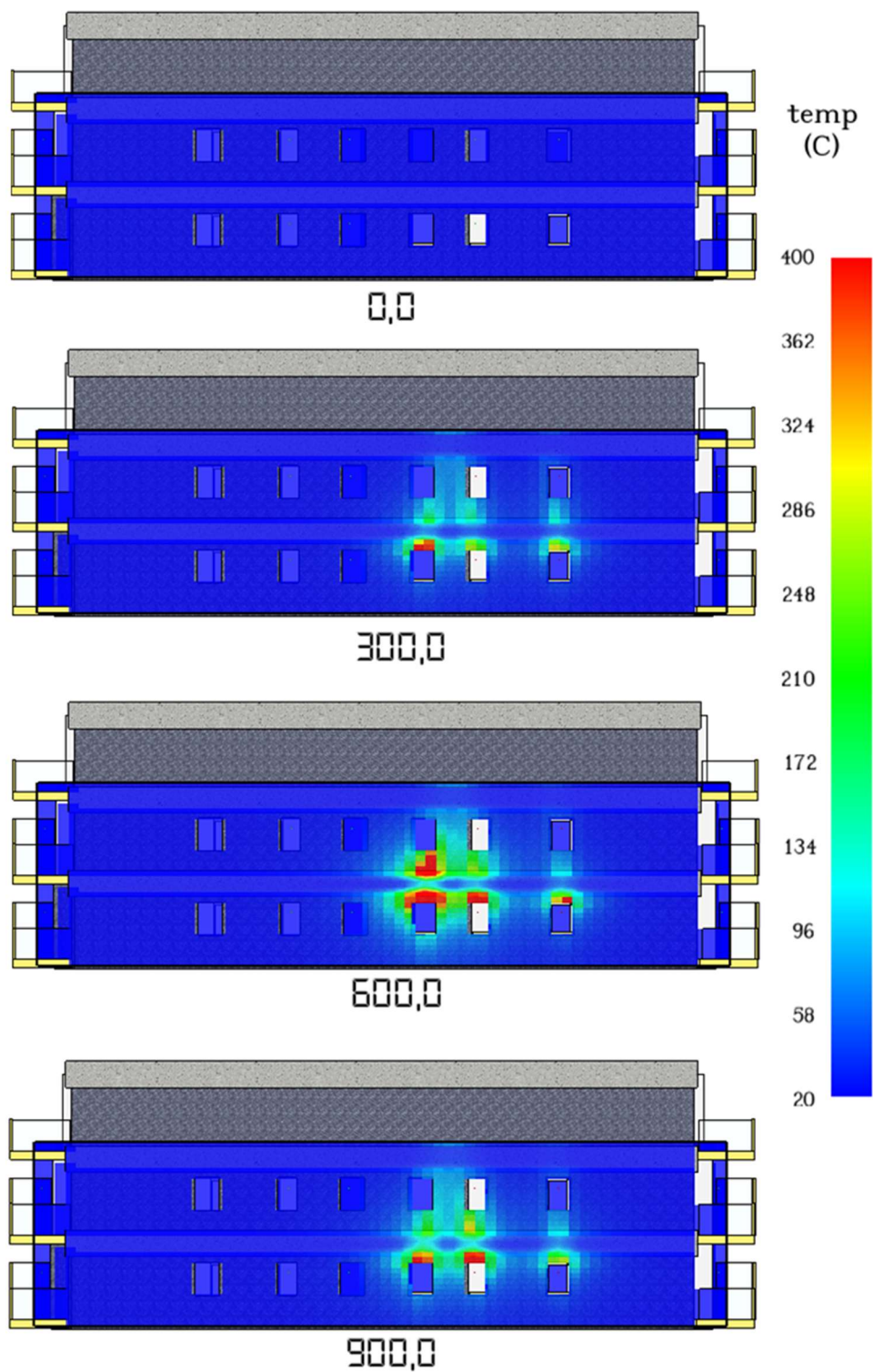


Figura 76 TLF2P_ET_03 Wall Temperature Time step 0, 300, 600, 900 secondi

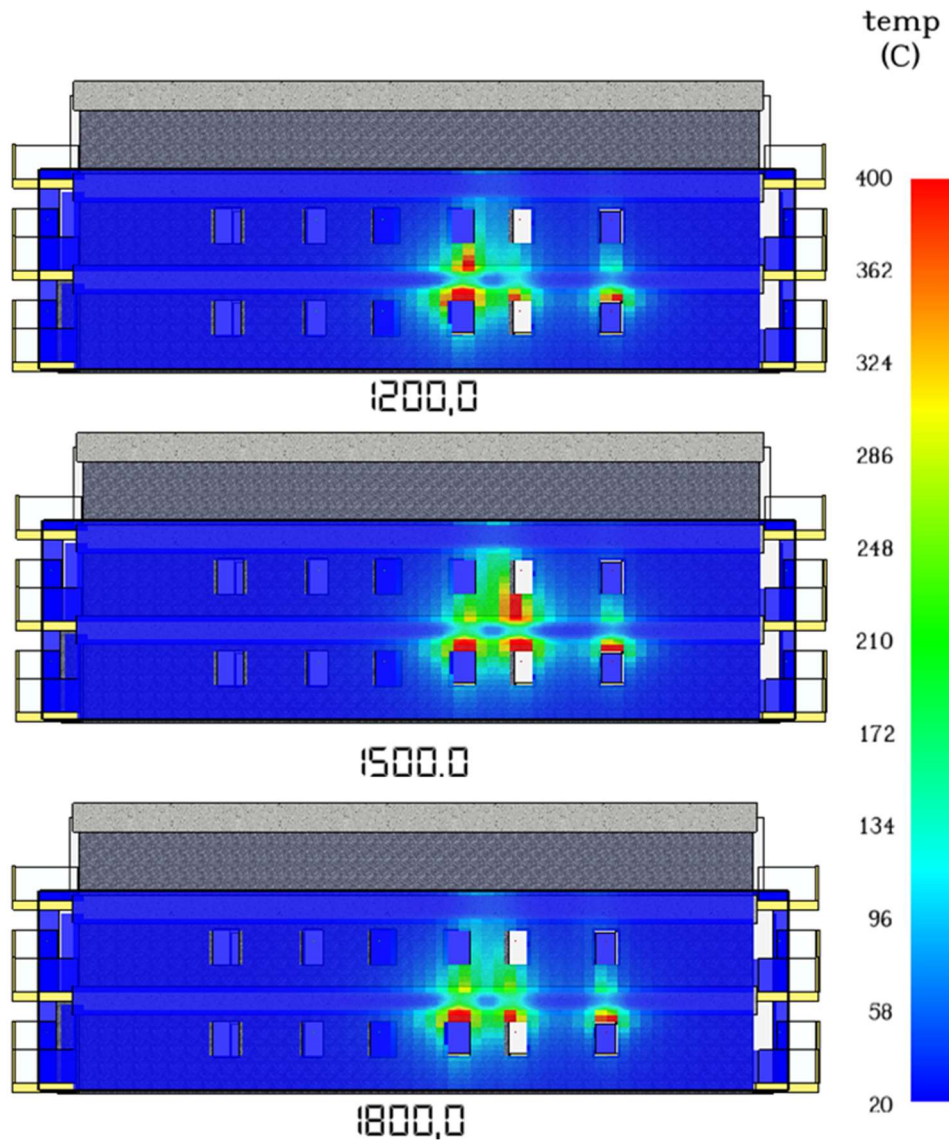


Figura 77 TLF2P_ET_03 Wall Temperature Time step 1200, 1500, 1800 secondi

I risultati riguardanti il primo set di simulazioni, conformi alla RTV13, come geometria e materiali utilizzati, dimostra come nell'insieme delle possibili condizioni di vento, risulti comunque verificata, garantendo la compartimentazione evitando l'innesco e la propagazione al piano superiore.

5.1.4 Scenario TLF2P_EF_01

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_EF_01	2 Piani	EPS + Fasce	Est	2m/s

Questo set di simulazioni analizzano il modello a 2 piani, realizzato con fasce di separazione come descritte dalla normativa e utilizzando come materiale isolante l'EPS. In particolare in questo scenario viene testato il modello con il vento proveniente da Est con velocità di 2 m/s.

Burning Rate

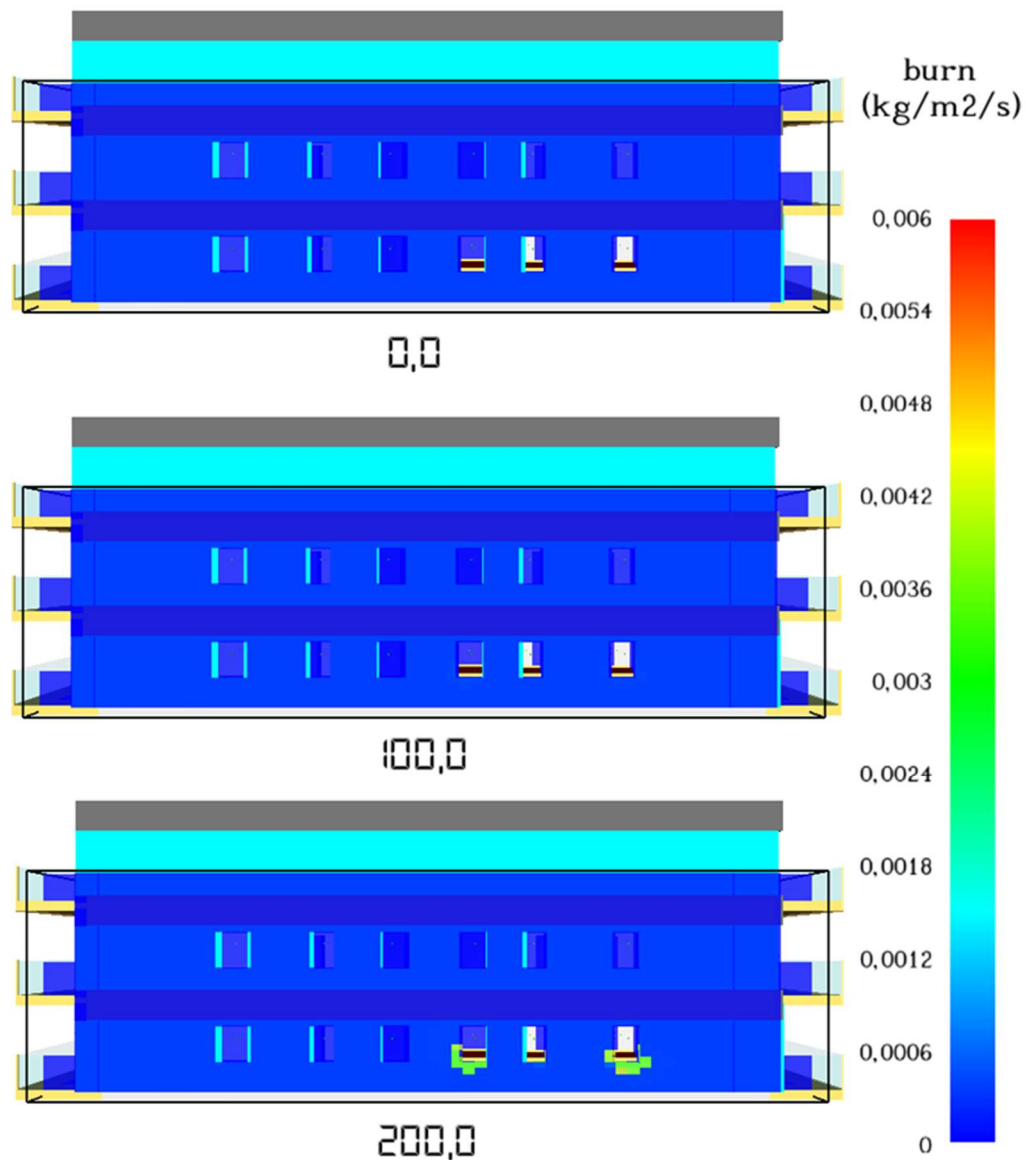


Figura 78 TLF2P_EF_01 Burning Rate Time step 0, 100, 200 secondi

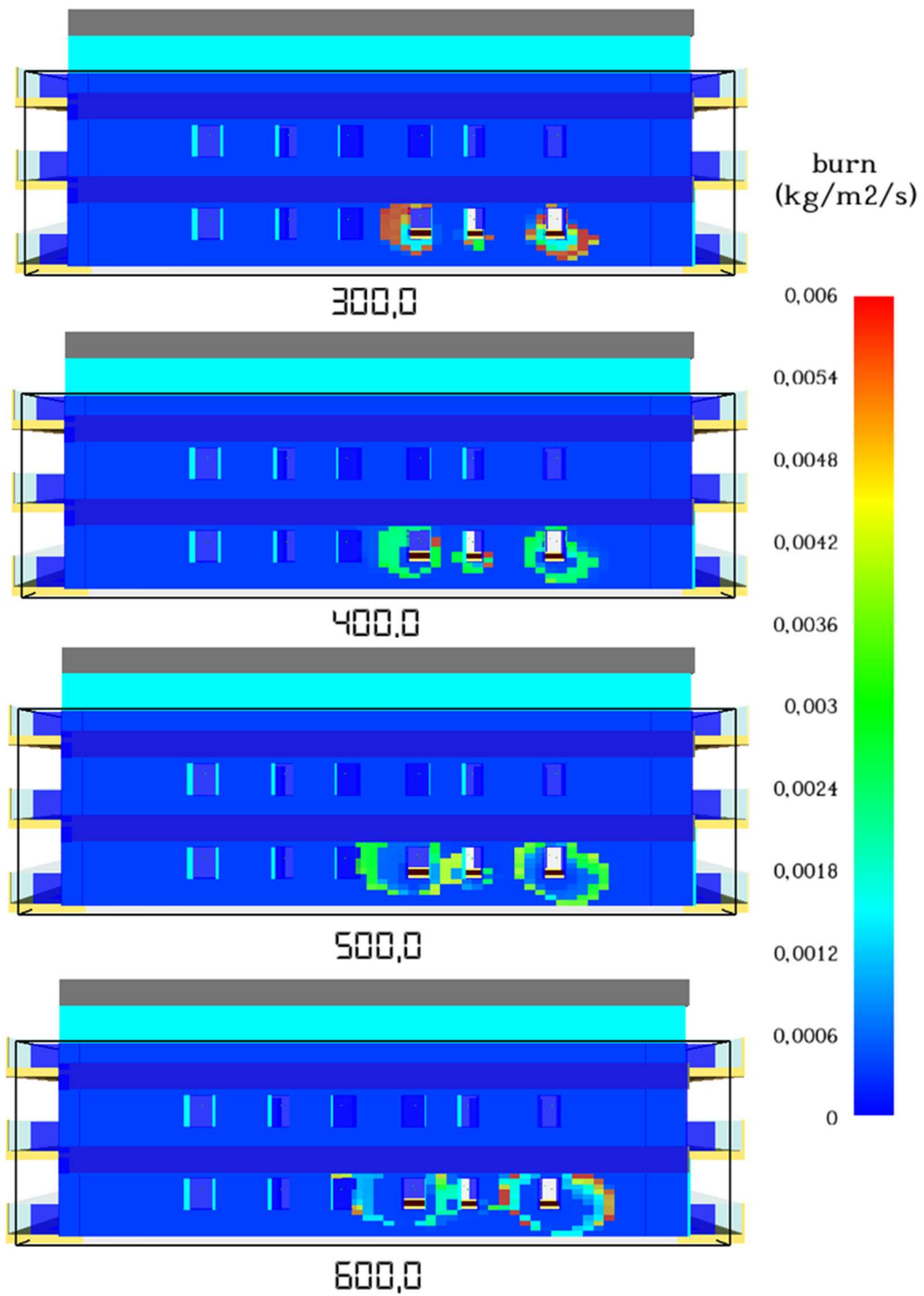


Figura 79 TLF2P_EF_01 Burning Rate Time step 300, 400, 500, 600 secondi

Incident Heat Flux

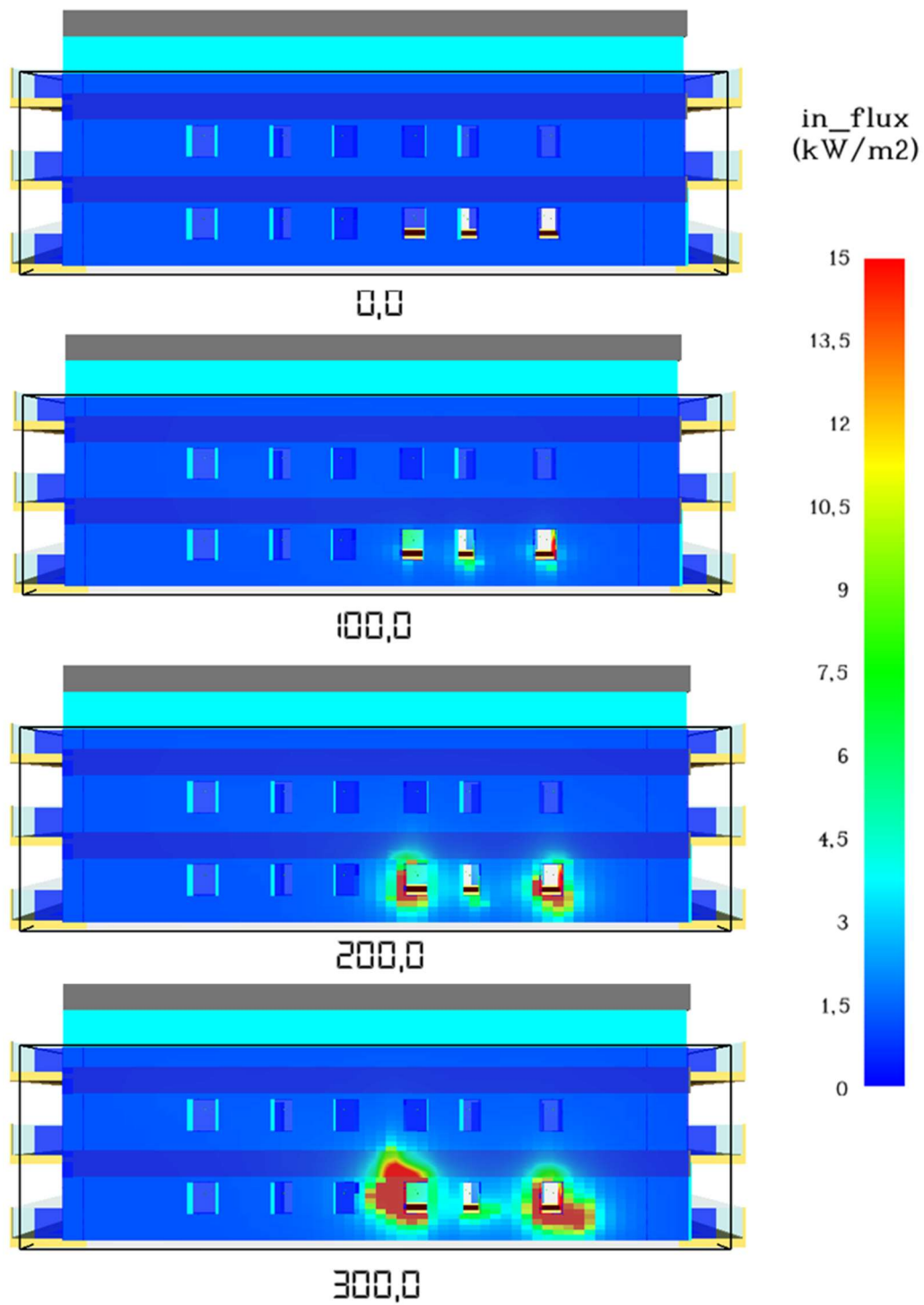


Figura 80 TLF2P_EF_01 Incident Heat Flux Time step 0, 100, 200, 300 secondi

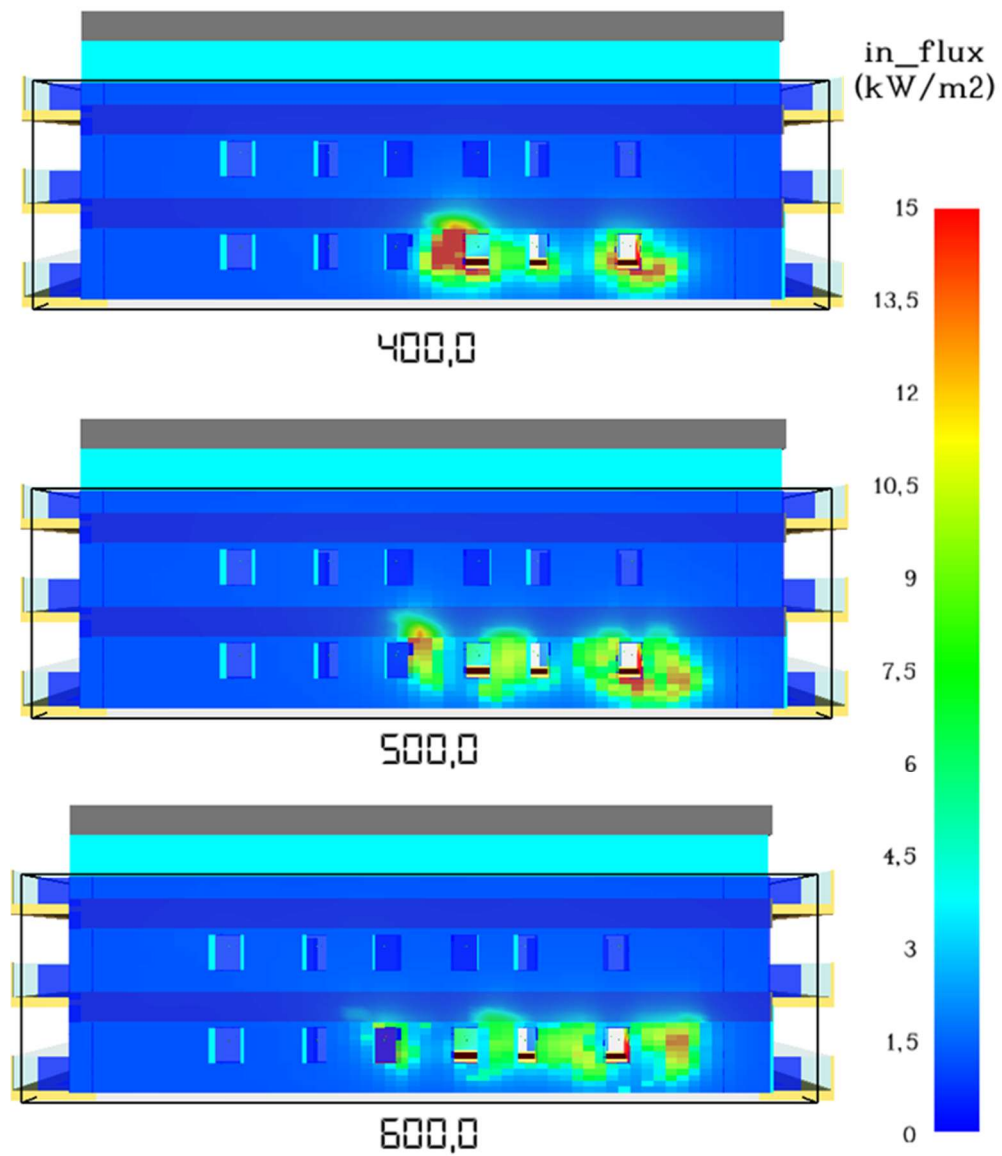


Figura 81 TLF2P_EF_01 Incident Heat Flux Time step 400, 500, 600 secondi

Wall Temperature

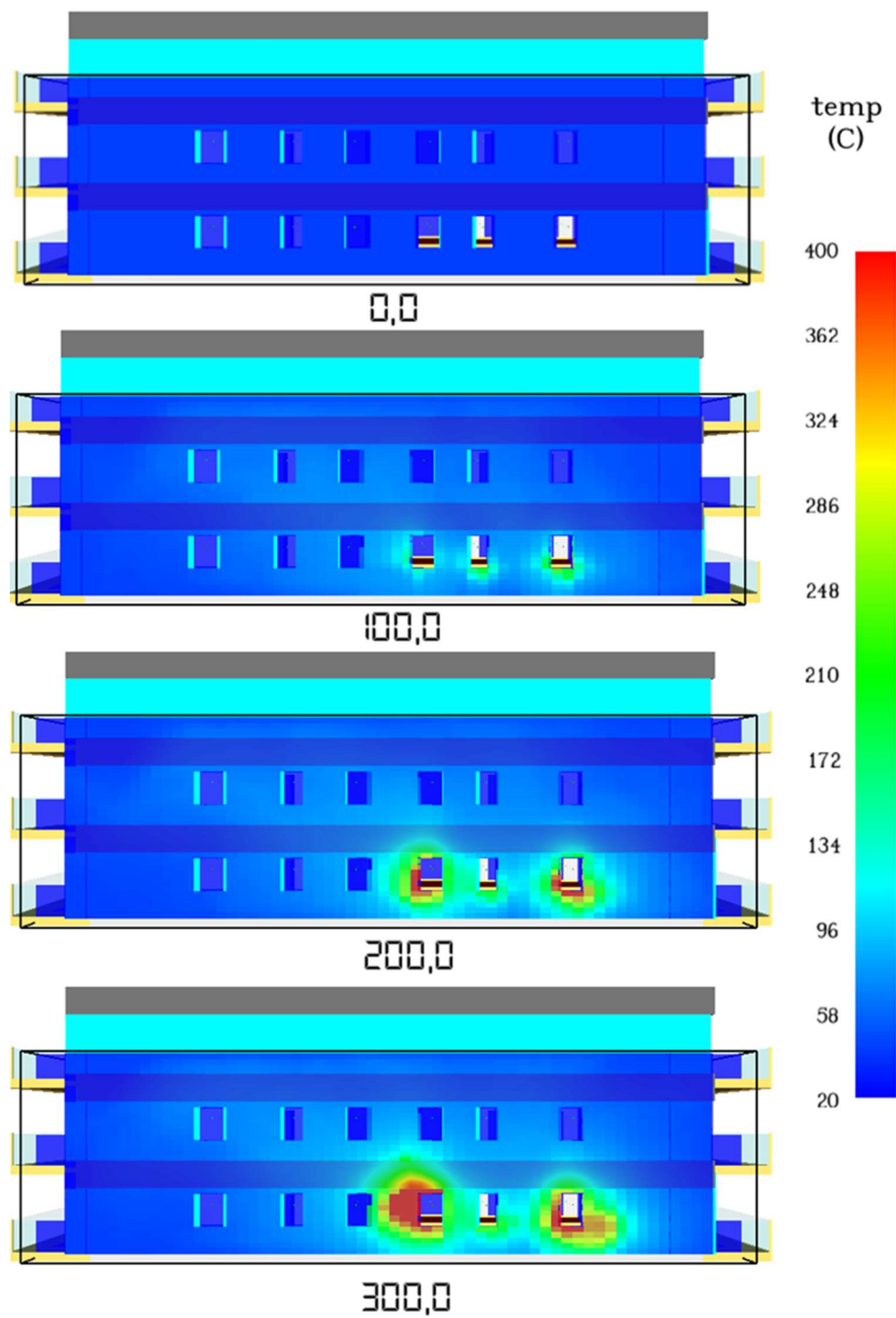


Figura 82 TLF2P_EF_01 Wall Temperature Time step 0, 100, 200, 300 secondi

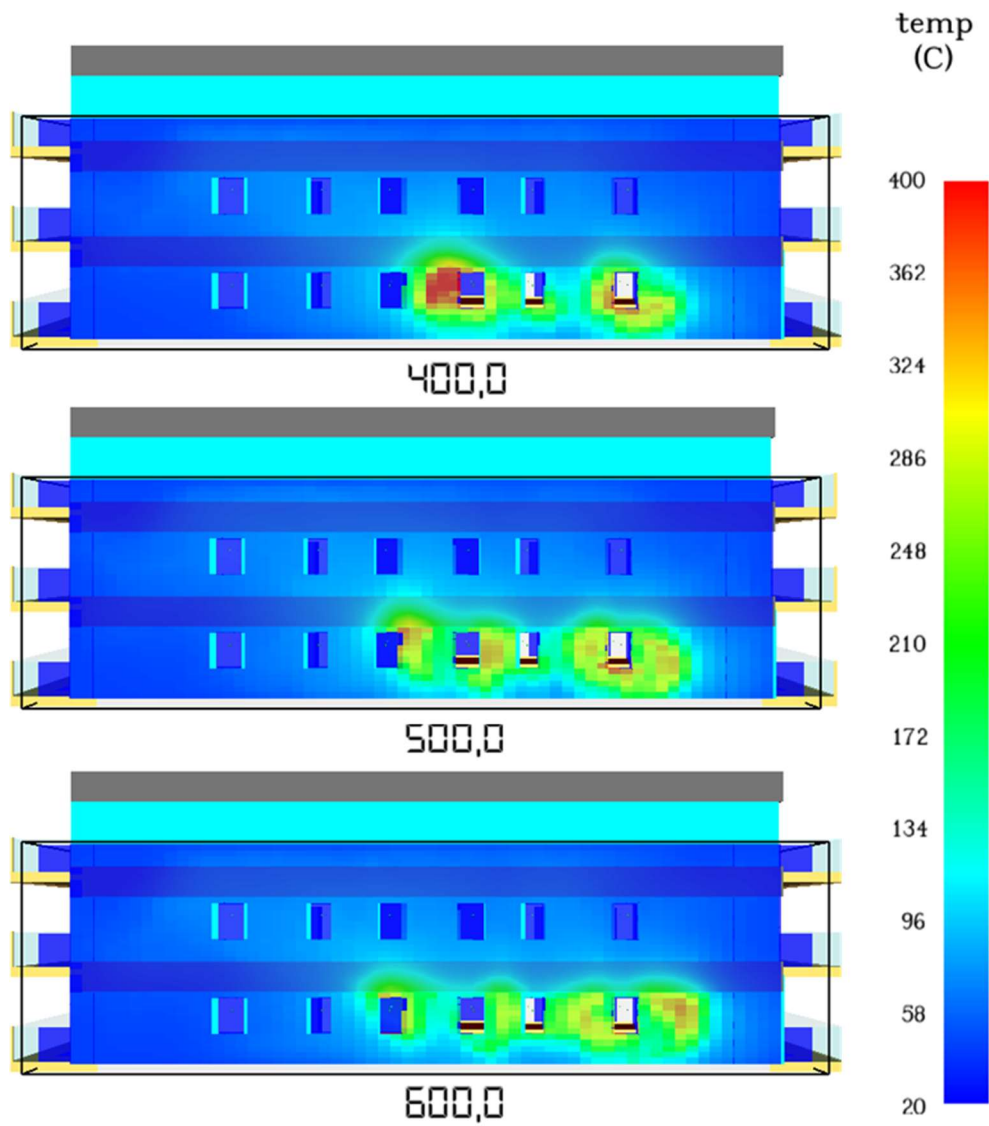


Figura 83 TLF2P_EF_01 Wall Temperature Time step 400, 500, 600 secondi

5.1.5 Scenario TLF2P_EF_02

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_EF_02	2 Piani	EPS + Fasce	Nord	2m/s

Il seguente scenario appartiene al set di simulazioni precedenti e ne conserva le caratteristiche di geometrie e materiali, risulta differente la direzione del vento che in questo caso proviene da Nord con velocità di 2 m/s.

Burning Rate

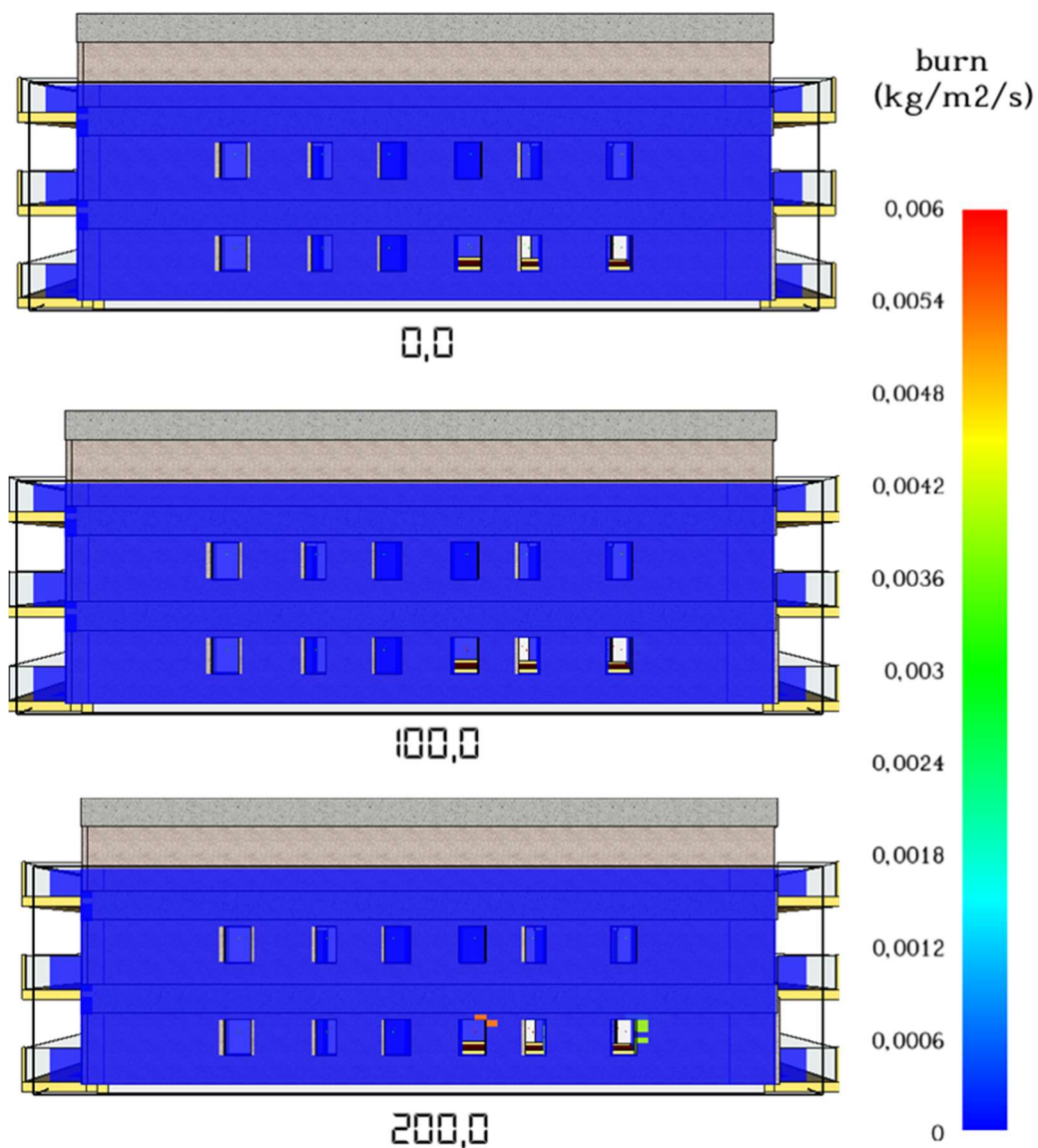


Figura 84 TLF2P_EF_02 Burning Rate Time step 0, 100, 200 secondi

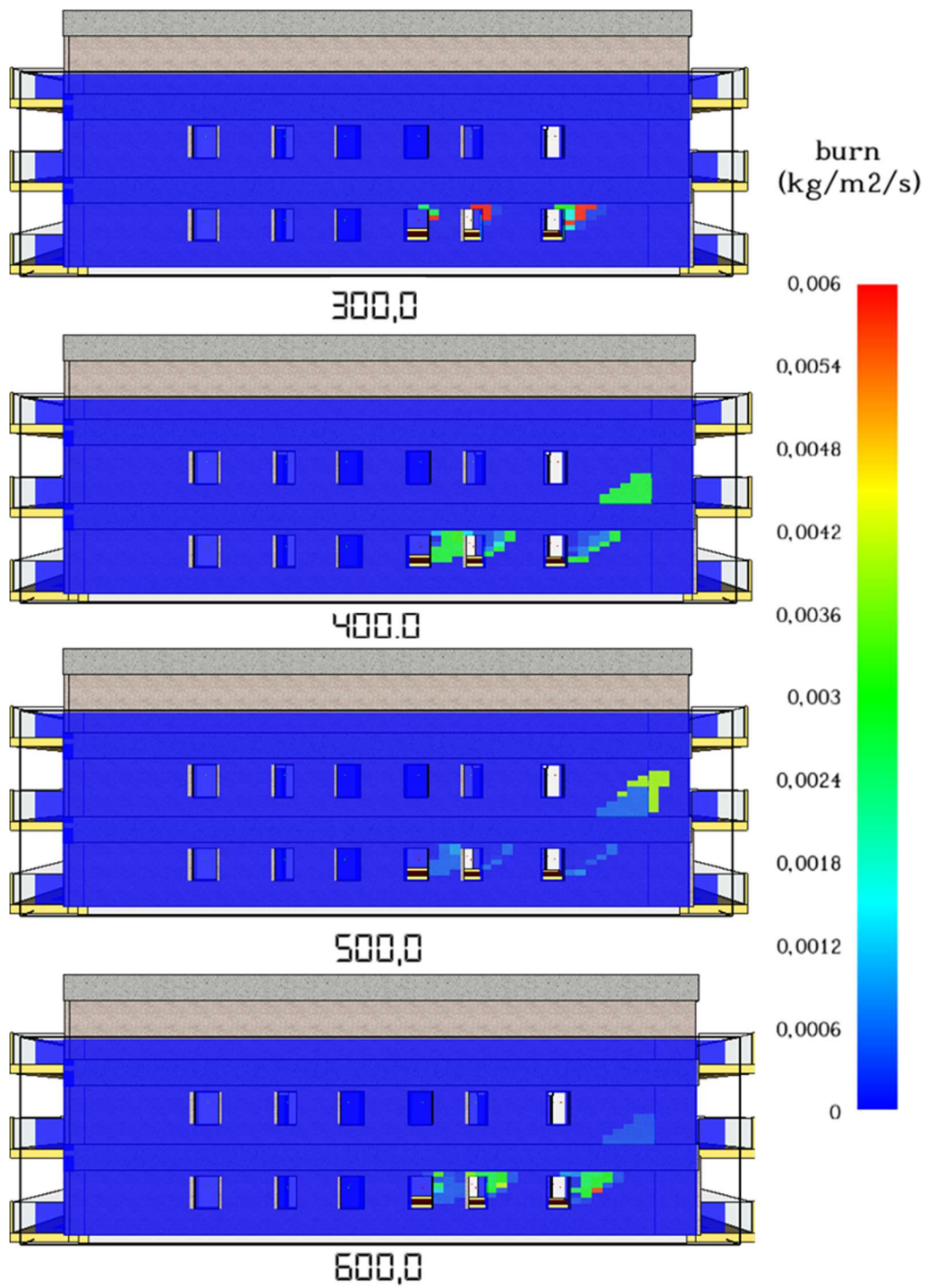


Figura 85TLF2P_EF_02 Burning Rate Time step 300, 400, 500, 600 secondi

Incident Heat Flux

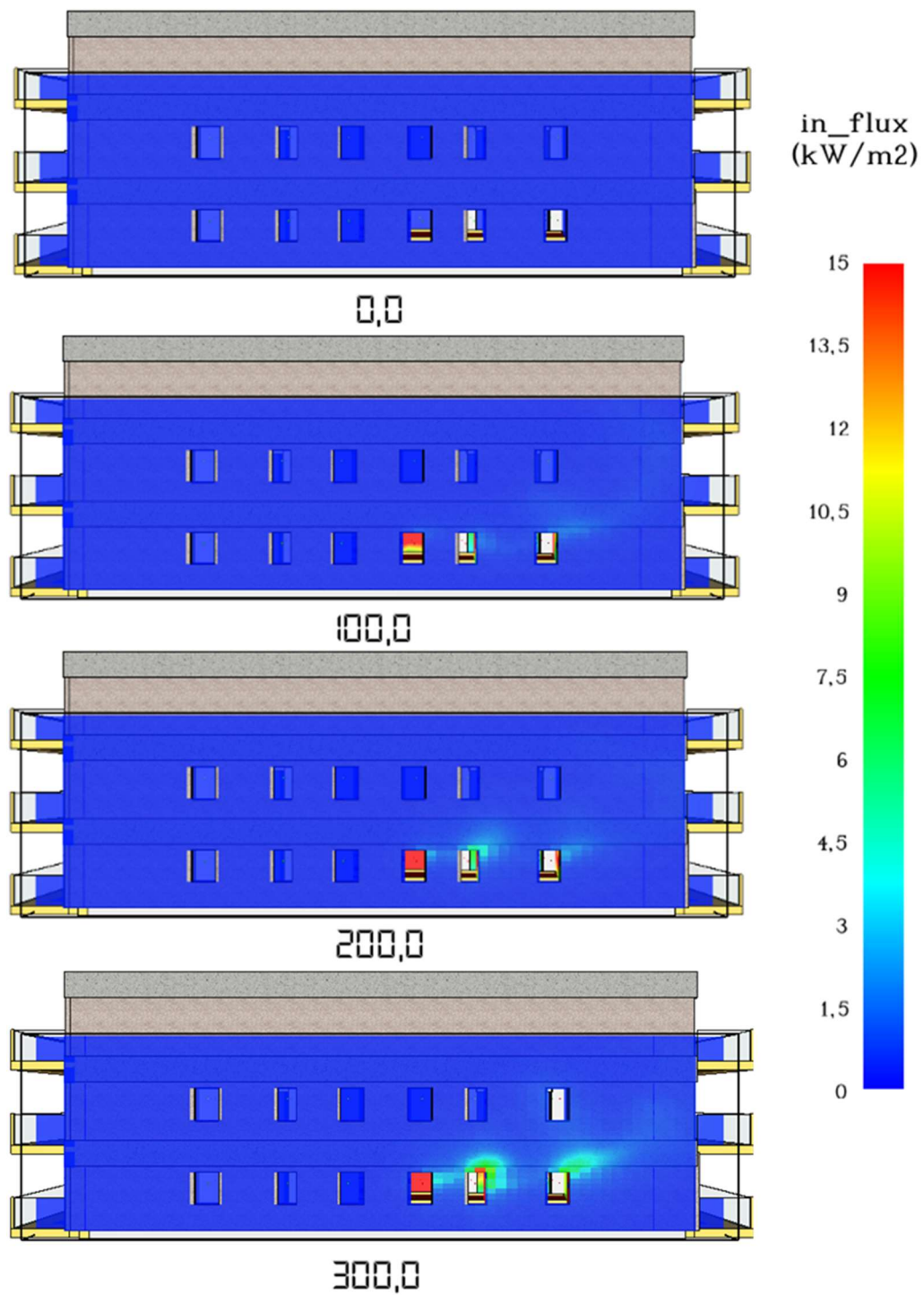


Figura 86 TLF2P_EF_02 Incident Heat Flux Time step 0, 100, 200, 300 secondi

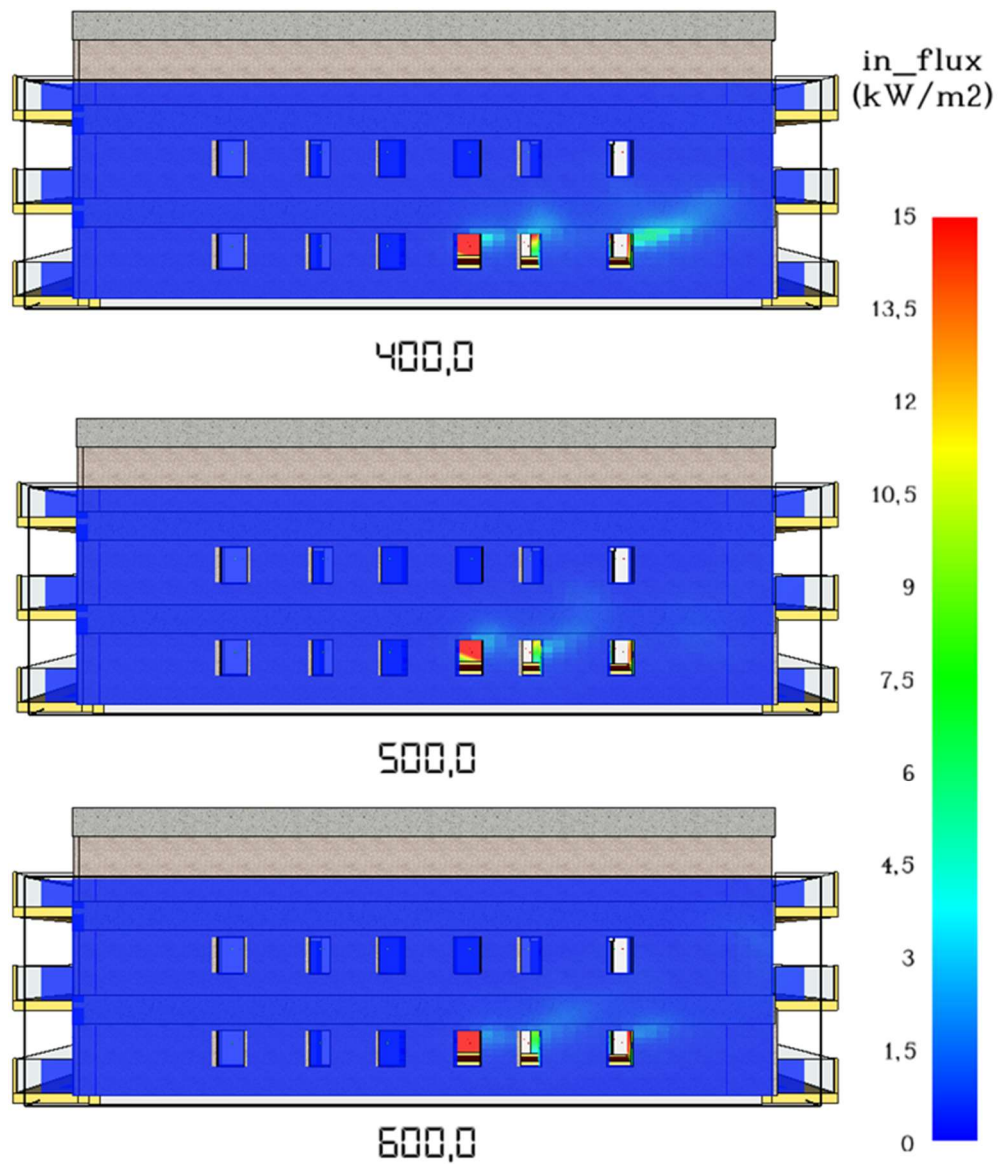


Figura 87 TLF2P_EF_02 Incident Heat Flux Time step 400, 500, 600 secondi

Wall Temperature

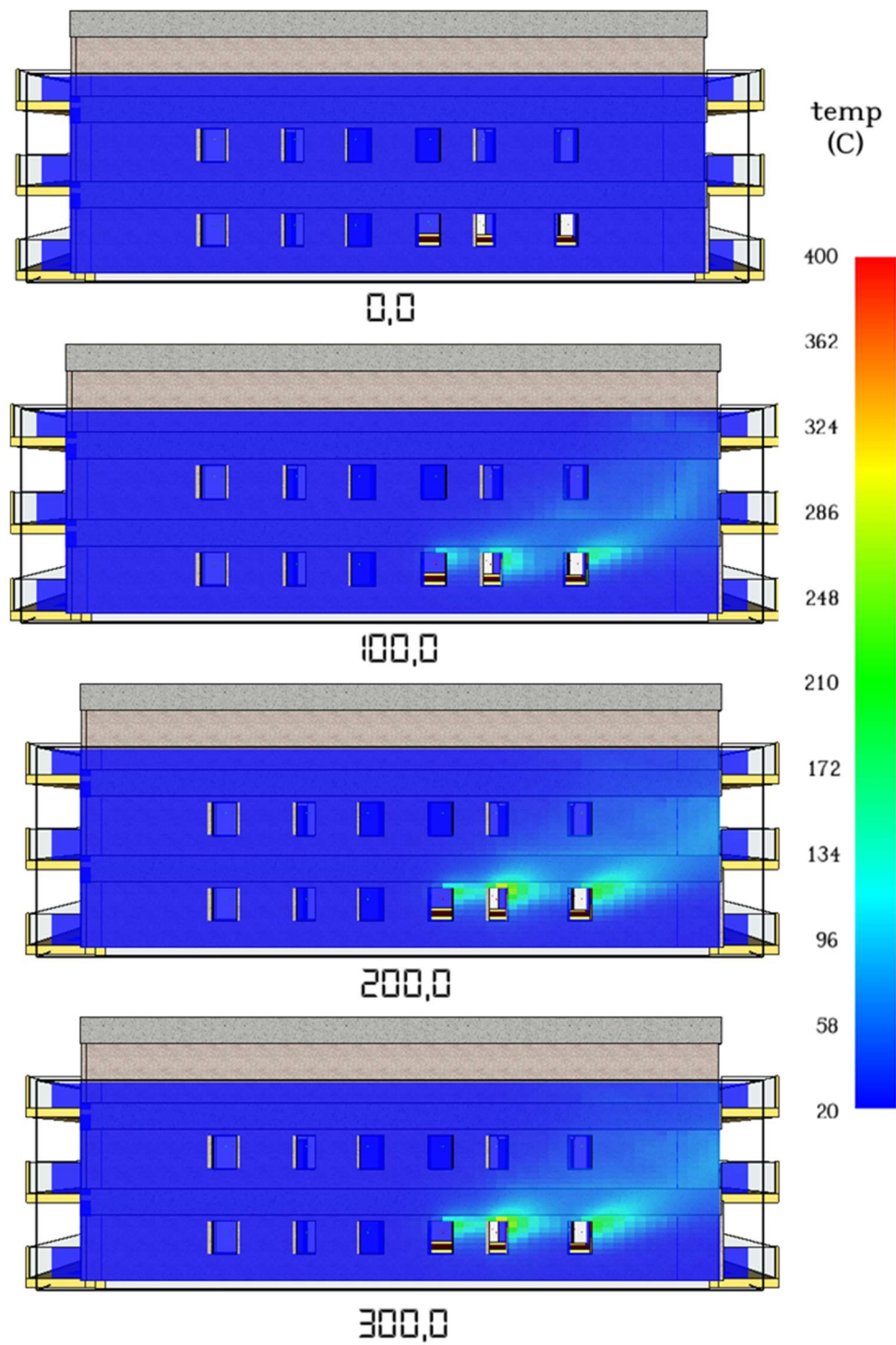


Figura 88 TLF2P_EF_02 Wall Temperature Time step 0, 100, 200, 300 secondi

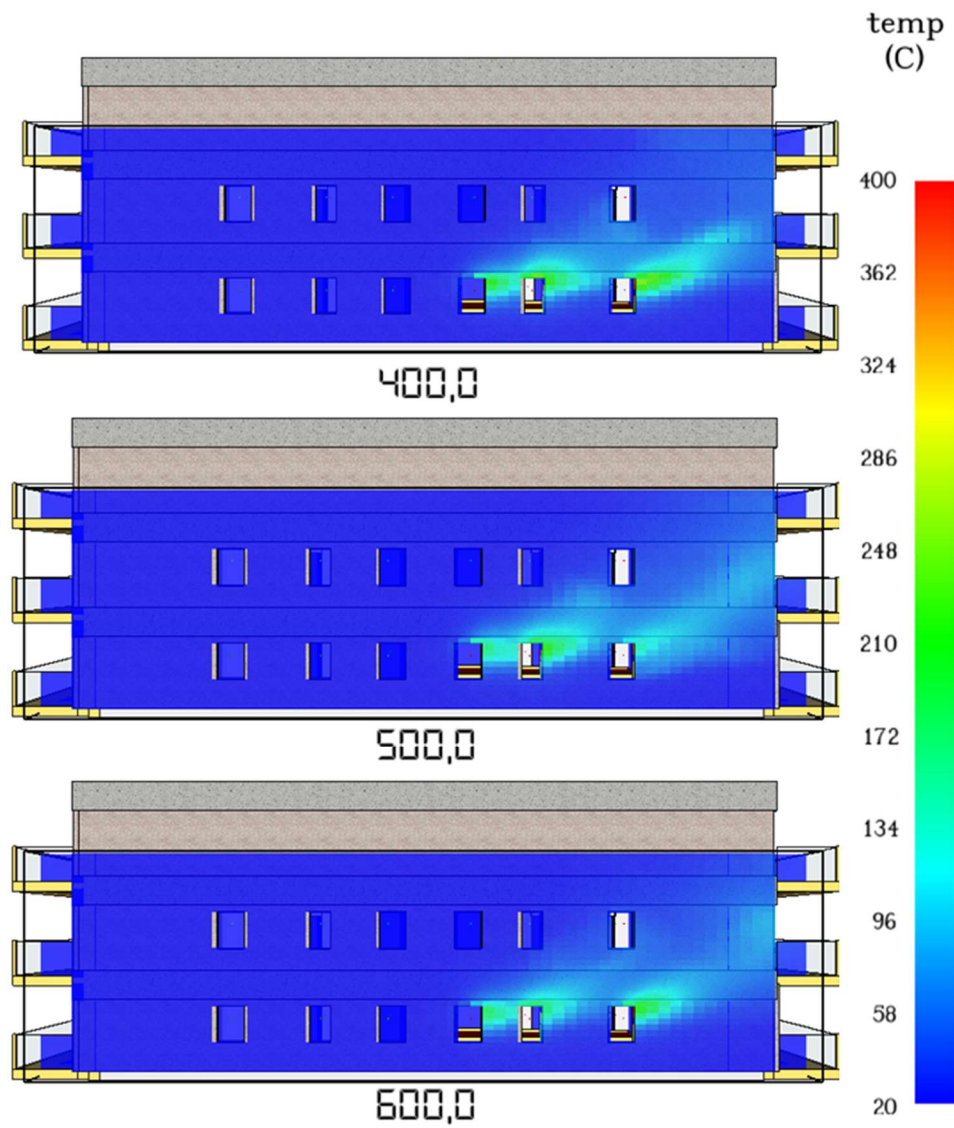


Figura 89 TLF2P_EF_02 Wall Temperature Time step 400, 500, 600 secondi

5.1.6 Scenario TLF2P_EF_03

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_EF_03	2 Piani	EPS + Fasce	\	\

Il seguente scenario differisce dal precedente esclusivamente per l'assenza di vento, mentre le caratteristiche costruttive restano le medesime.

Burning Rate

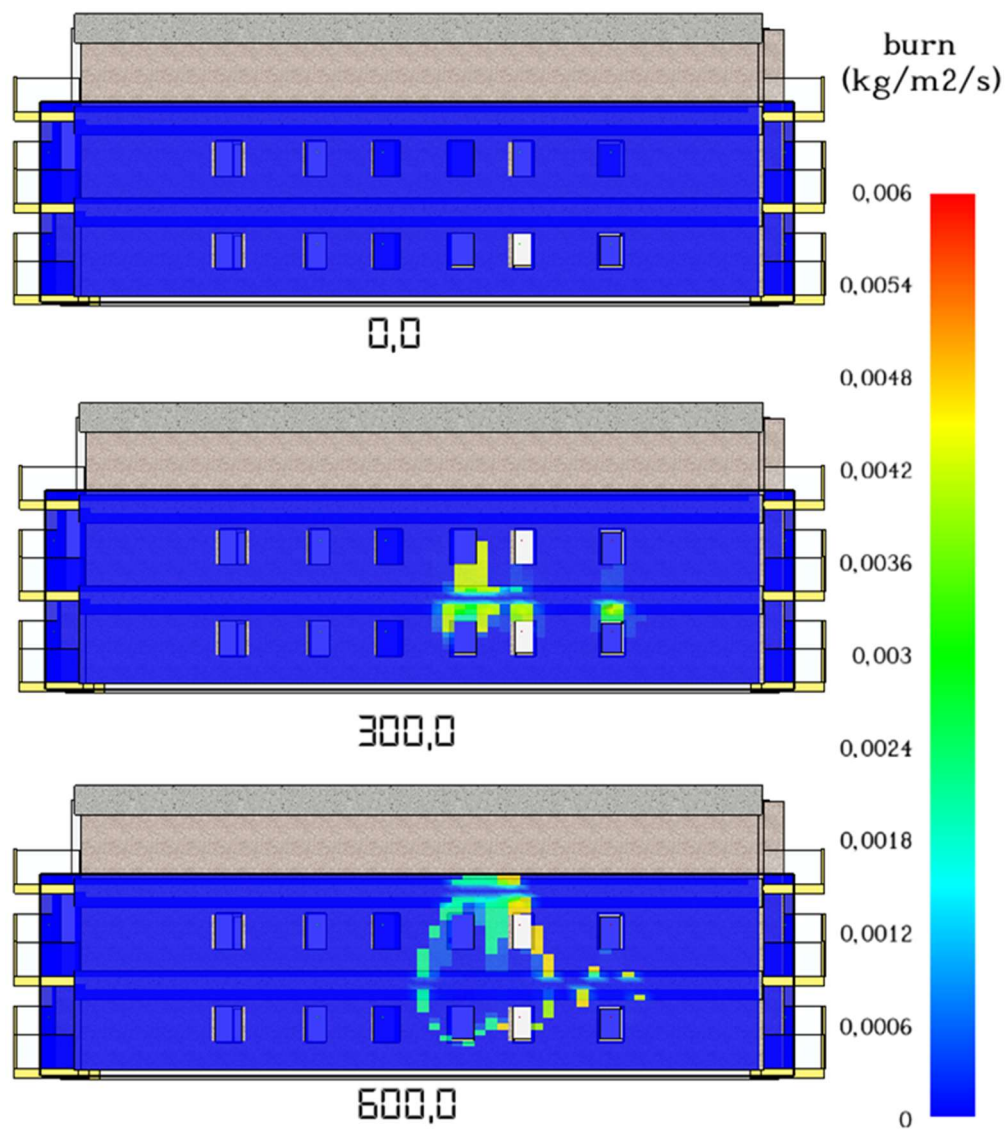


Figura 90 TLF2P_EF_03 Burning Rate Time step 0, 300, 600 secondi

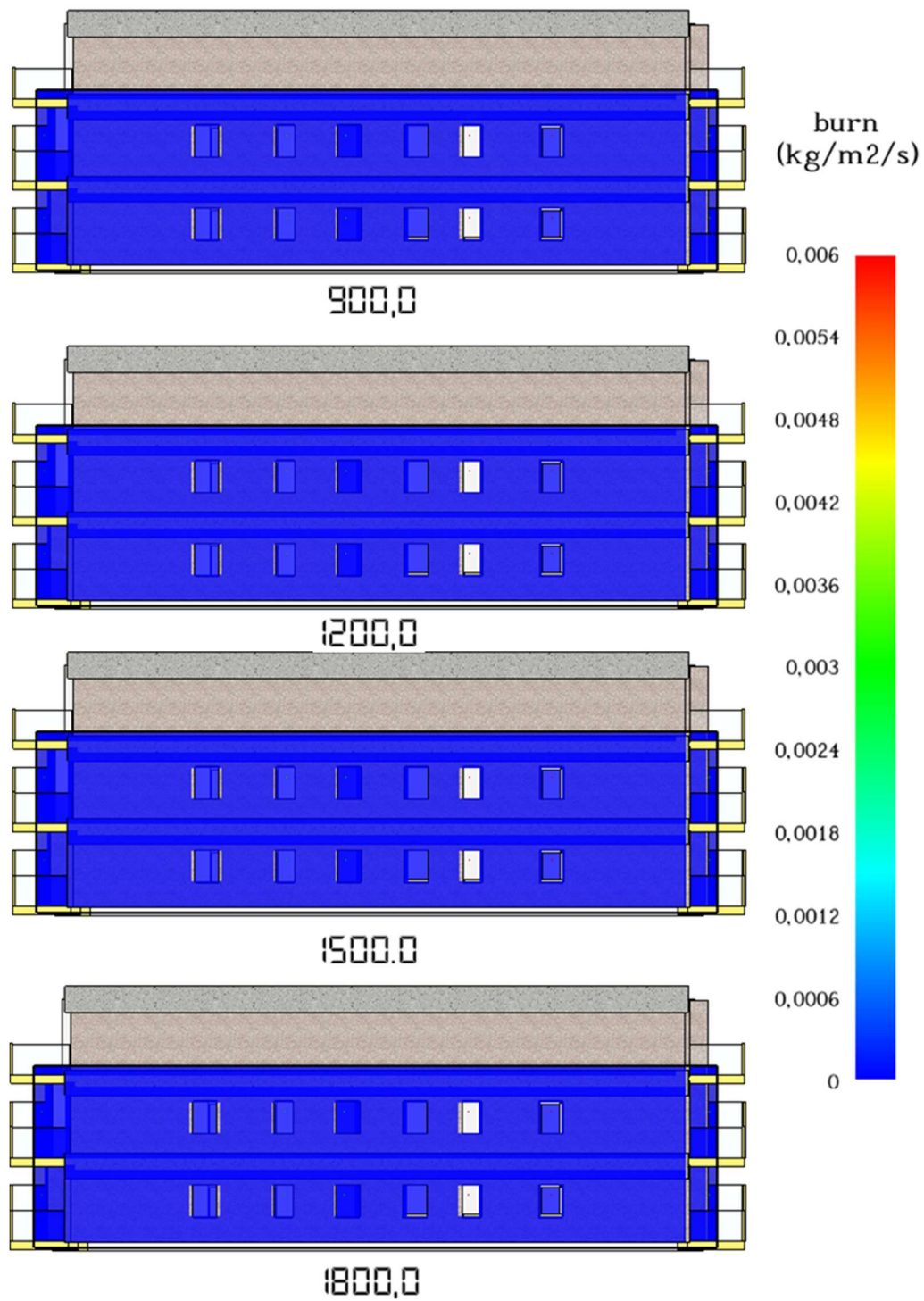


Figura 91 TLF2P_EF_03 Burning Rate Time step 900, 1200, 1500, 1800 secondi

Incident Heat Flux

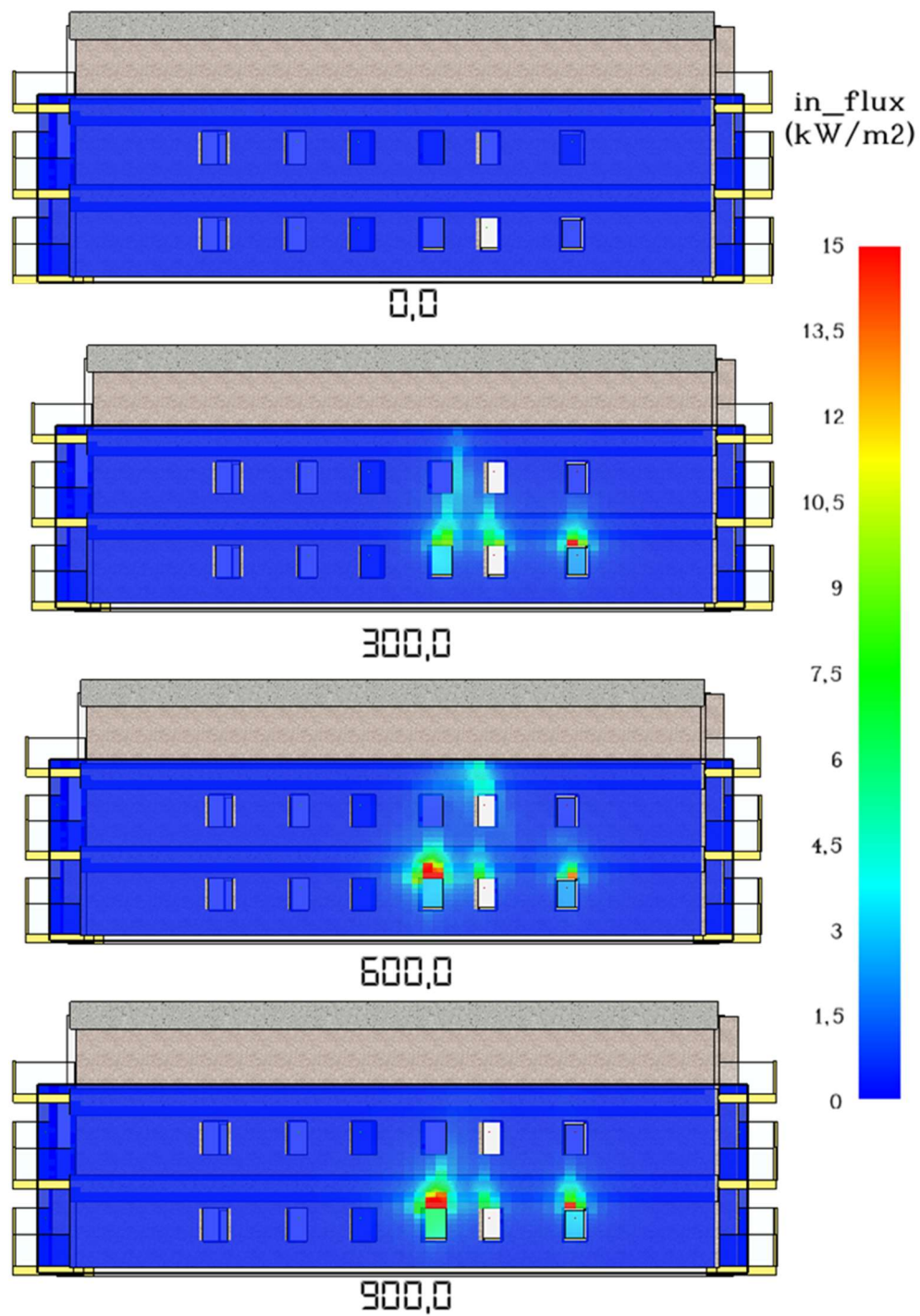


Figura 92 TLF2P_EF_03 Incident Heat Flux Time step 0, 300, 600, 900 secondi

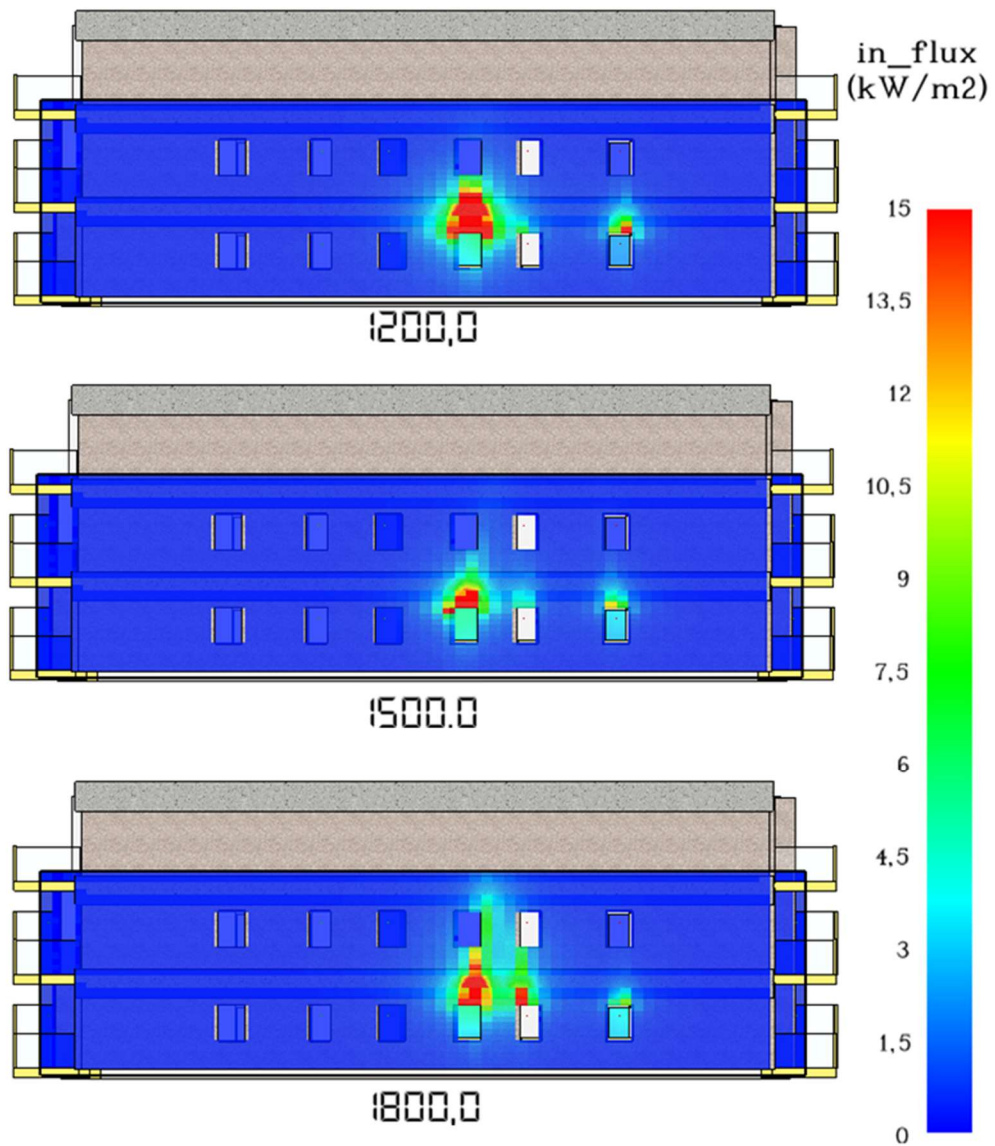


Figura 93 TLF2P_EF_03 Incident Heat Flux Time step 1200, 1500, 1800 secondi

Wall Temperature

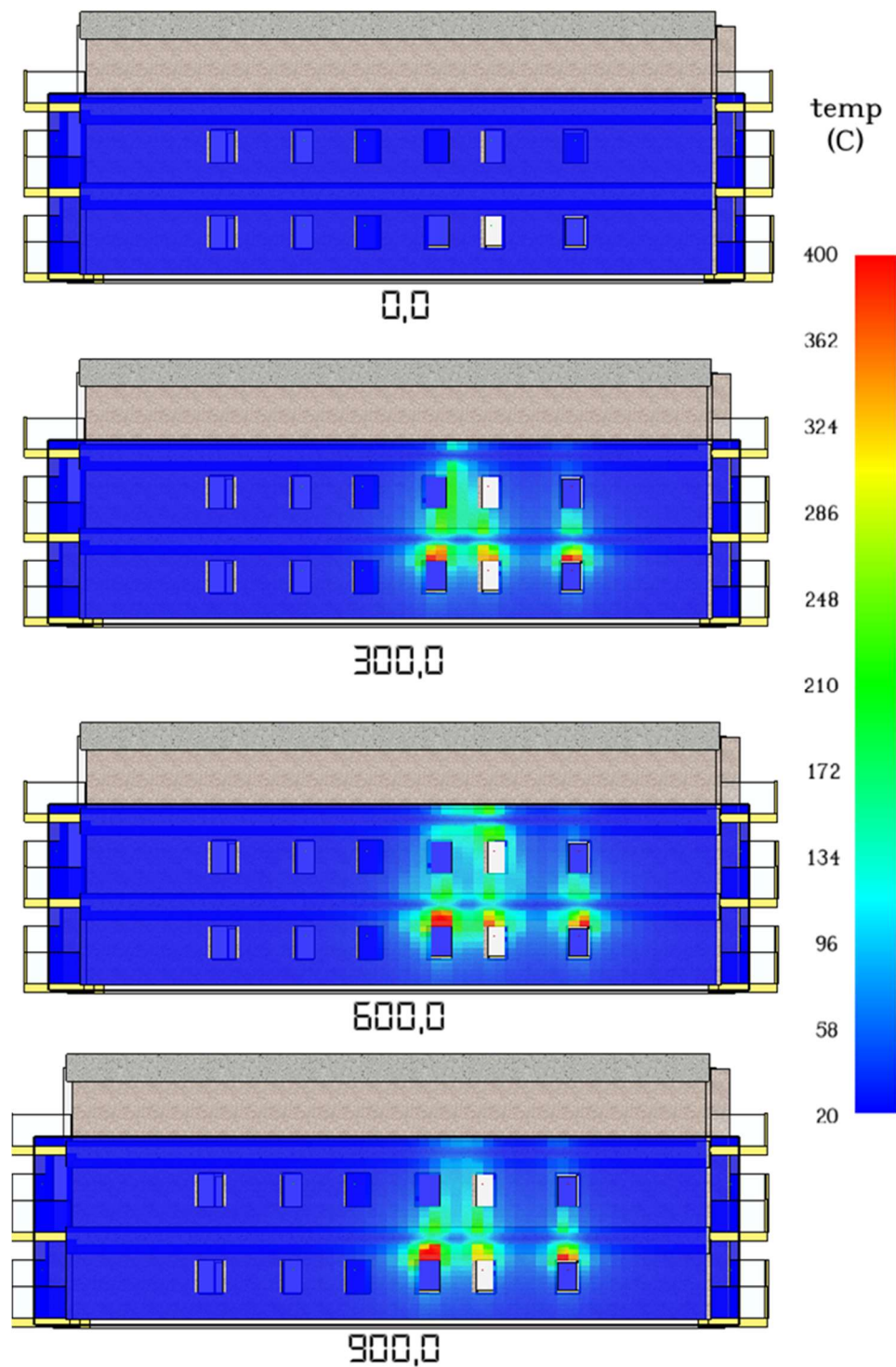


Figura 94 TLF2P_EF_03 Wall Temperature Time step 0, 300, 600, 900 secondi

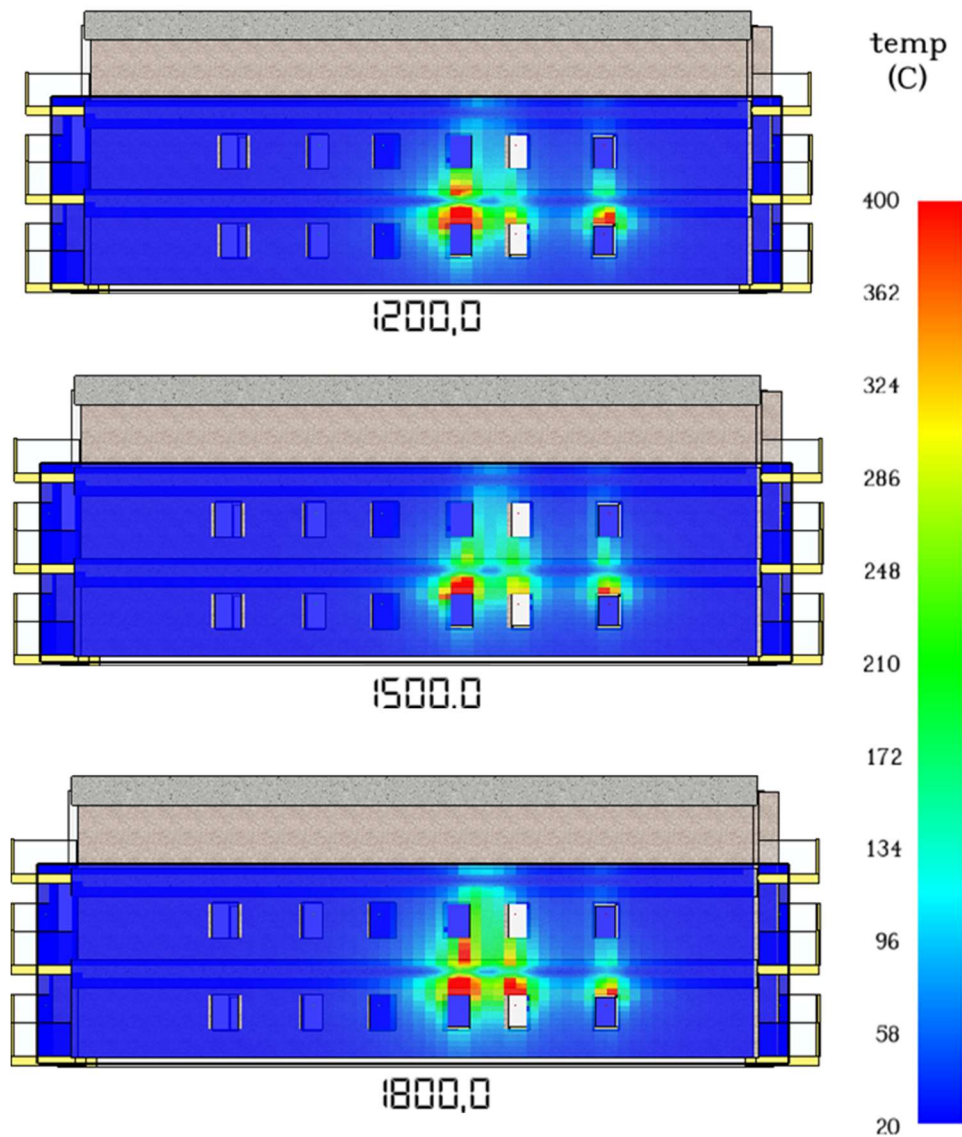


Figura 95 TLF2P_EF_03 Wall Temperature Time step 1200, 1500, 1800 secondi

Al termine delle simulazioni risulta evidente che è presente una significativa propagazione dell'incendio che non viene apparentemente rallentata dalla presenza delle fasce di separazione, ma i risultati saranno valutati ulteriormente attraverso il confronto con le altre soluzioni progettuali.

5.1.7 Scenario TLF2P_ES_01

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_ES_01	2 Piani	EPS + Sporti	Est	2m/s

Il seguente set di simulazioni evidenzia i risultati per la configurazione che prevede come materiale utilizzato per l'isolamento l'EPS e come protezione passiva atta ad impedire la propagazione gli elementi aggettanti "sporti". In questo scenario viene analizzata la situazione in cui il vento proviene da Est a 2m/s.

Burning Rate

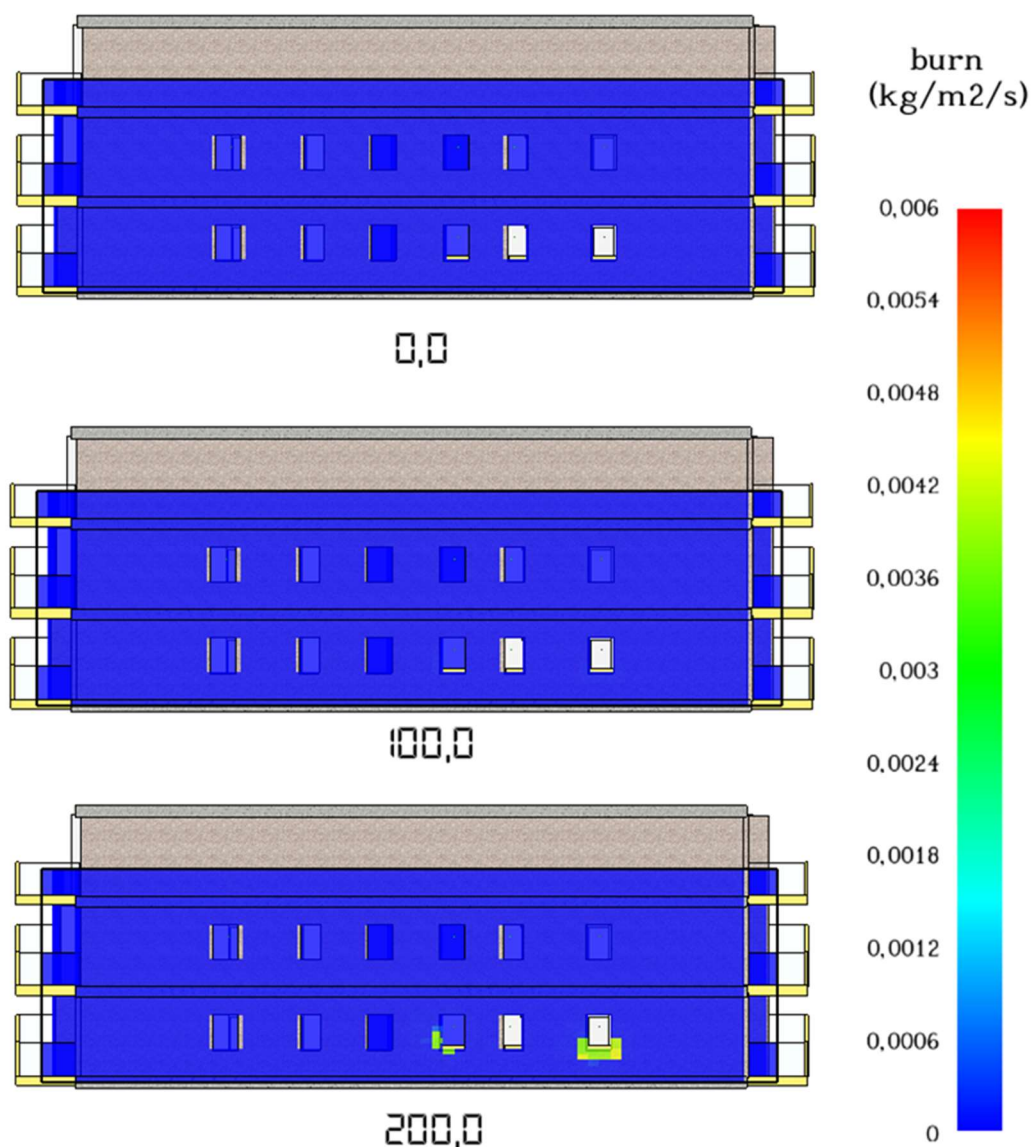


Figura 96 TLF2P_ES_01 Burning Rate Time step 0, 100, 200 secondi

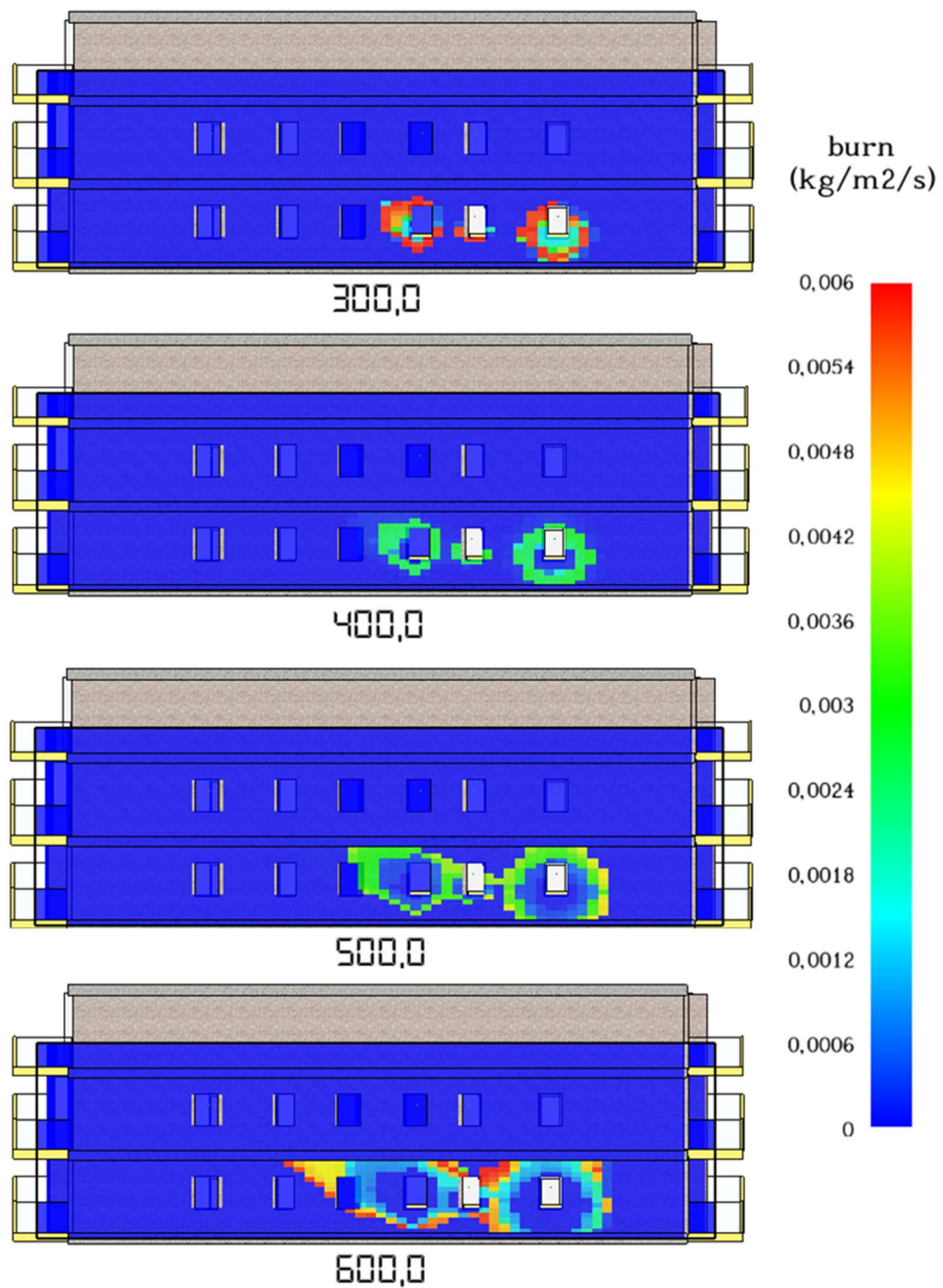


Figura 97 TLF2P_ES_01 Burning Rate Time step 300, 400, 500, 600 secondi

Incident Heat Flux

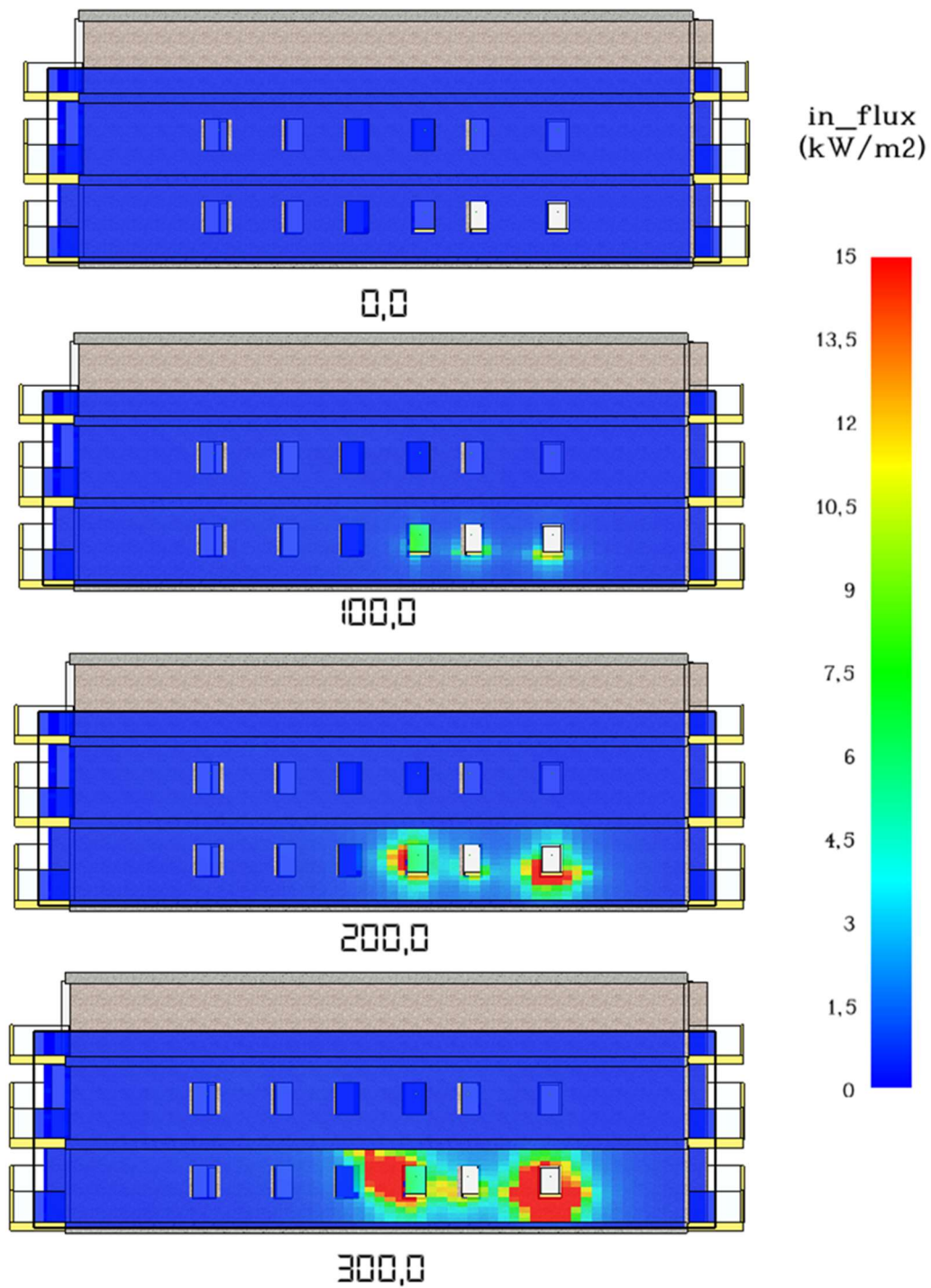


Figura 98 TLF2P_ES_01 Incident Heat Flux Time step 0, 100, 200 , 300 secondi

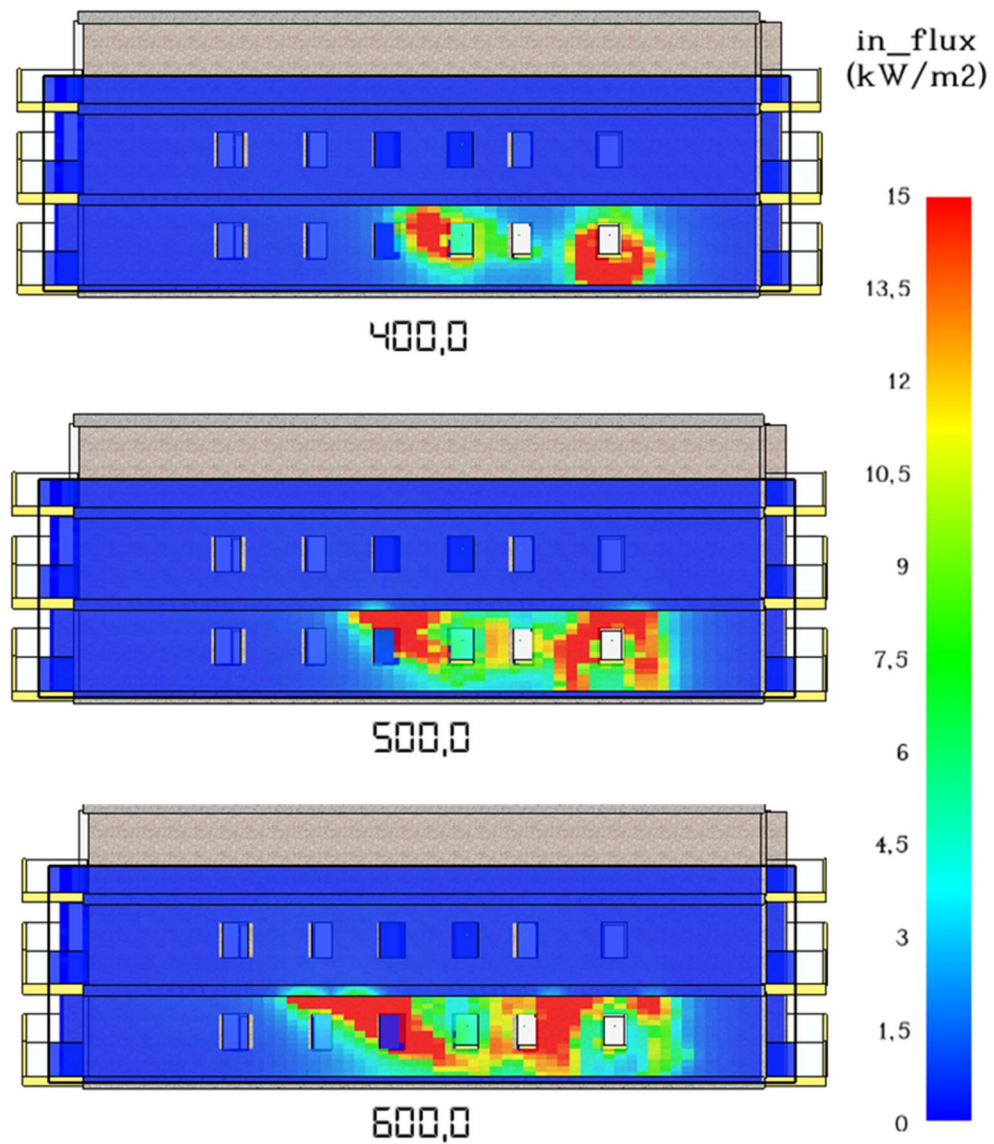


Figura 99 TLF2P_ES_01 Incident Heat Flux Time step 400, 500 , 600 secondi

Wall Temperature

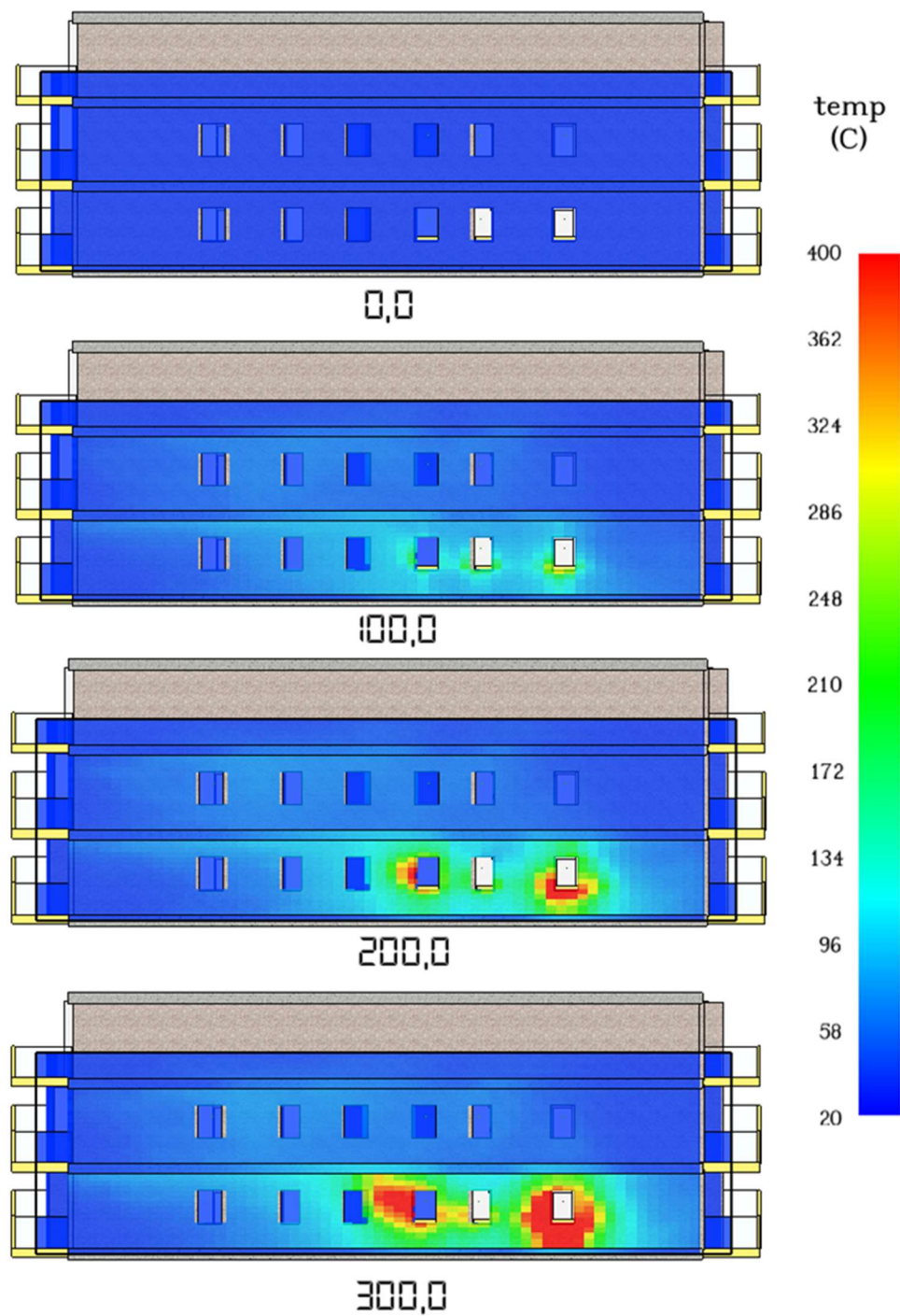


Figura 100 TLF2P_ES_01 Wall Temperature Time step 0, 100, 200, 300 secondi

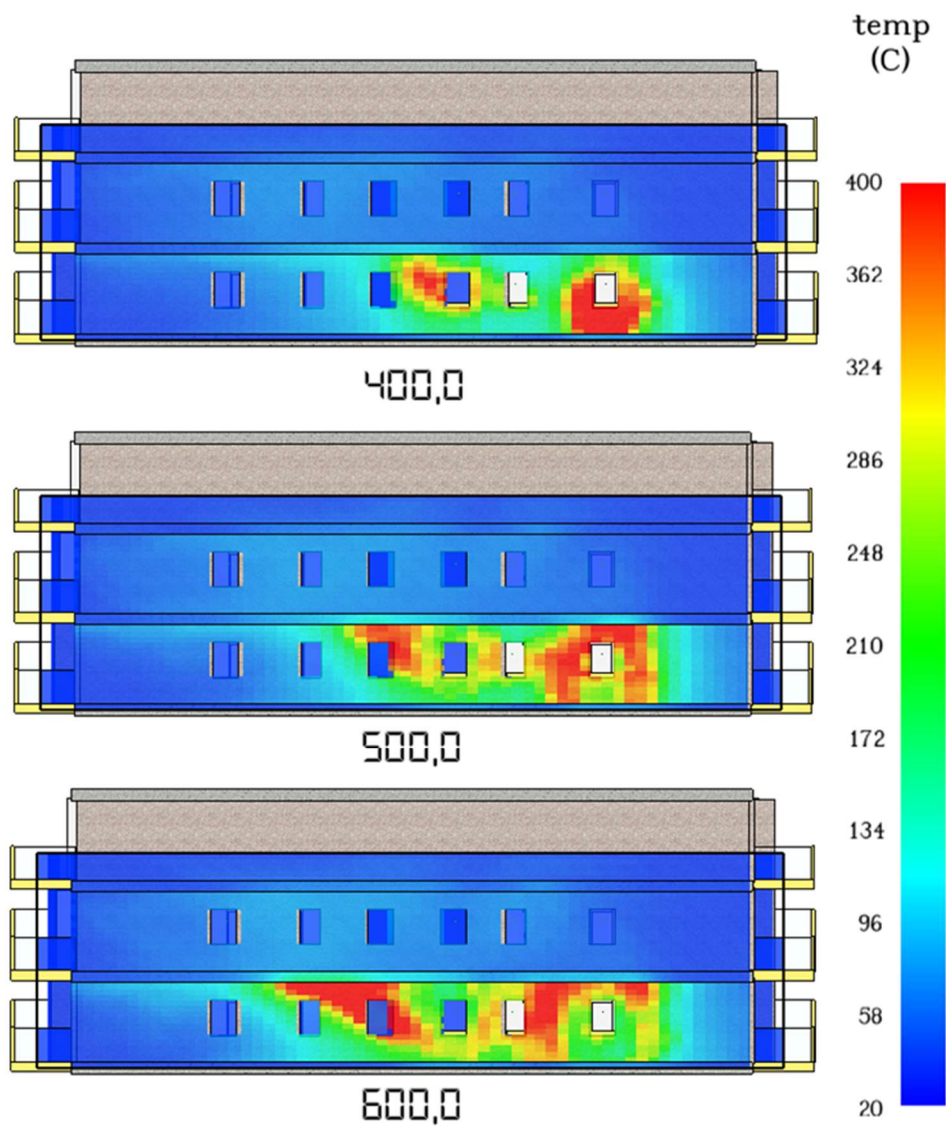


Figura 101 TLF2P_ES_01 Wall Temperature Time step 400, 500, 600 secondi

5.1.8 Scenario TLF2P_ES_02

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_ES_02	2 Piani	EPS + Fasce	Nord	2m/s

In questo scenario sono state ripetute le caratteristiche geometriche e di materiali, con la variazione della direzione del vento, in questo caso proveniente da Nord a 2m/s.

Burning Rate

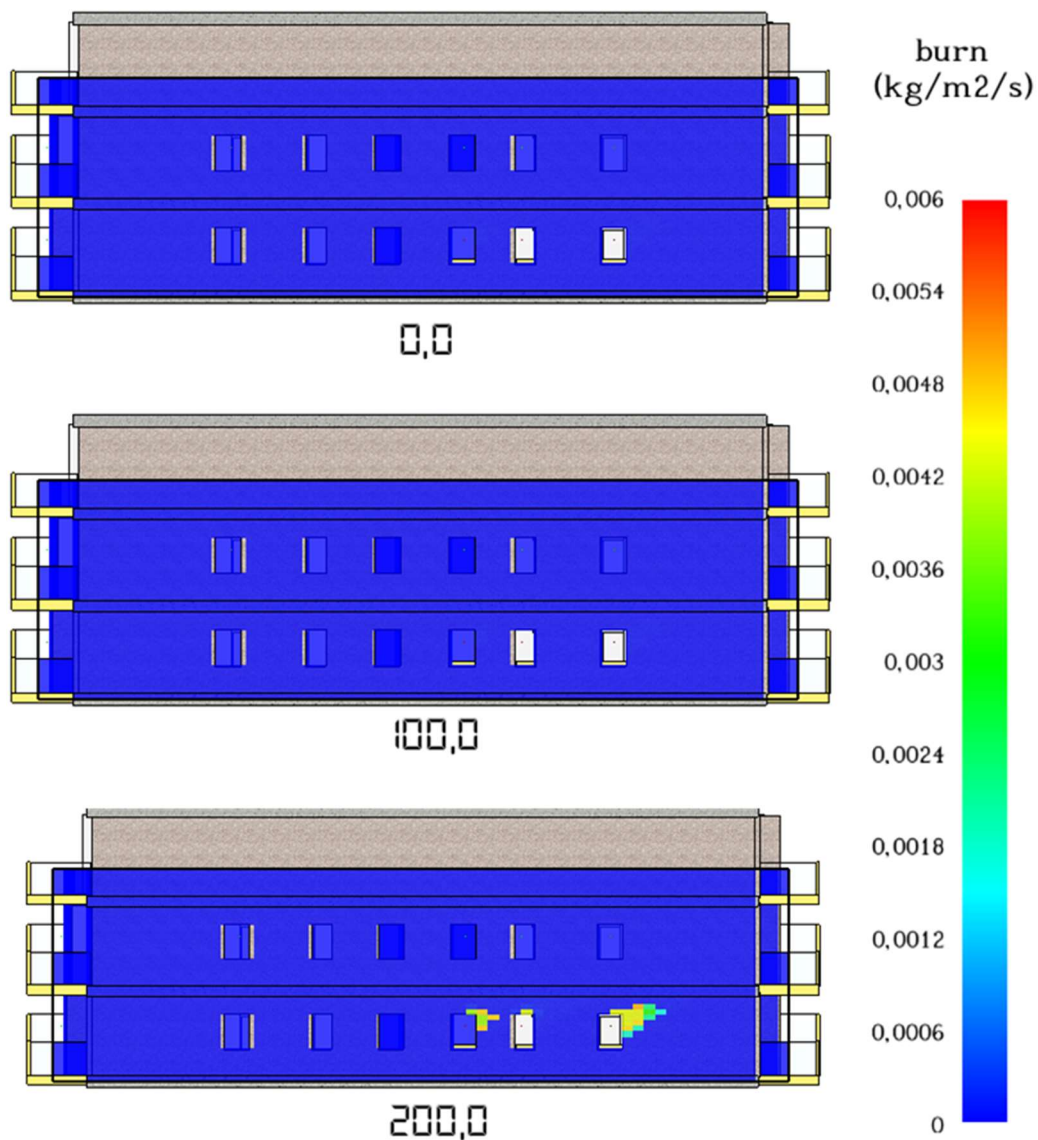


Figura 102 TLF2P_ES_02 Burning Rate Time step 0, 100, 200 secondi

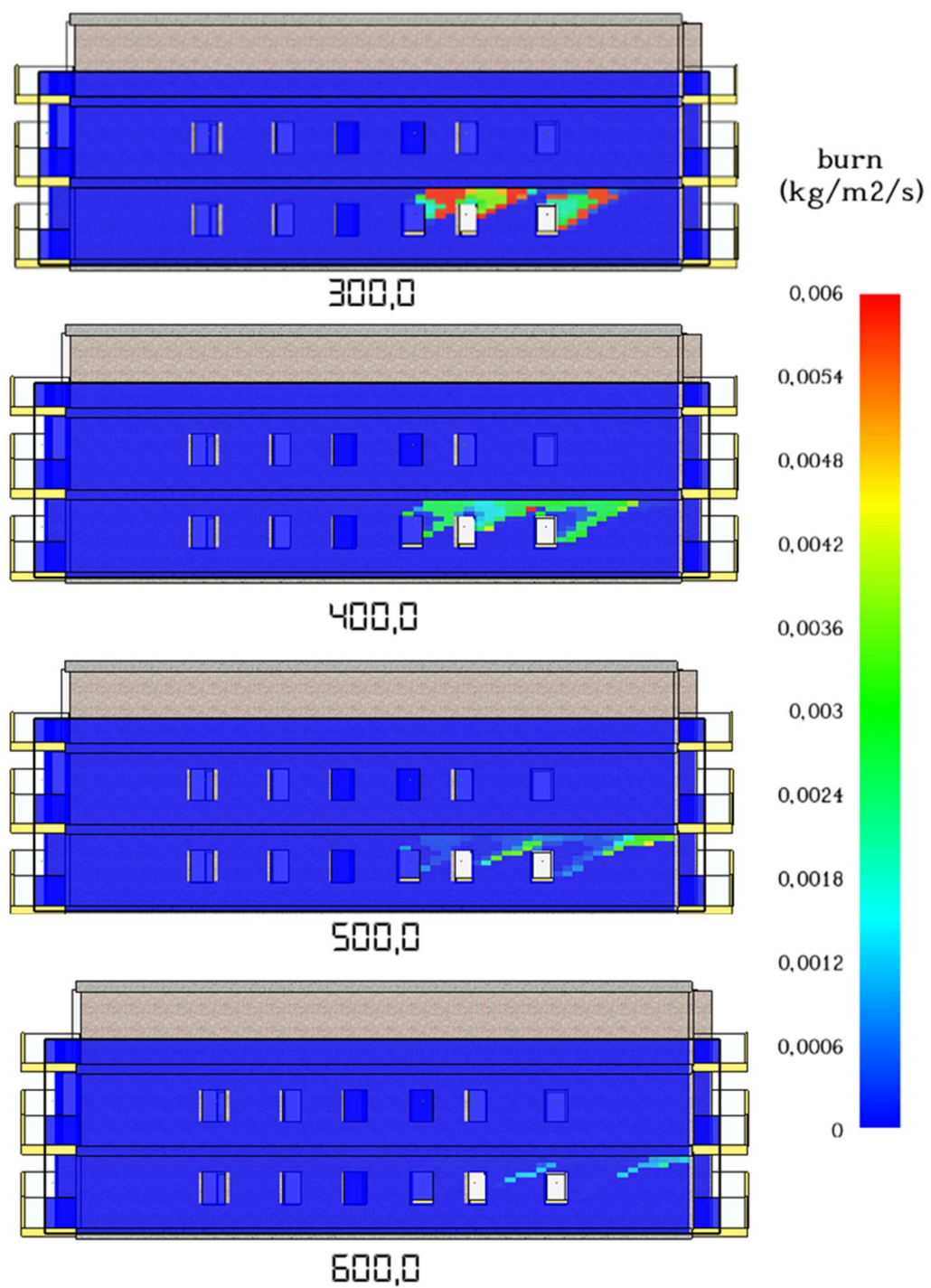


Figura 103 TLF2P_ES_02 Burning Rate Time step 300, 400, 500, 600 secondi

Incident Heat Flux

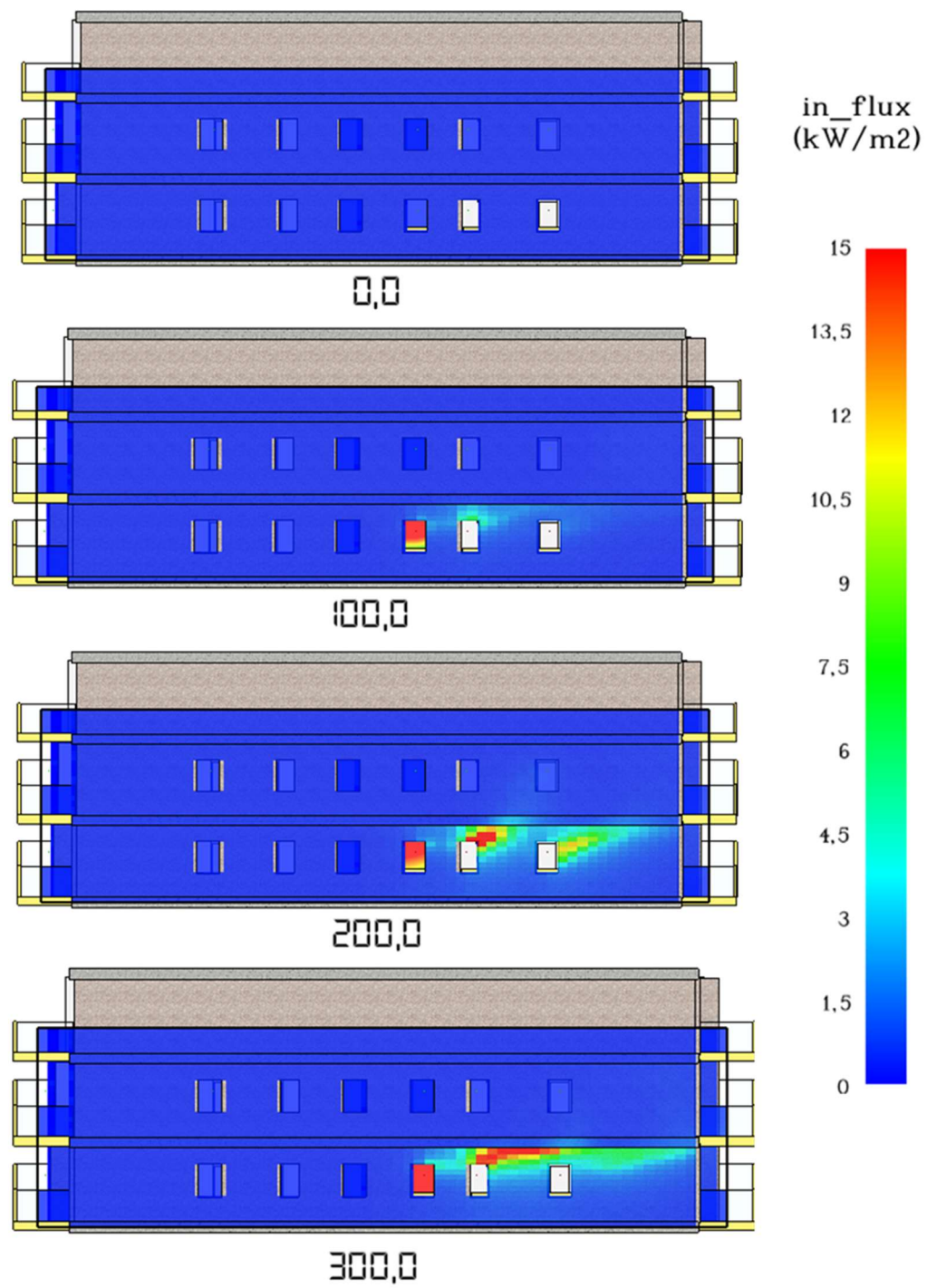


Figura 104 TLF2P_ES_02 Incident Heat Flux Time step 0, 100, 200, 300 secondi

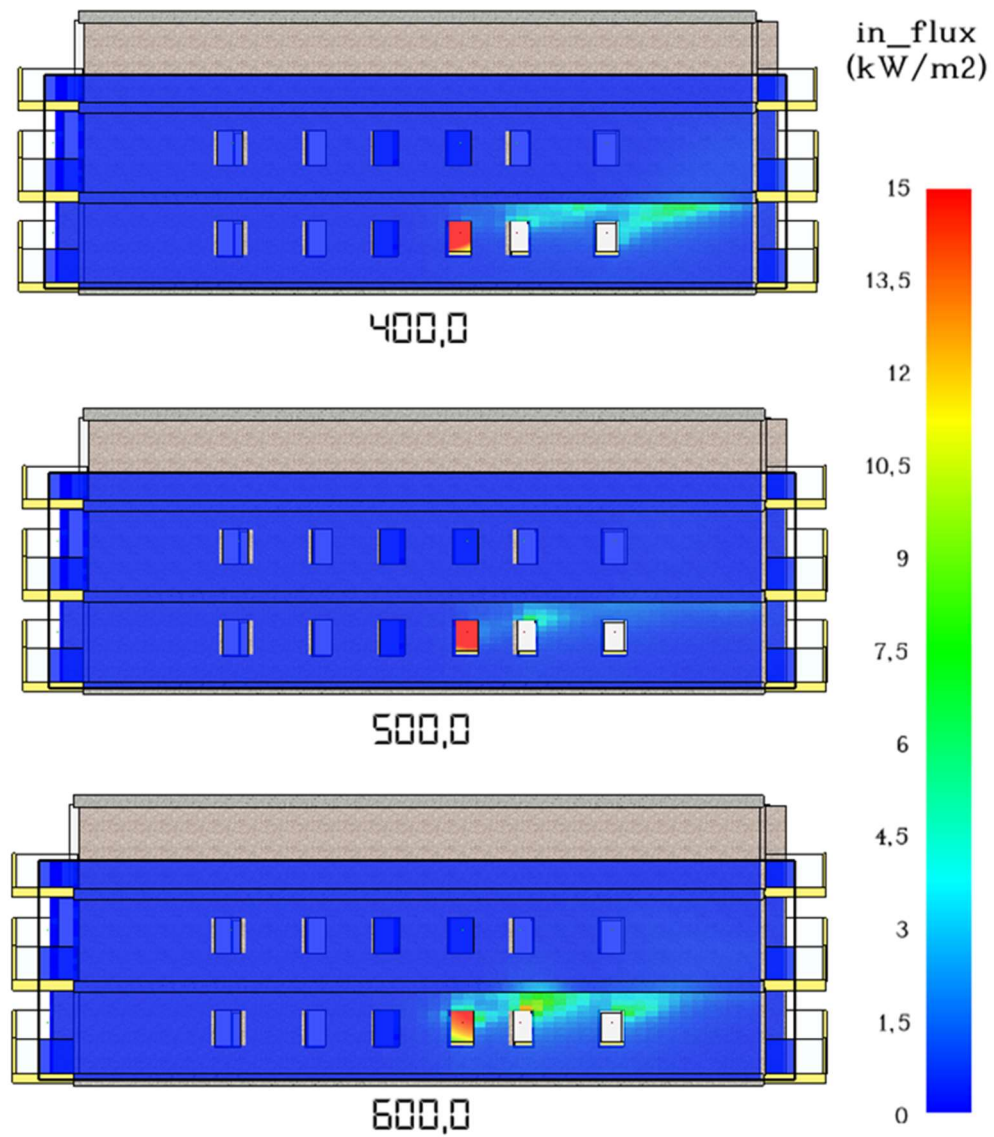


Figura 105 TLF2P_ES_02 Incident Heat Flux Time step 400, 500, 600 secondi

Wall Temperature

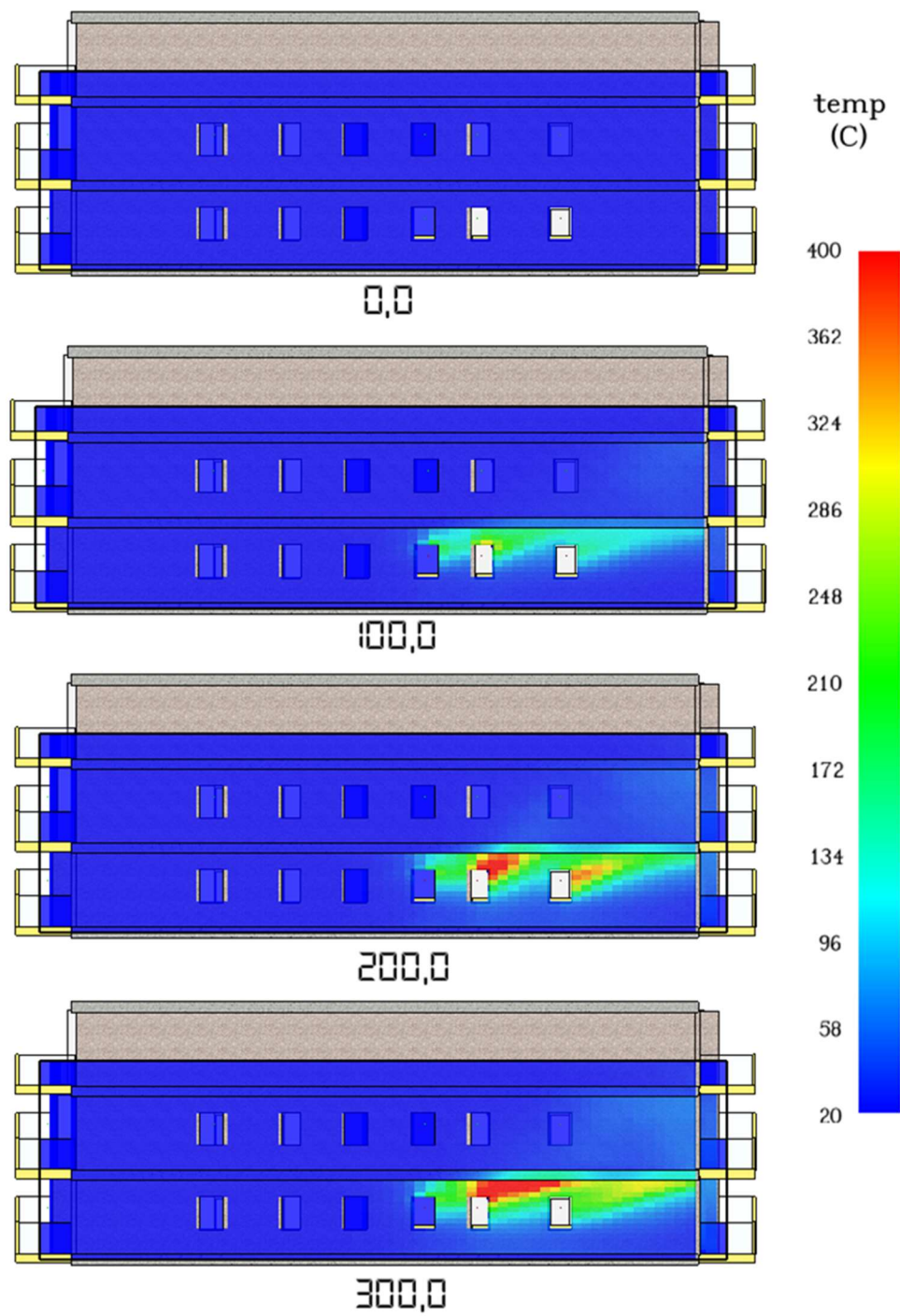


Figura 106 TLF2P_ES_02 Wall Temperature Time step 0, 100, 200, 300 secondi

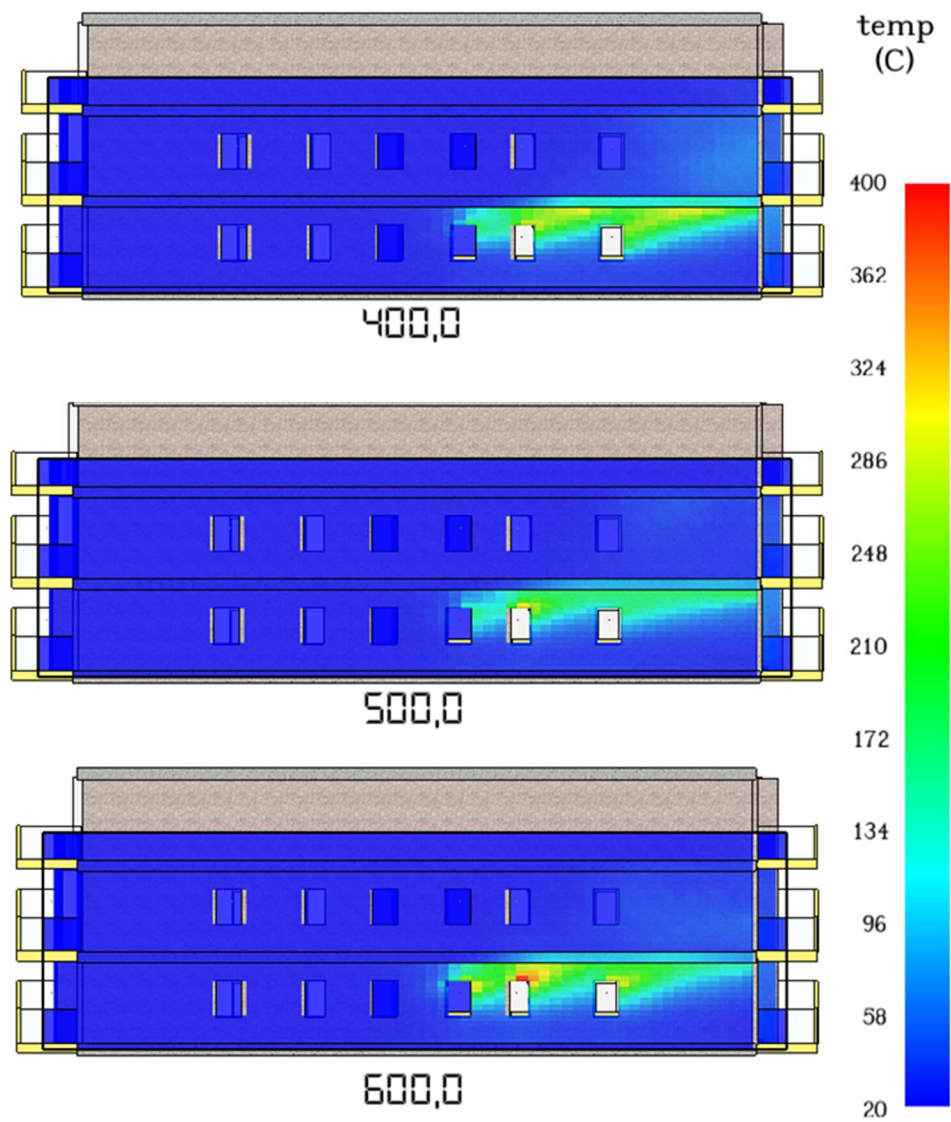


Figura 107 TLF2P_ES_02 Wall Temperature Time step 400, 500, 600 secondi

5.1.9 Scenario TLF2P_ES_03

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_ES_03	2 Piani	EPS + Sporti	\	\

In quest'ultimo scenario l'unica variazione rispetto ai precedenti è rappresentata dall'assenza di vento.

Burning Rate

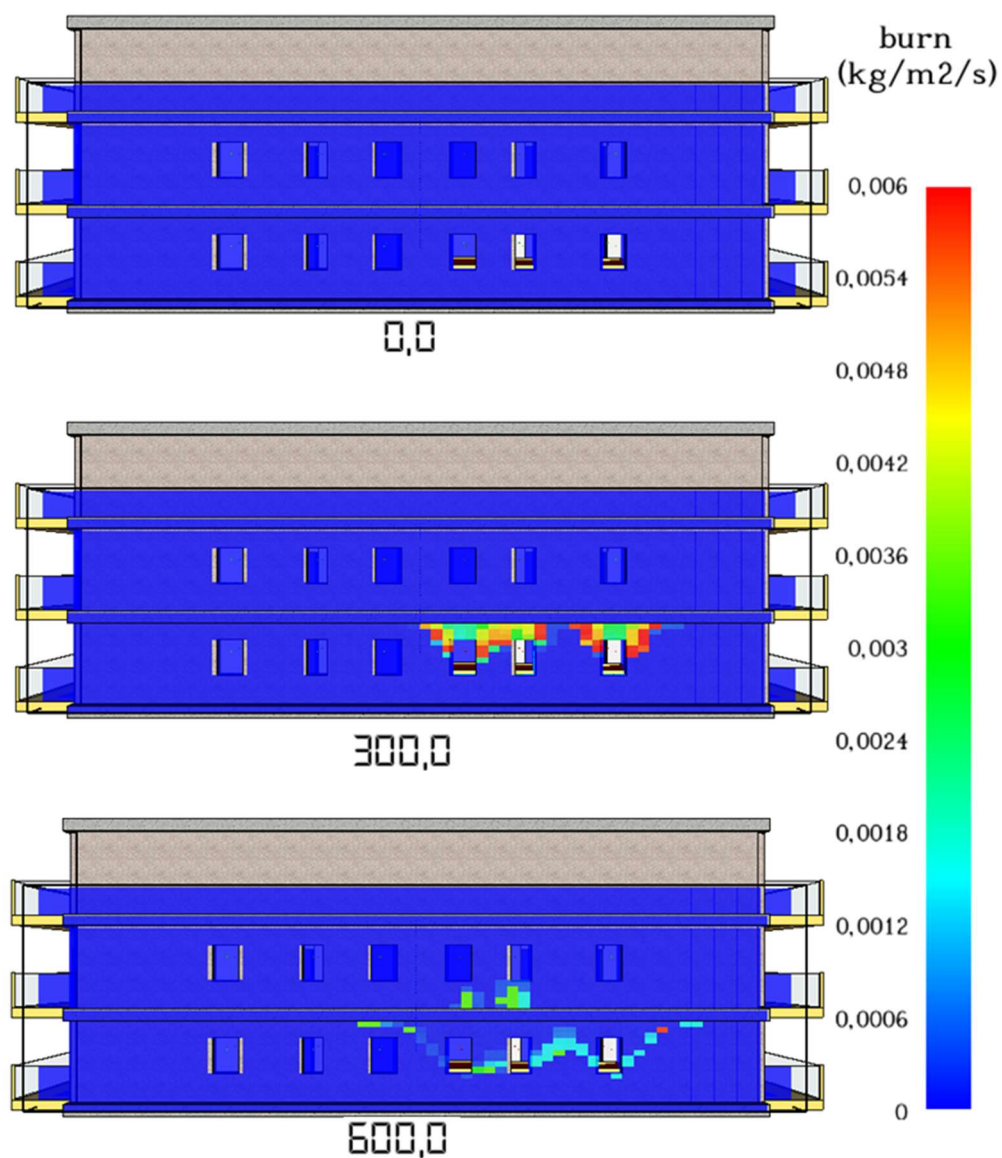


Figura 108 TLF2P_ES_03 Burning Rate Time step 0, 300, 600, 900 secondi

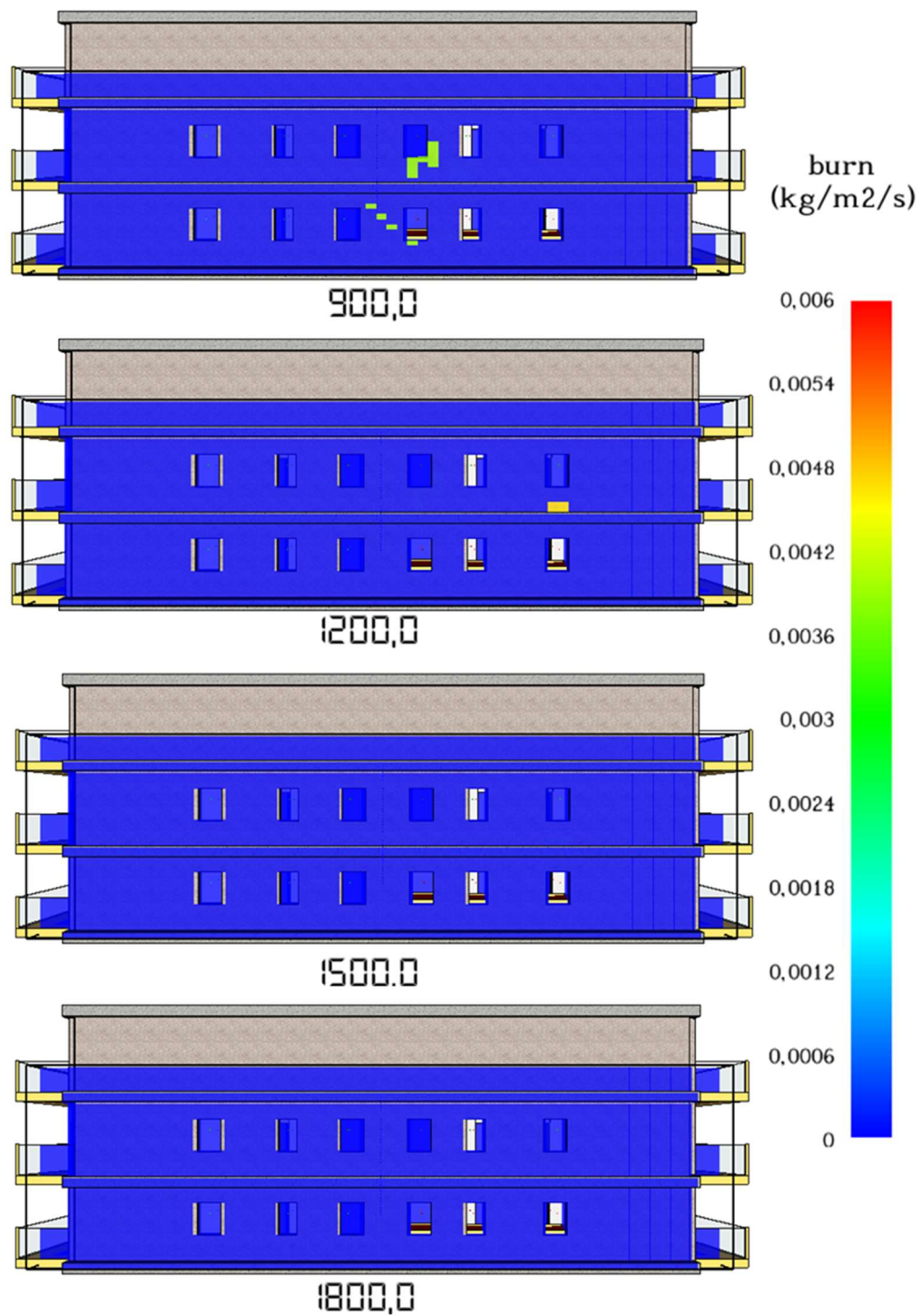


Figura 109 TLF2P_ES_03 Burning Rate Time step 900, 1200, 1500, 1800 secondi

Incident Heat Flux

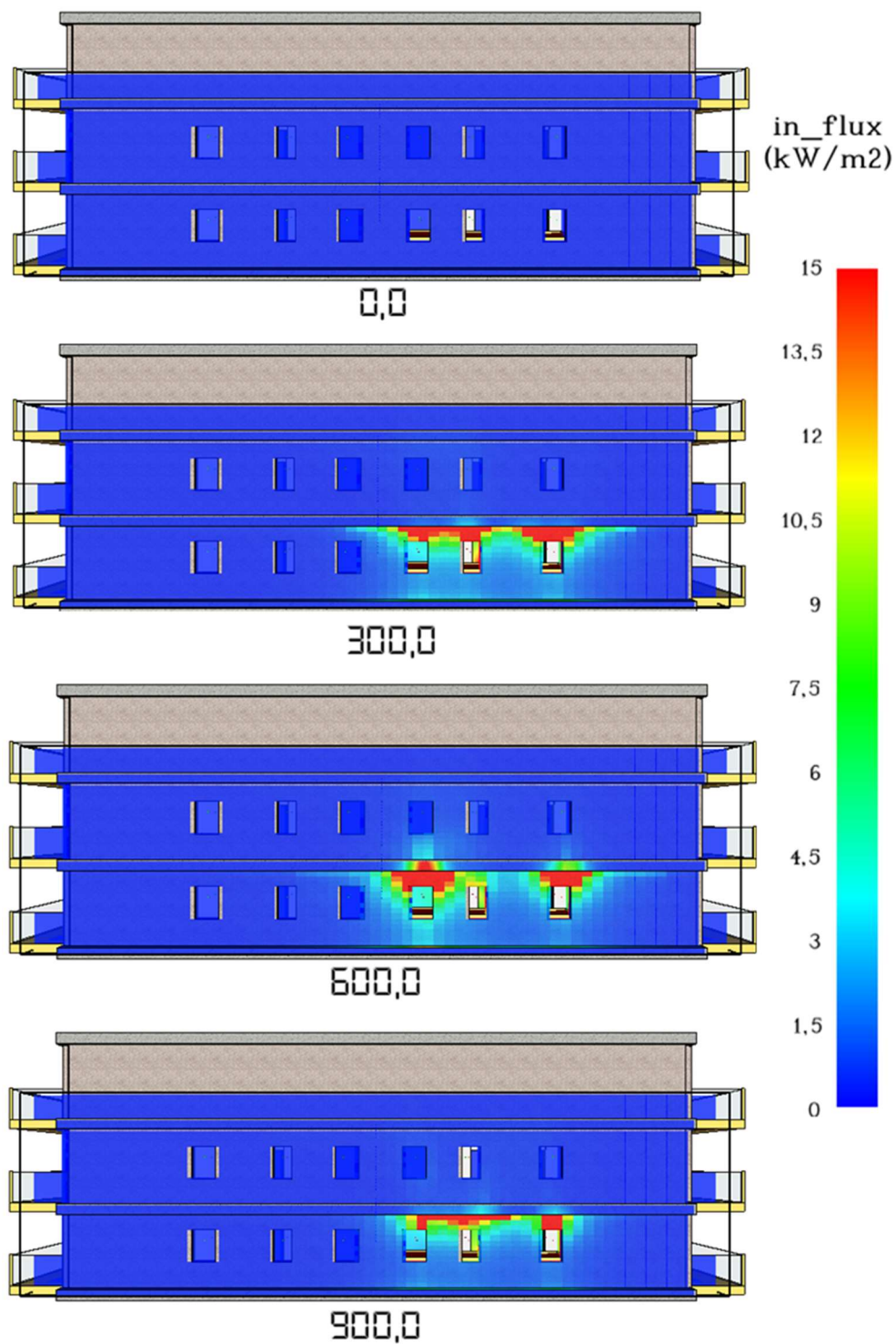


Figura 110 TLF2P_ES_03 Incident Heat Flux Time step 0, 300, 600, 900 secondi

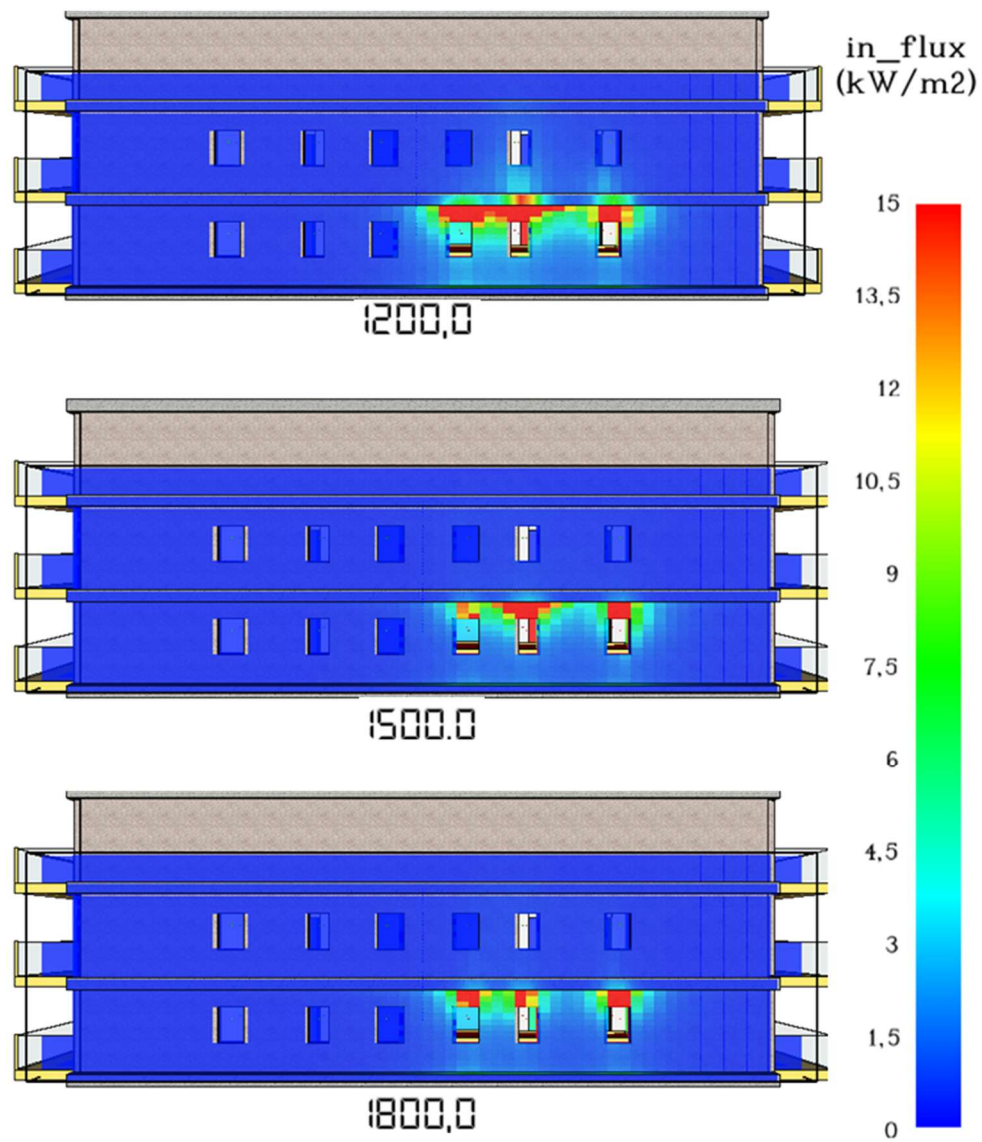


Figura 111 TLF2P_ES_03 Incident Heat Flux Time step 1200, 1500, 1800 secondi

Wall Temperature

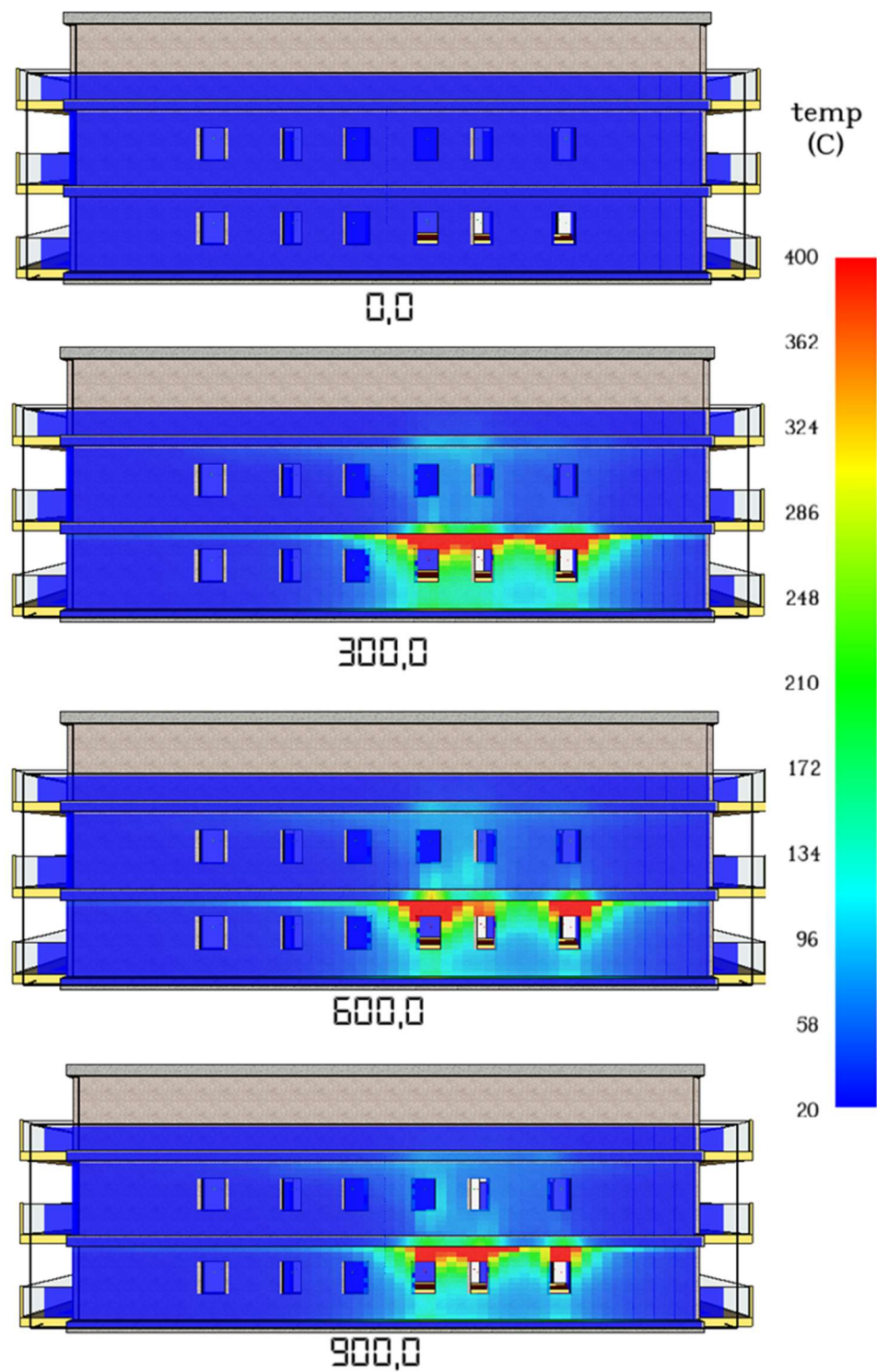


Figura 112 TLF2P_ES_03 Wall Temperature Time step 0, 300, 600, 900 secondi

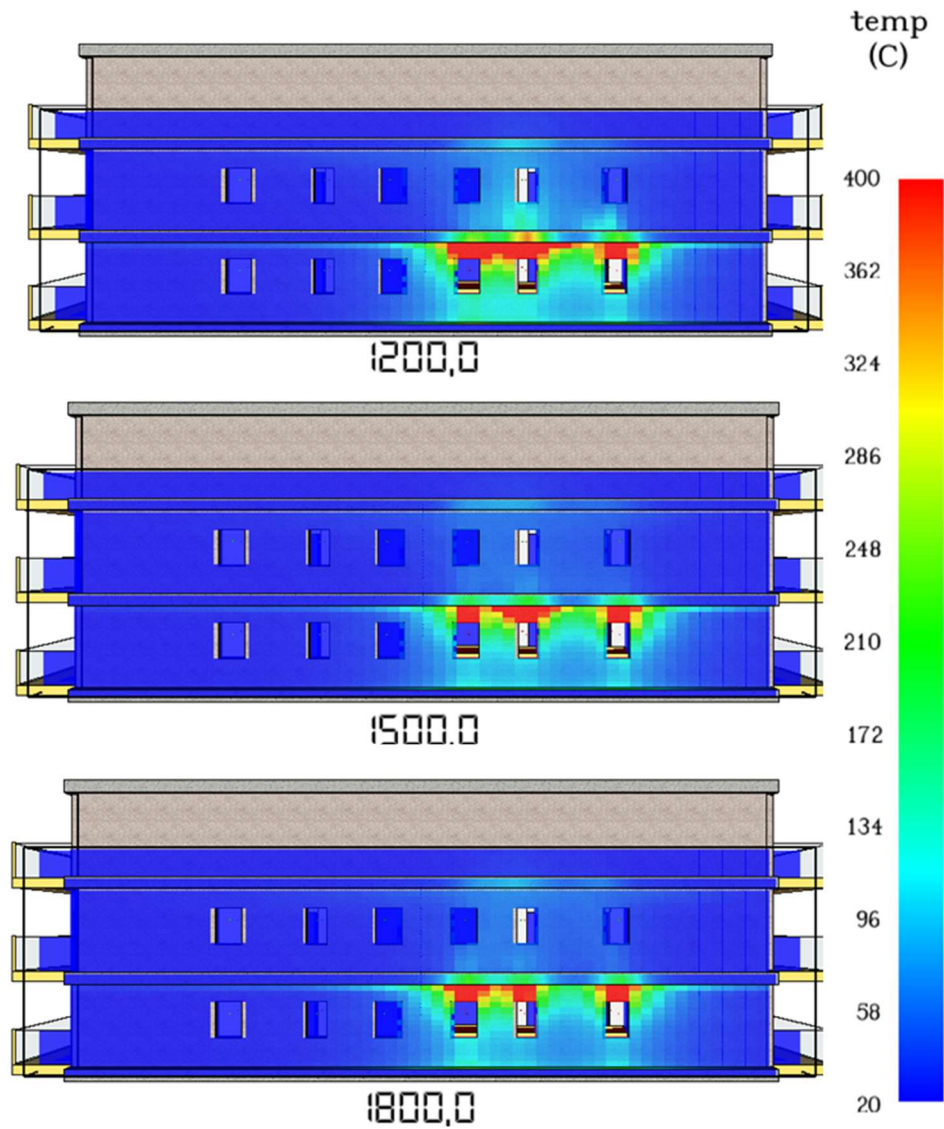


Figura 113 TLF2P_ES_03 Wall Temperature Time step 1200, 1500, 1800 secondi

I risultati relativi al set di simulazioni, che presentano gli sporti come elemento di protezione passiva atto ad impedire la propagazione dell'incendio, mostrano risultati positivi, in quanto solo in uno degli scenari avviene l'innesco, ma avviene con un ritardo particolarmente evidente che potrebbe delineare questa tecnologia costruttiva come una possibile soluzione progettuale.

5.1.10 Scenario TLF2P_E

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Direzione del vento	Velocità del vento
TLF2P_E	2 Piani	EPS	\	\

Il seguente scenario è realizzato con l'EPS come isolante e non sono previste nessun tipo di protezione passiva.

Burning Rate

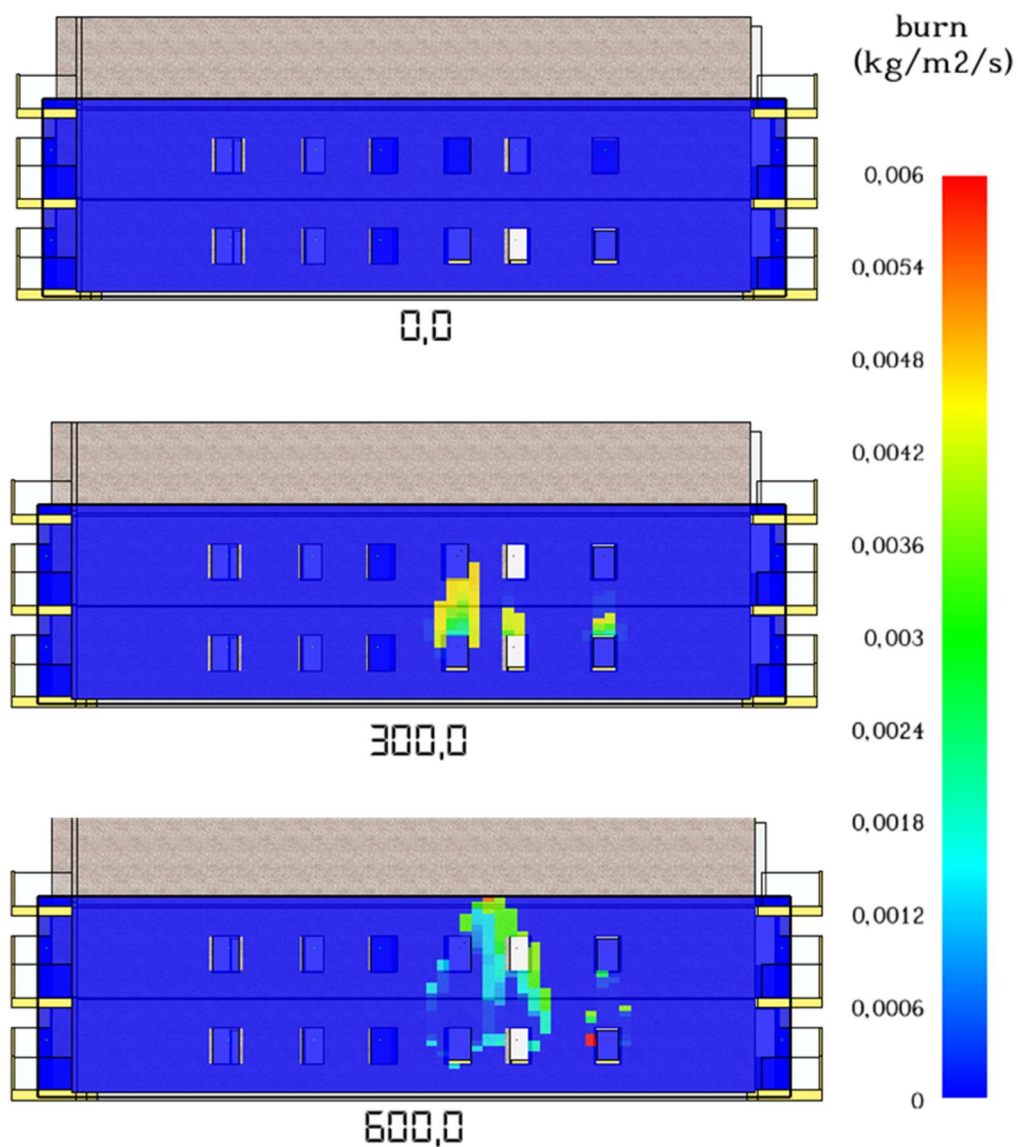


Figura 114 TLF2P_E Burning Rate Time step 0, 300, 600 secondi

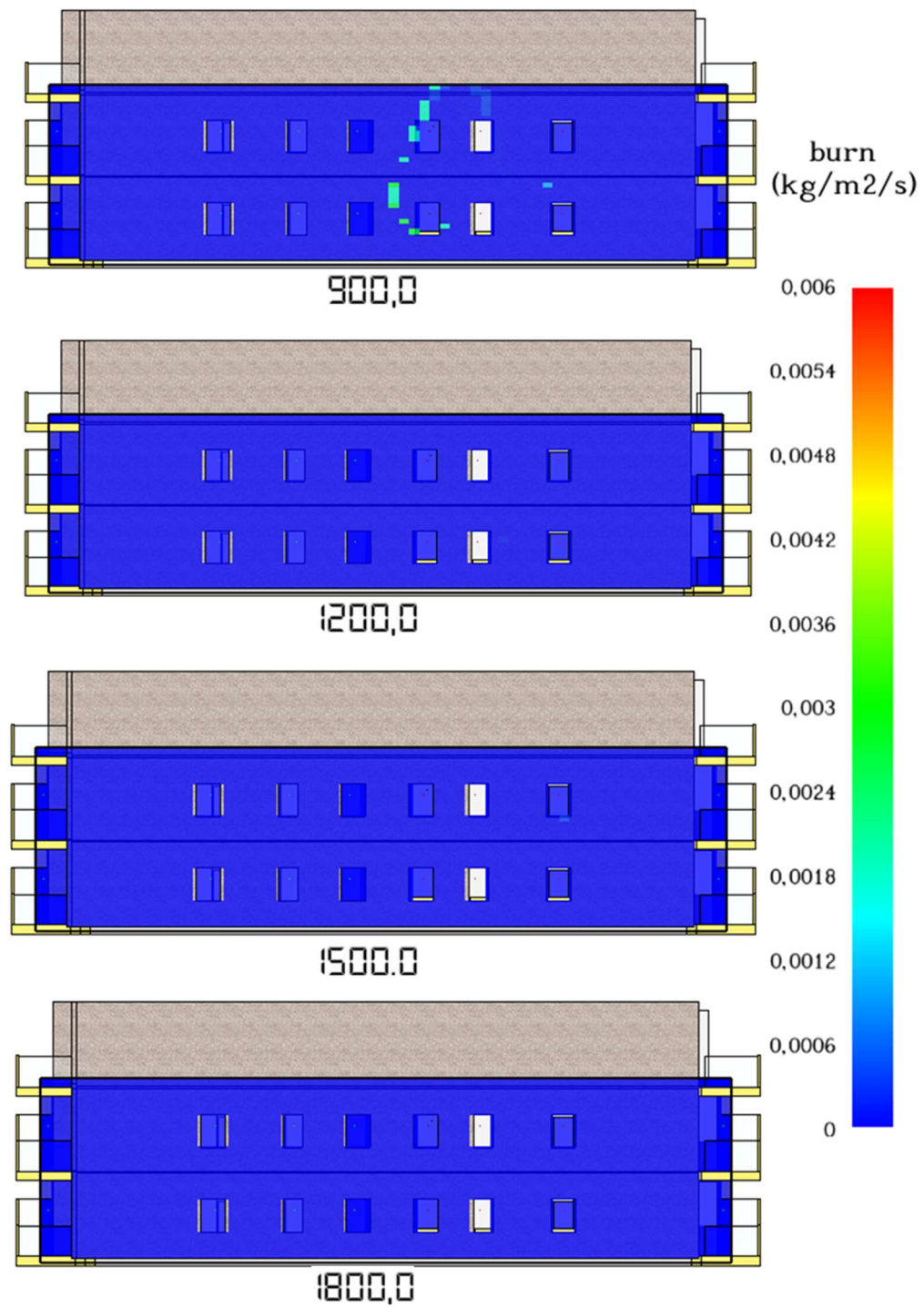


Figura 115TLF2P_E Burning Rate Time step 900, 1200, 1500, 1800 secondi

Incident Heat Flux

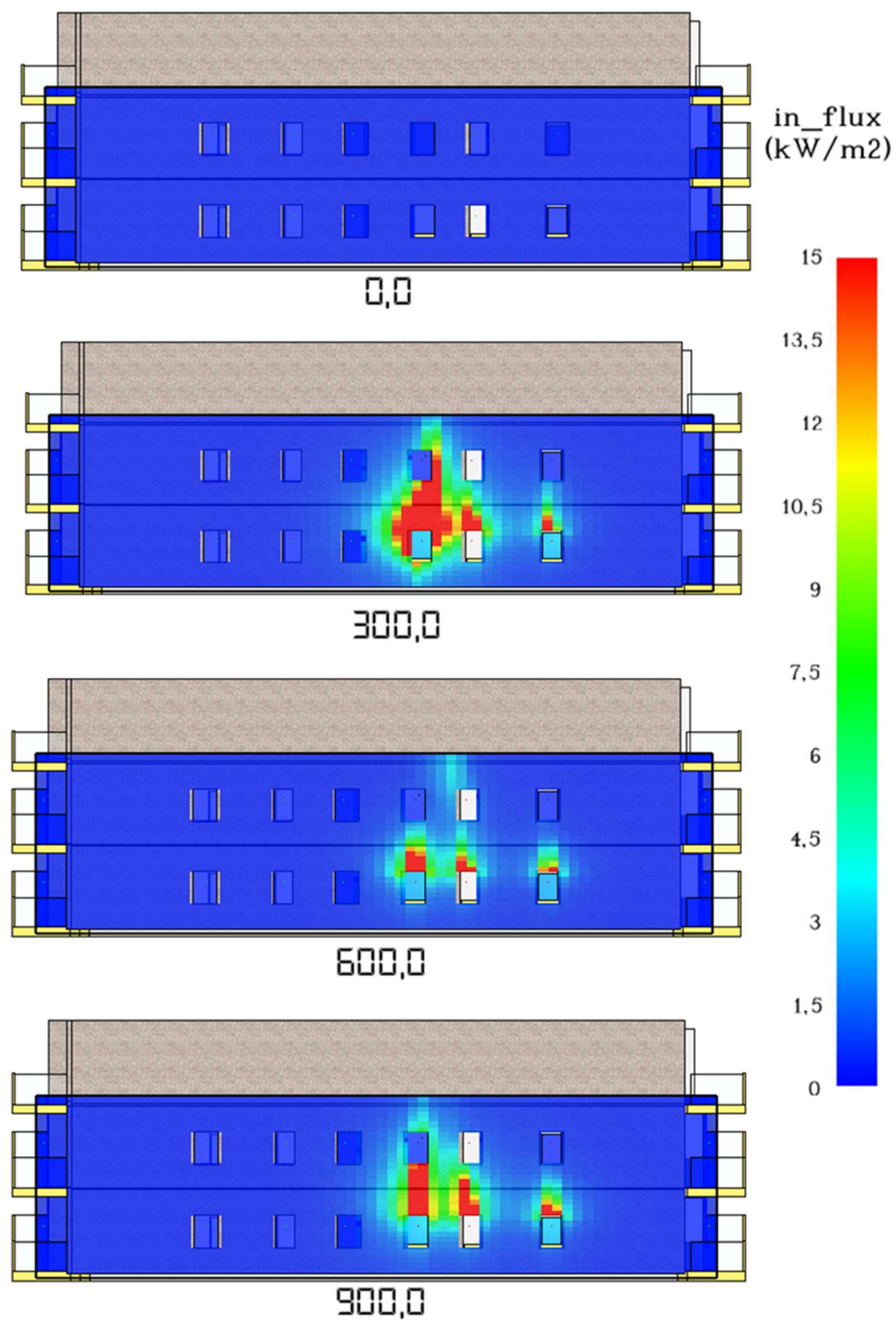


Figura 116 TLF2P_E Incident Heat Flux Time step 0, 300, 600, 900 secondi

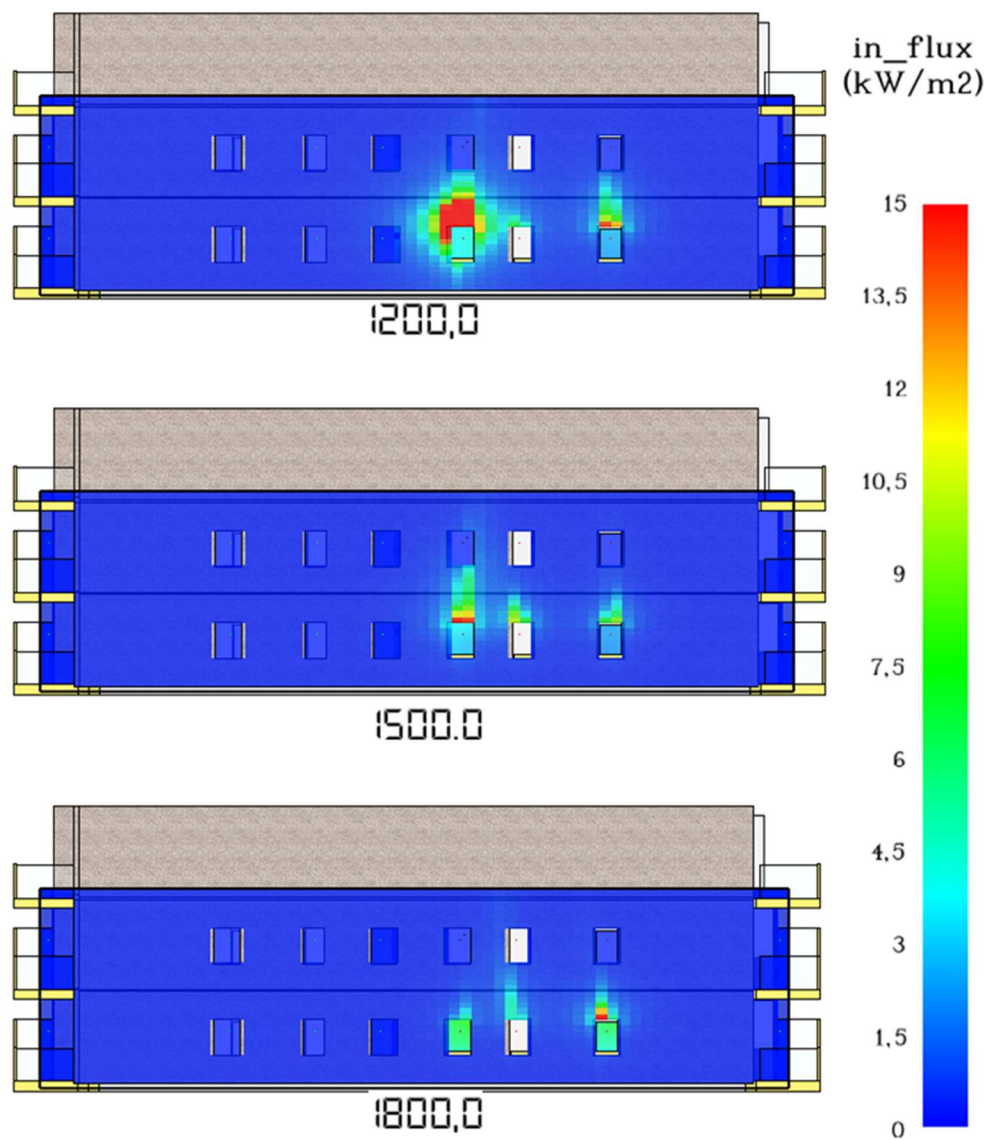


Figura 117 TLF2P_E Incident Heat Flux Time step 1200, 1500, 1800 secondi

Wall Temperature

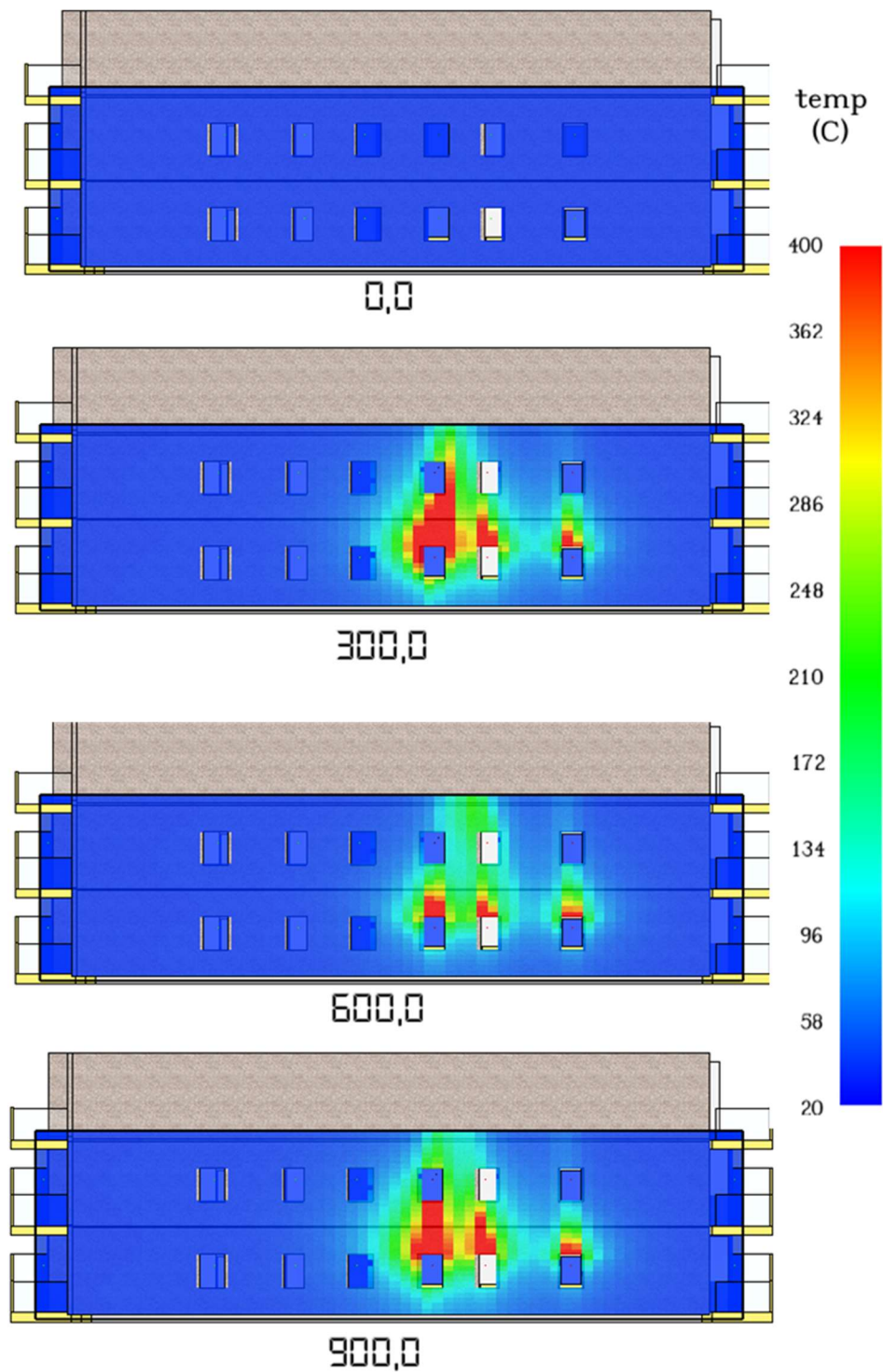


Figura 118 TLF2P_E Wall Temperature Time step 0, 300, 600, 900 secondi

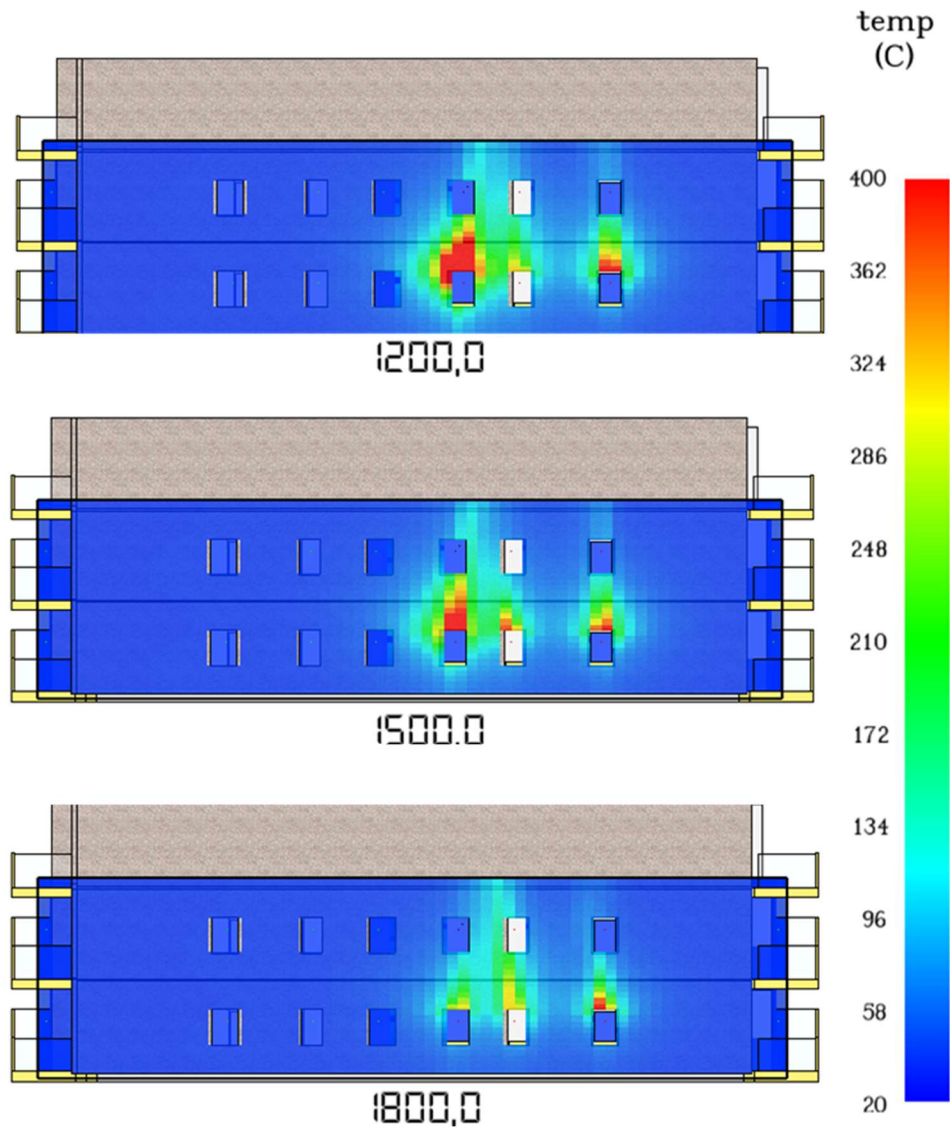


Figura 119 TLF2P_E Wall Temperature Time step 1200, 1500, 1800 secondi

Il risultato è evidente che sia una propagazione rapida è incontrollata dell'incendio, che coinvolge rapidamente il compartimento superiore.

5.2 Risultati modello edificio

5.2.1 Scenario TLFEI_01

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Piano dell'incendio	Vento
TLFEI_01	Edificio Intero	EPS + Fasce	12	\

Questo scenario è caratterizzato dall'utilizzo di EPS con fasce di separazione conformi alla RTV13, il modello comprende tutto l'edificio e il primo innesco è situato al piano 12.

Burning Rate

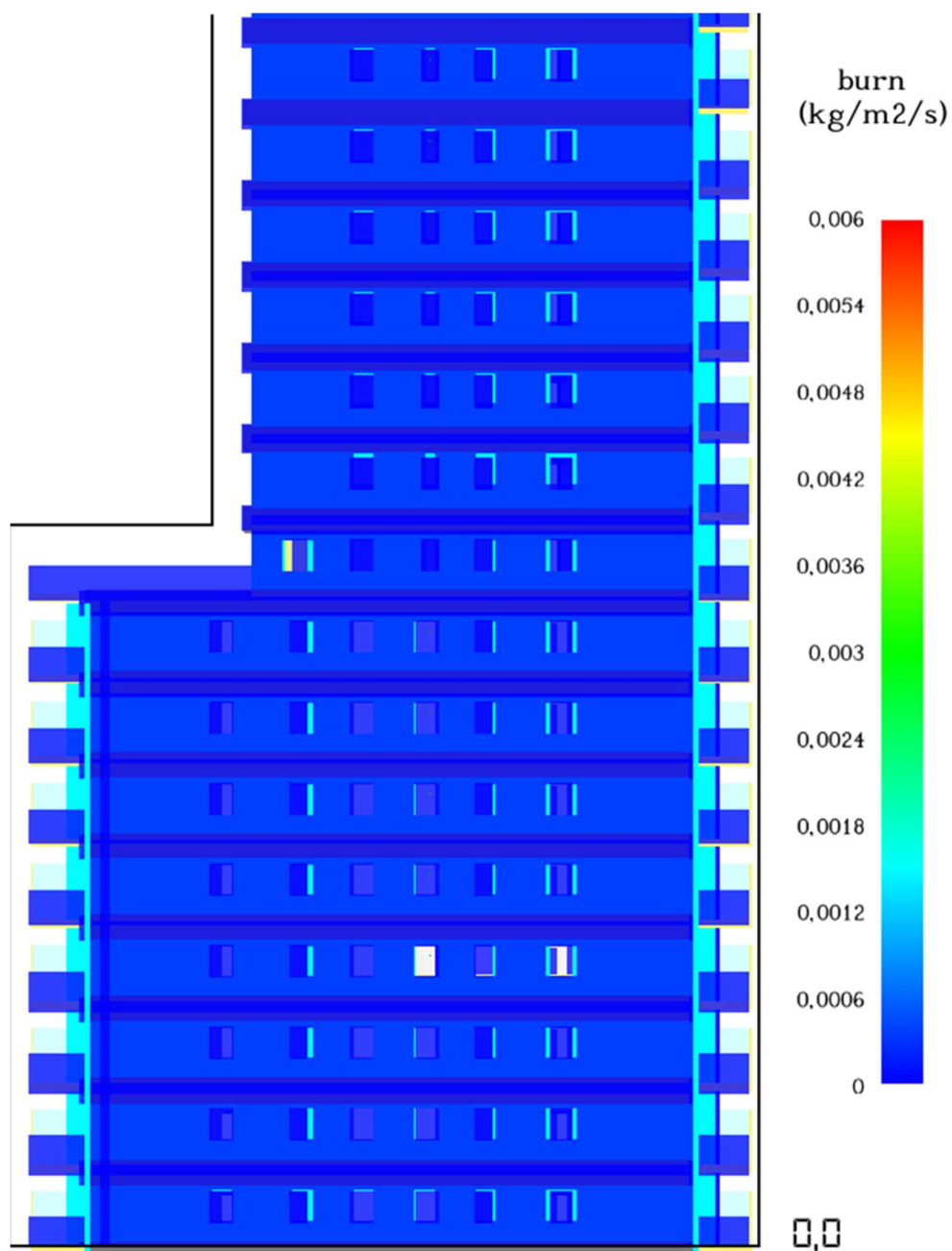


Figura 120 TLFEI_01 Burning Rate Time step 0 secondi

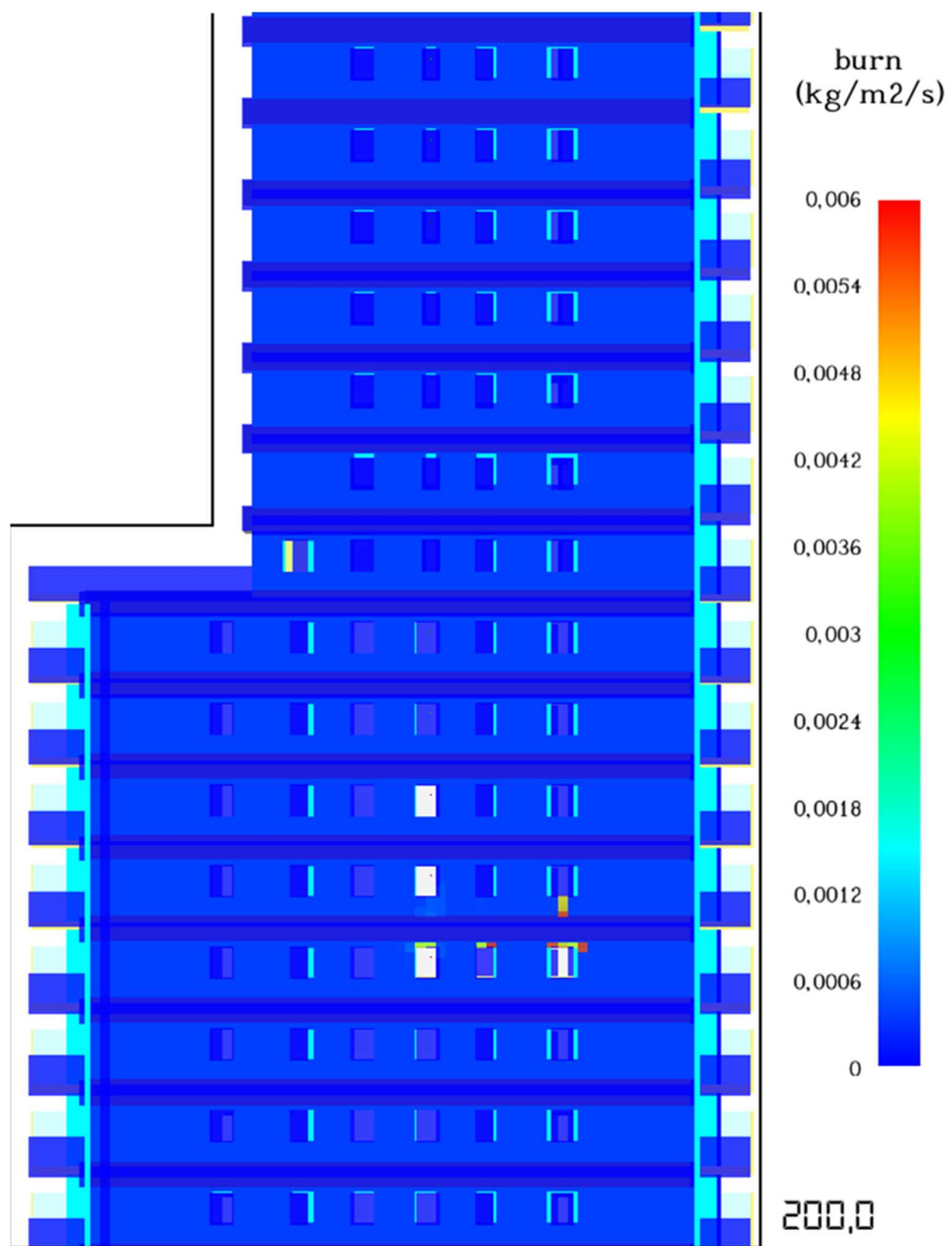


Figura 121 TLFEI_01 Burning Rate Time step 200 secondi

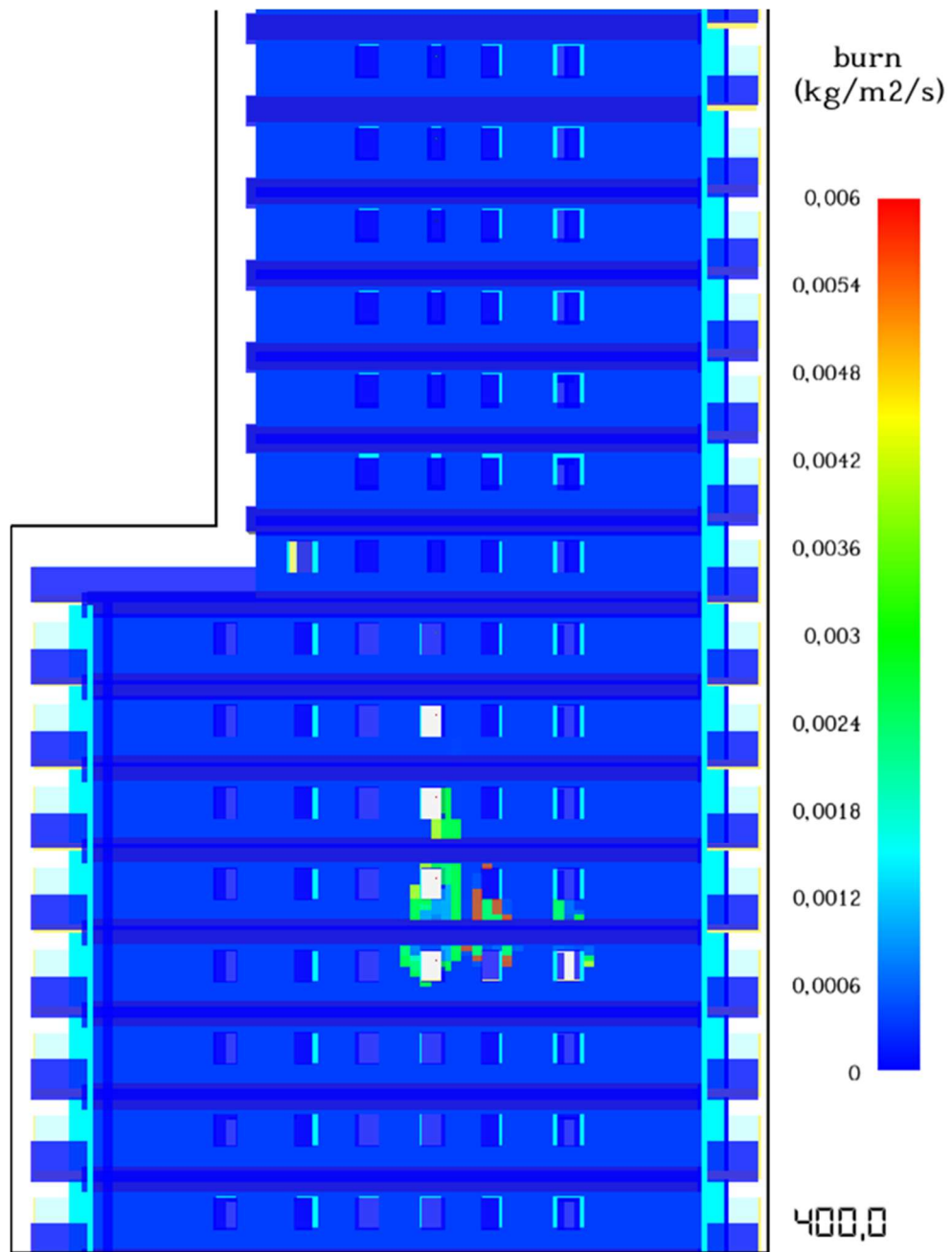


Figura 122 TLFEI_01 Burning Rate Time step 400 secondi

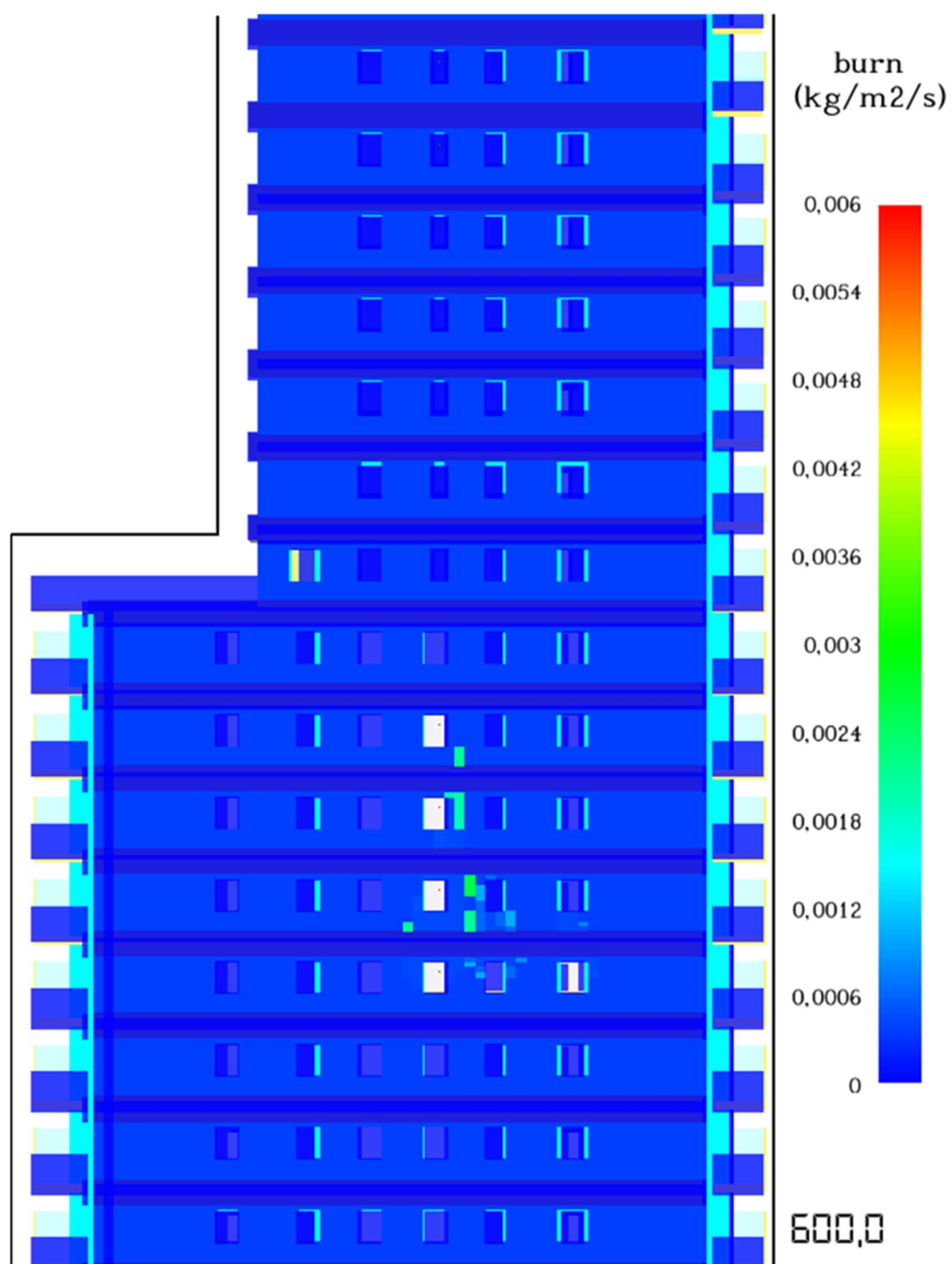


Figura 123 TLFEI_01 Burning Rate Time step 600 secondi

Incident Heat Flux

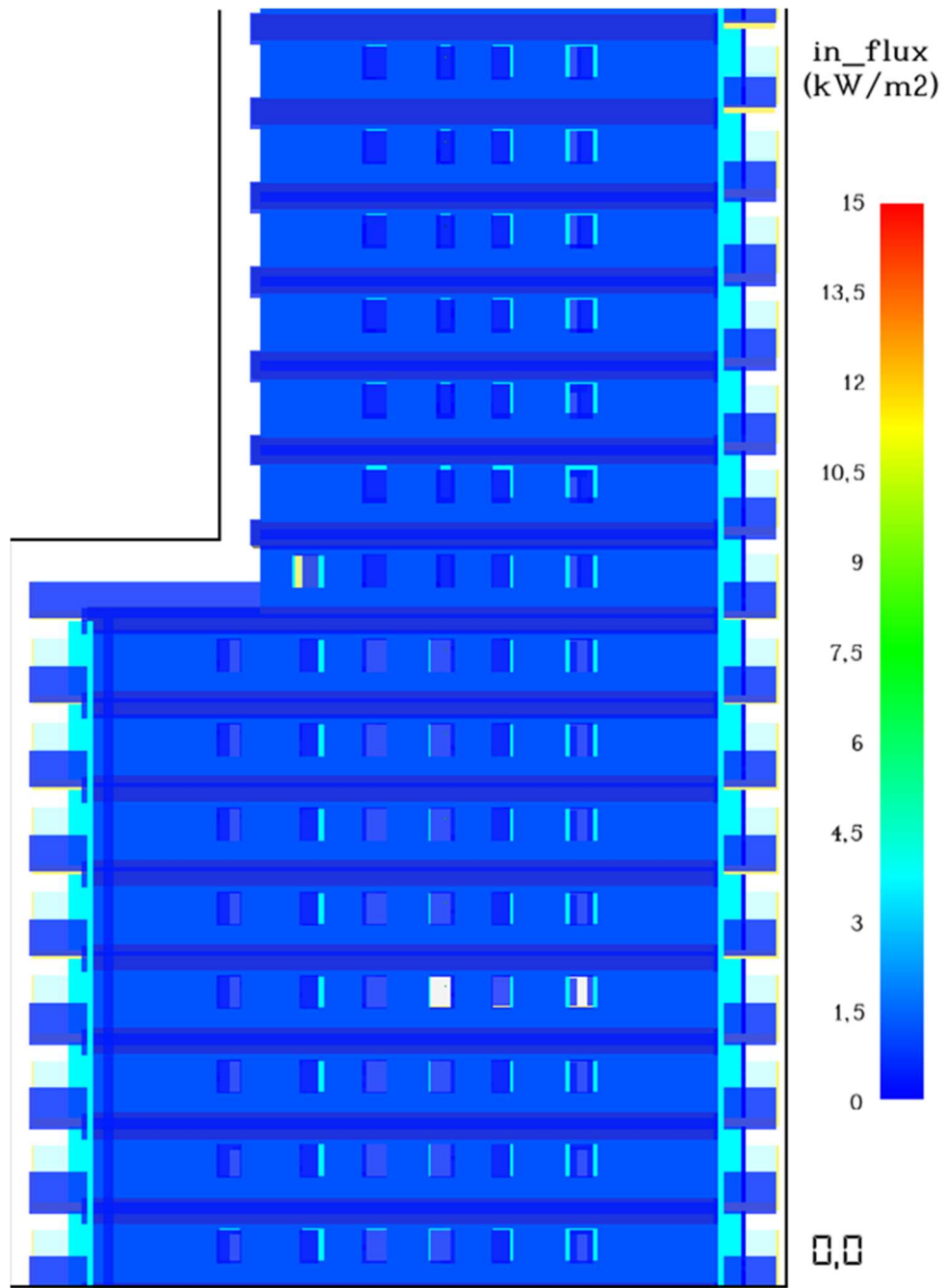


Figura 124 TLFEI_01 Incident Heat Flux Time step 0 secondi

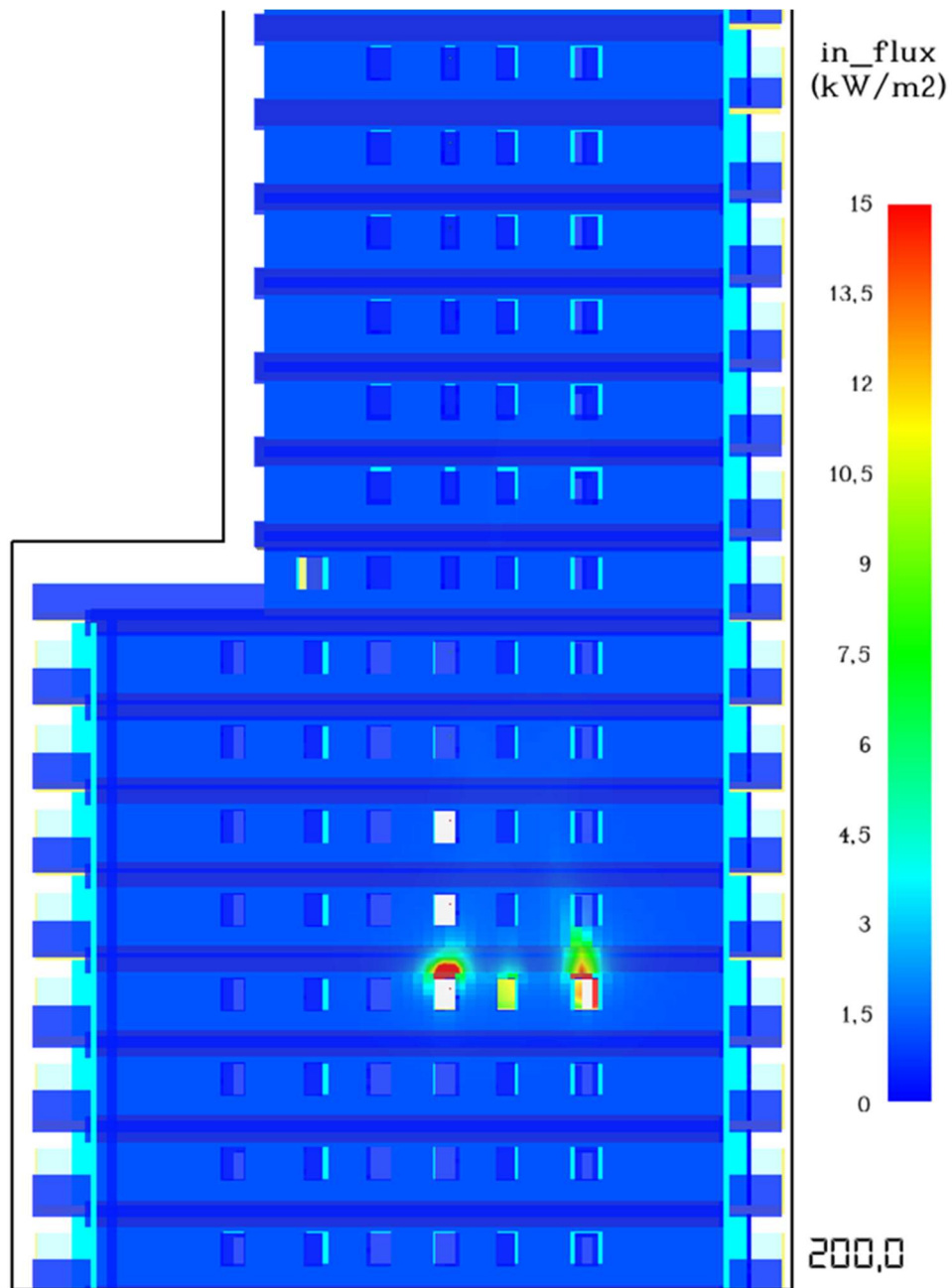


Figura 125 TLFEI_01 Incident Heat Flux Time step 200 secondi

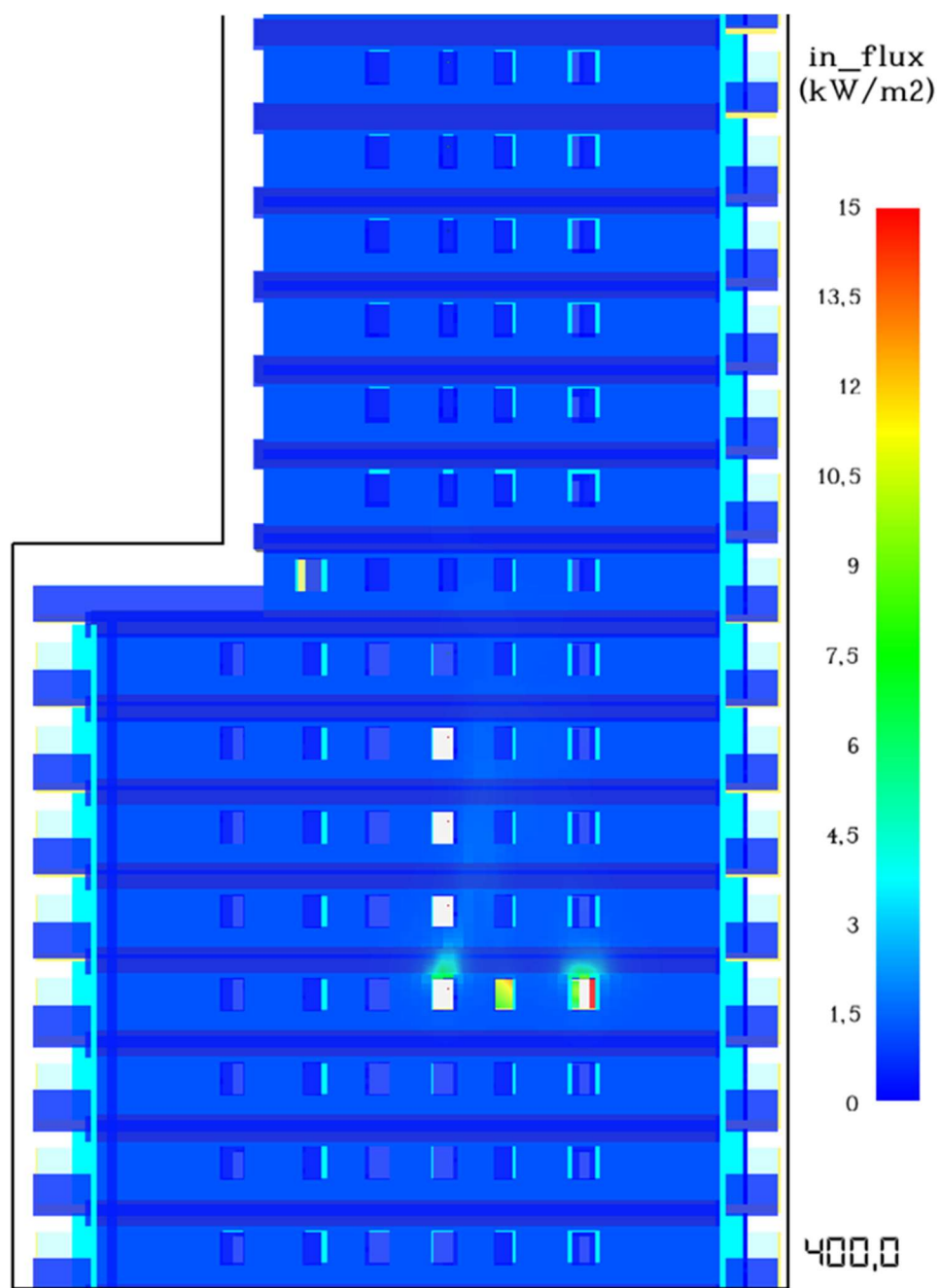


Figura 126 TLFEI_01 Incident Heat Flux Time step 400 secondi

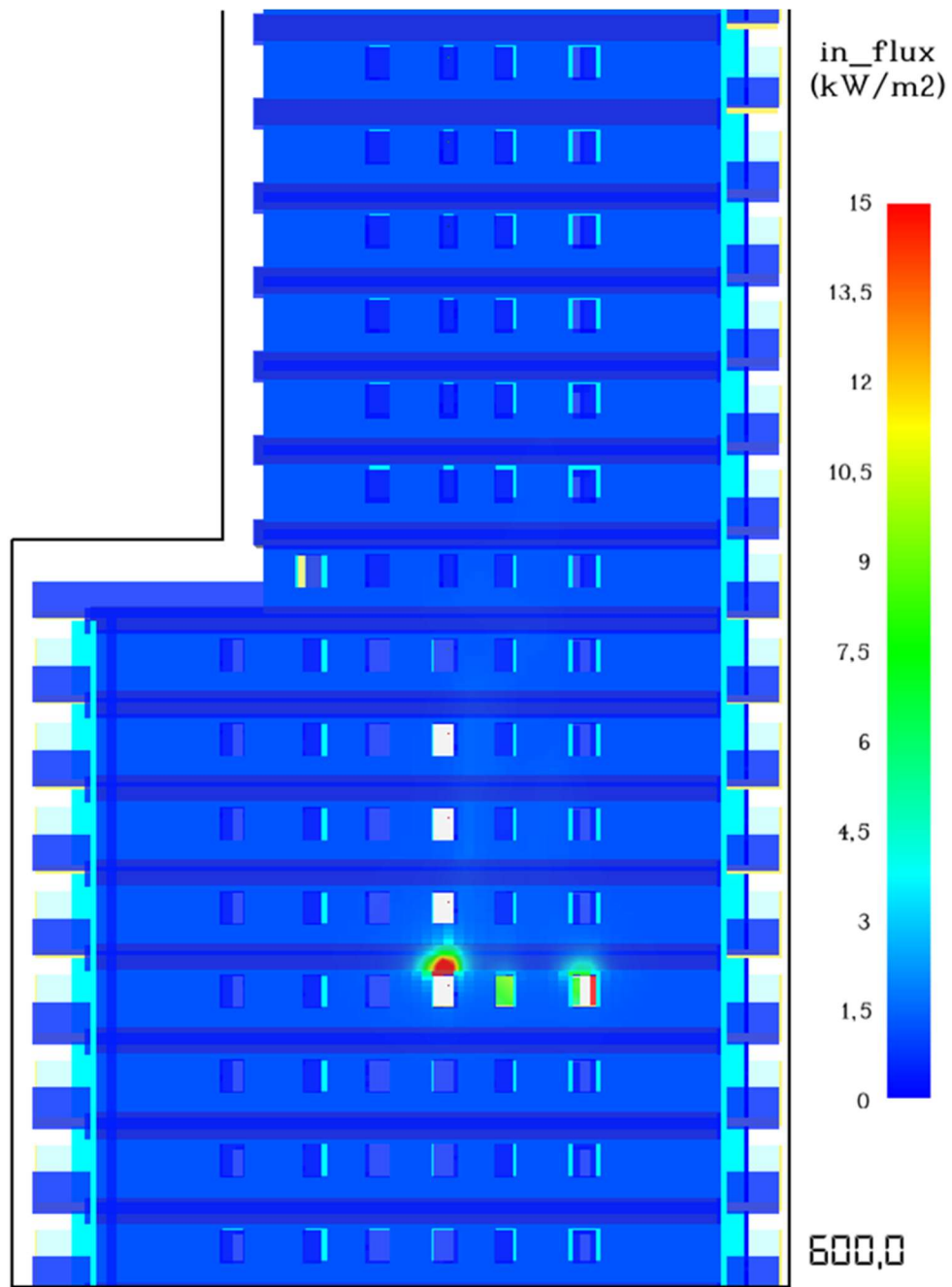


Figura 127 TLFEI_01 Incident Heat Flux Time step 600 secondi

Wall Temperature

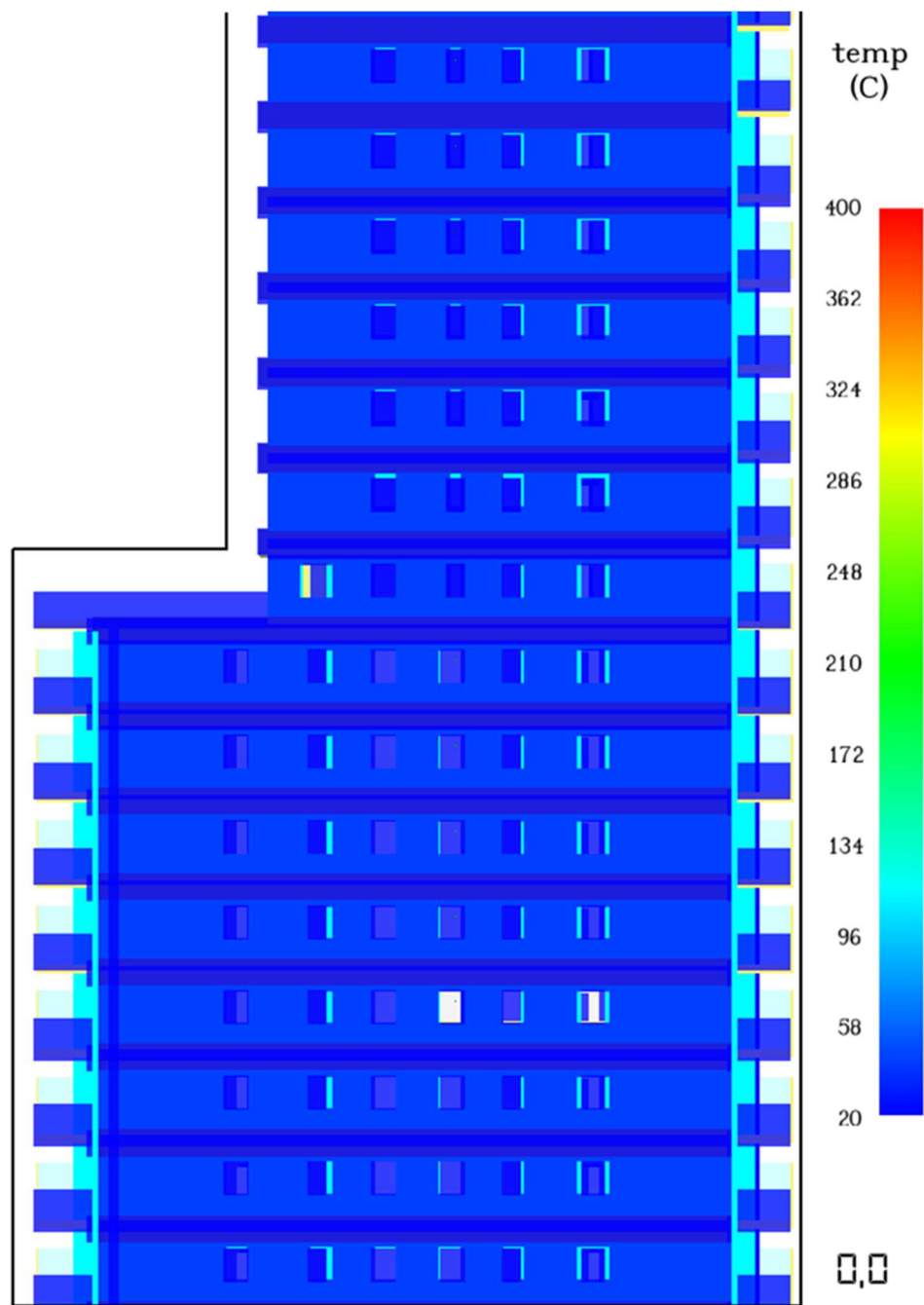


Figura 128 TLFEI_01 Wall Temperature Time step 0 secondi

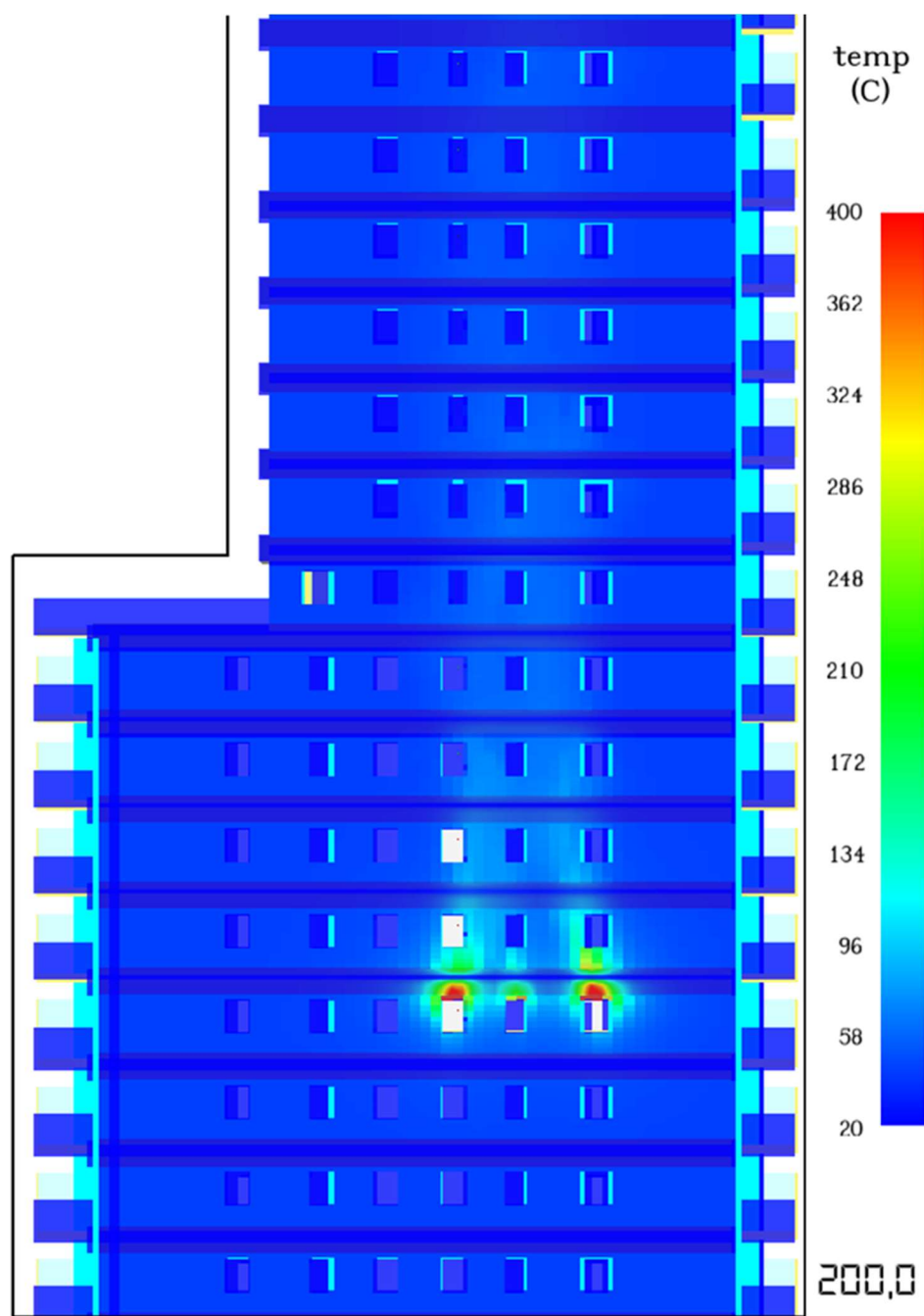


Figura 129 TLFEI_01 Wall Temperature Time step 200 secondi

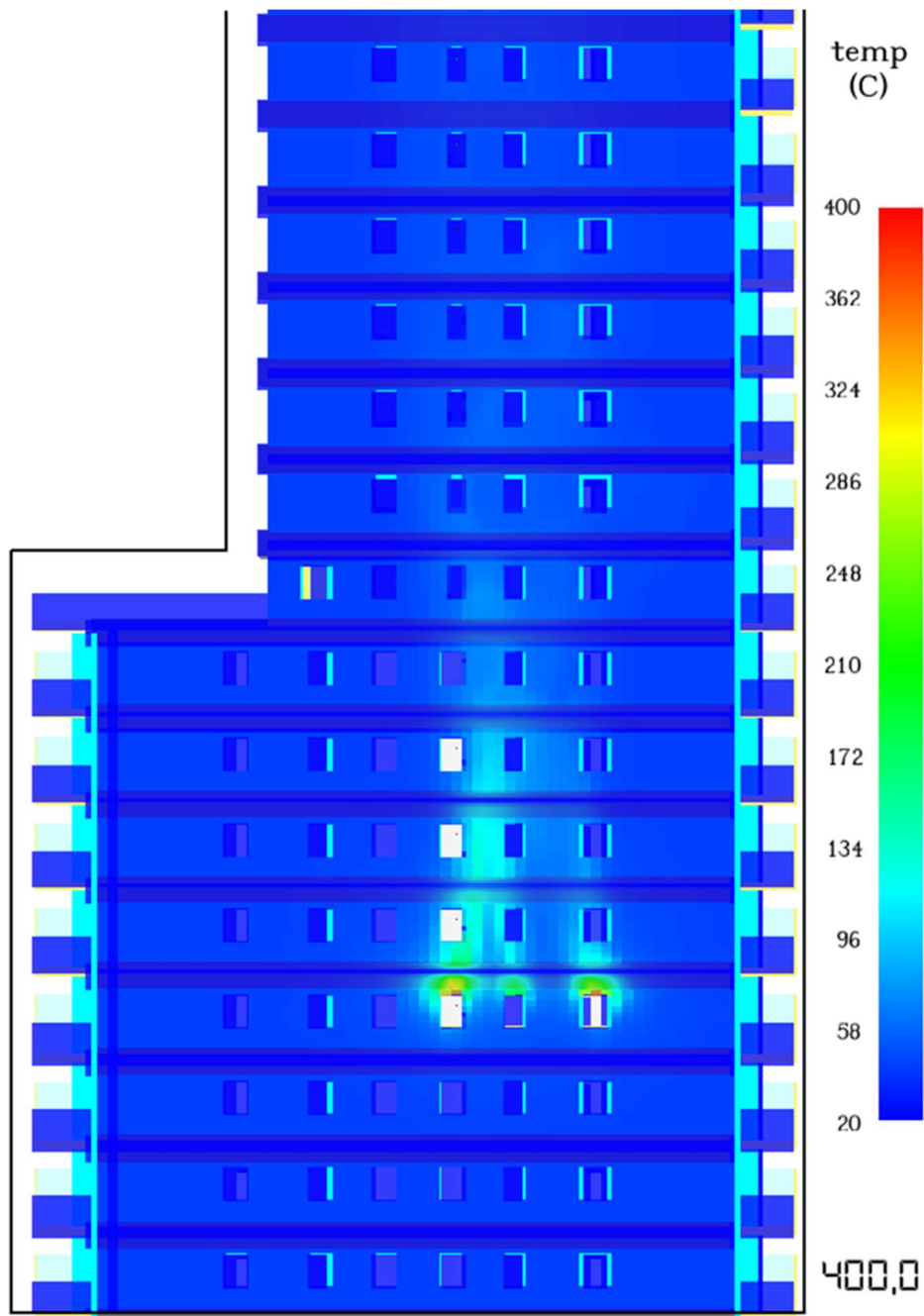


Figura 130 TLFEI_01 Wall Temperature Time step 400 secondi

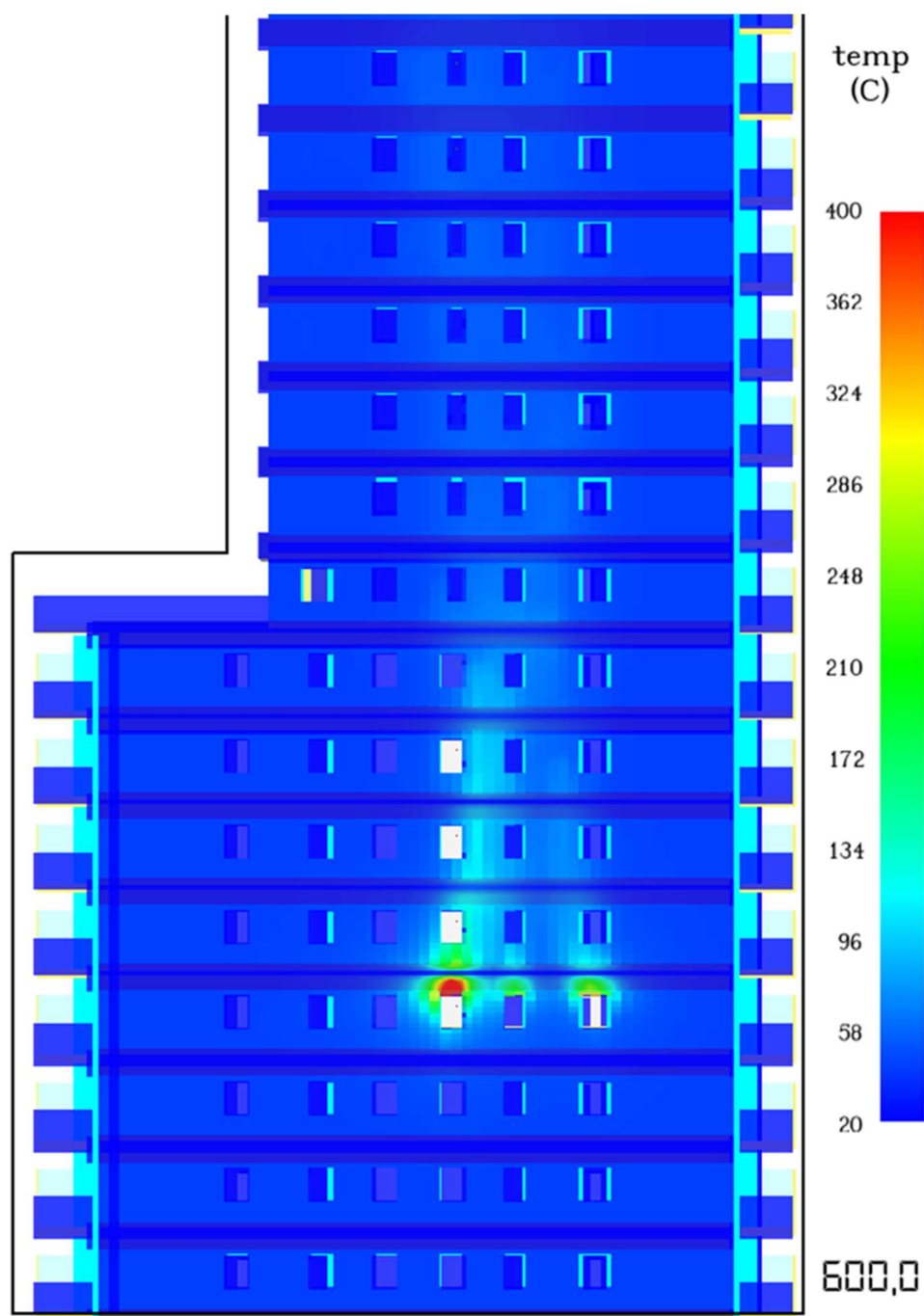


Figura 131 TLFEI_01 Wall Temperature Time step 600 secondi

5.2.2 Scenario TLFEI_02

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Piano dell'incendio	Vento
TLFEI_02	Edificio Intero	EPS + Sporti	12	\

Lo scenario analizzato è caratterizzato dalle peculiarità proprie della seconda soluzione progettuale, l'impiego di pannelli isolanti in polistirene espanso (EPS) e la presenza di sporti aggettanti come misura di protezione passiva. L'incendio è stato ipotizzato al dodicesimo piano dell'edificio, in condizioni di assenza di vento.

Burning Rate

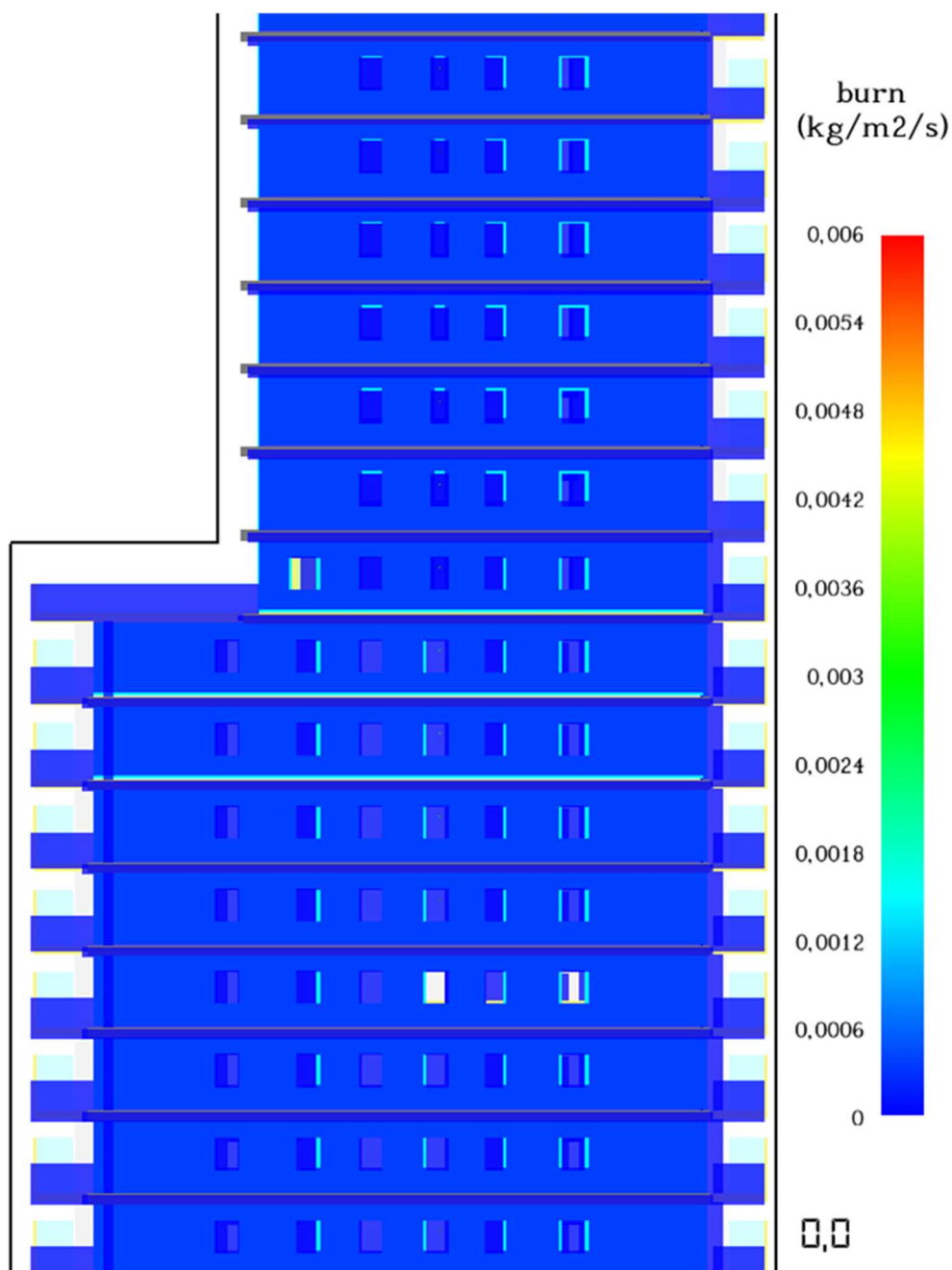


Figura 132 TLFEI_02 Burning Rate Time step 0 secondi

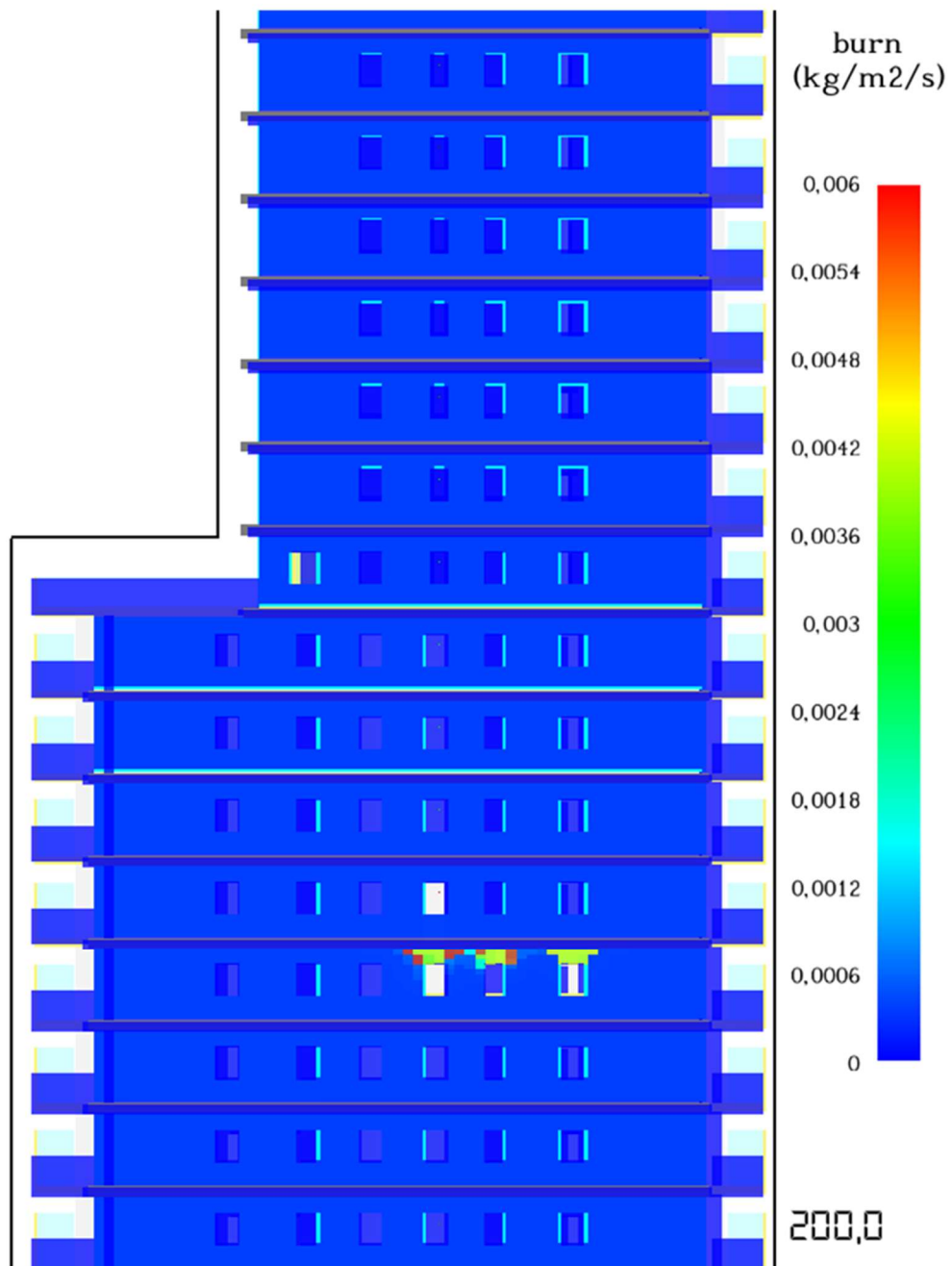


Figura 133 TLFEI_02 Burning Rate Time step 200 secondi

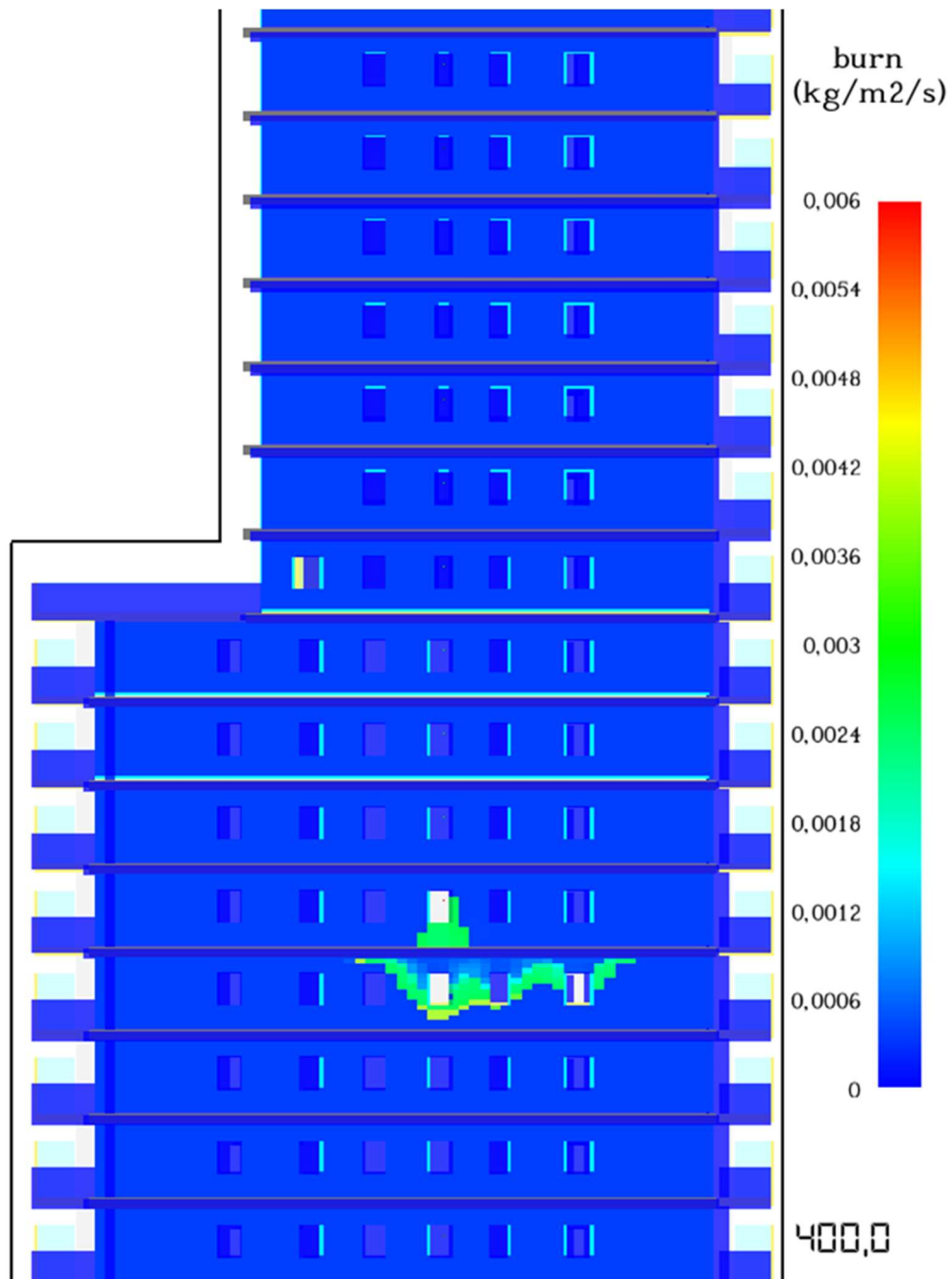


Figura 134 TLFEI_02 Burning Rate Time step 400 secondi

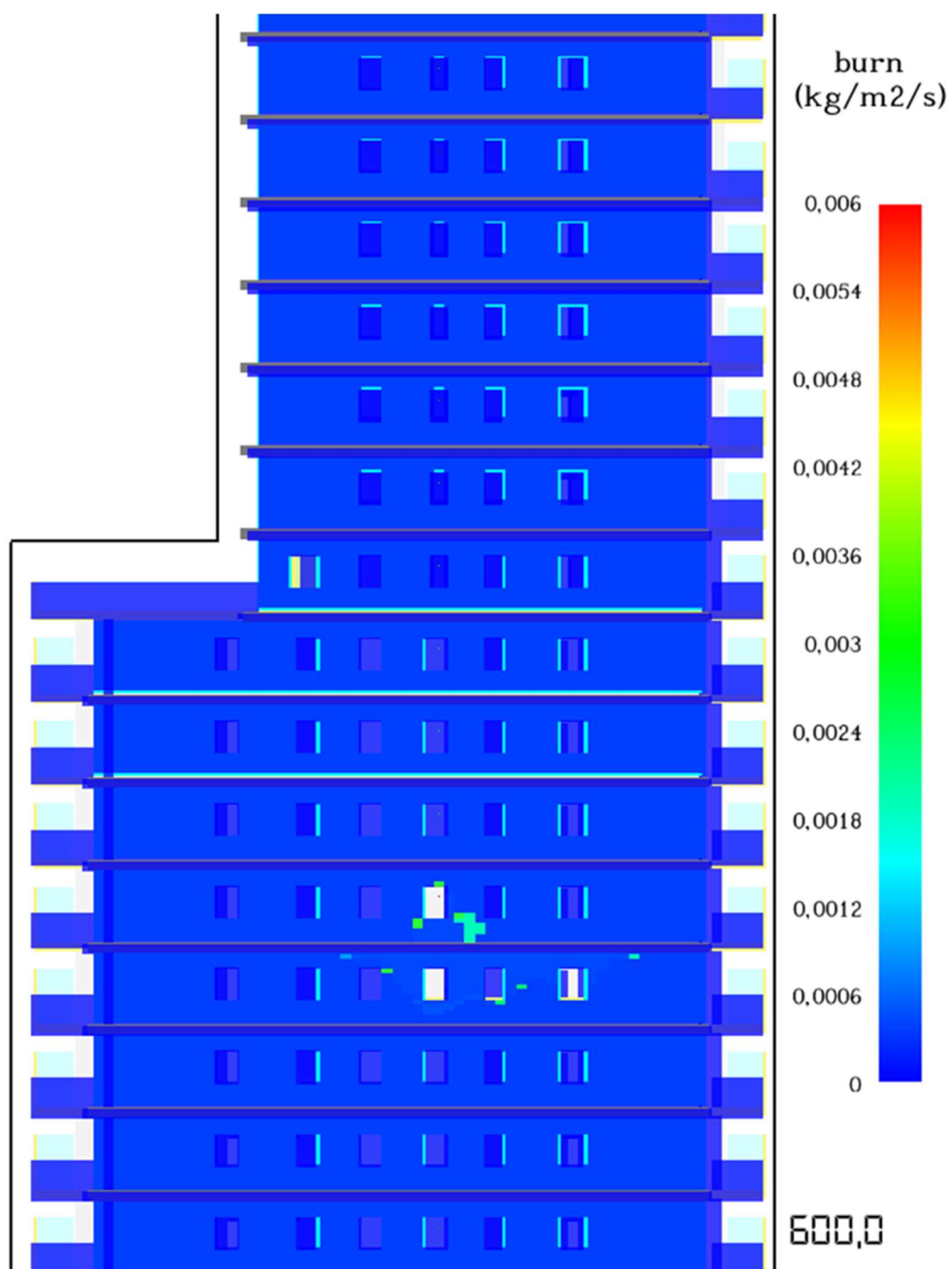


Figura 135 TLFEI_02 Burning Rate Time step 600 secondi

Incident Heat Flux

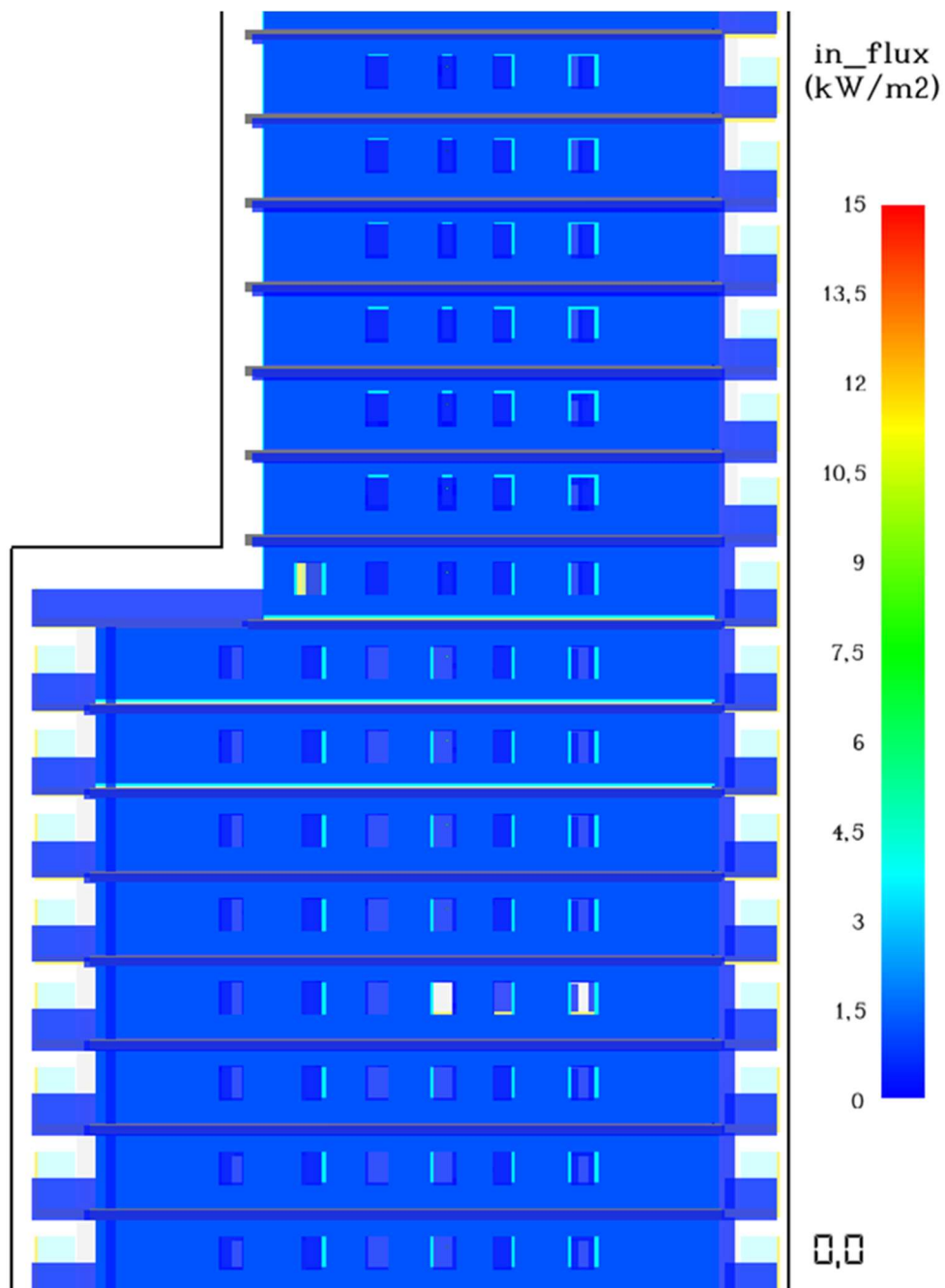


Figura 136 TLFEI_02 Incident Heat Flux Time step 0 secondi

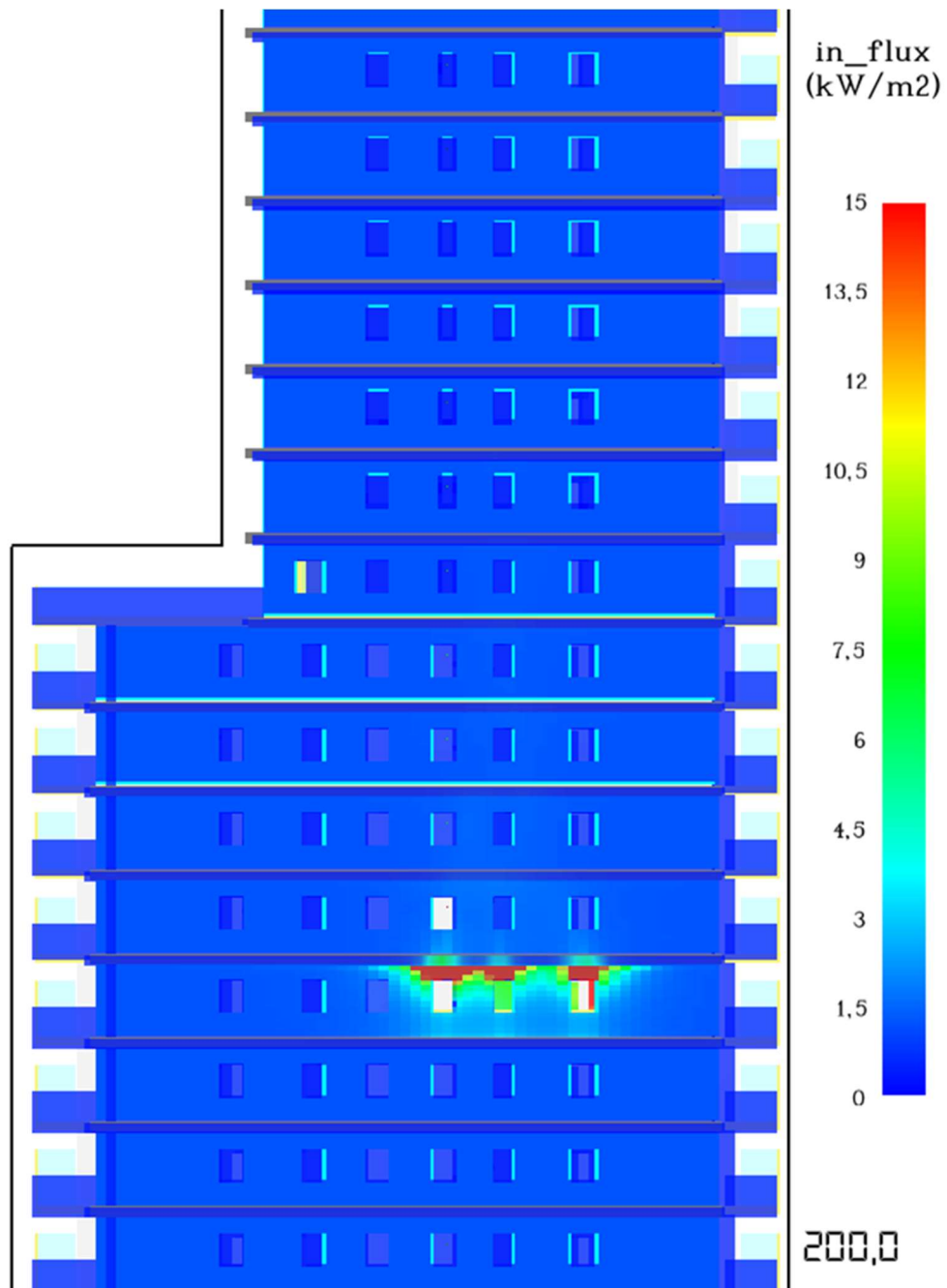


Figura 137 TLFEI_02 Incident Heat Flux Time step 200 secondi

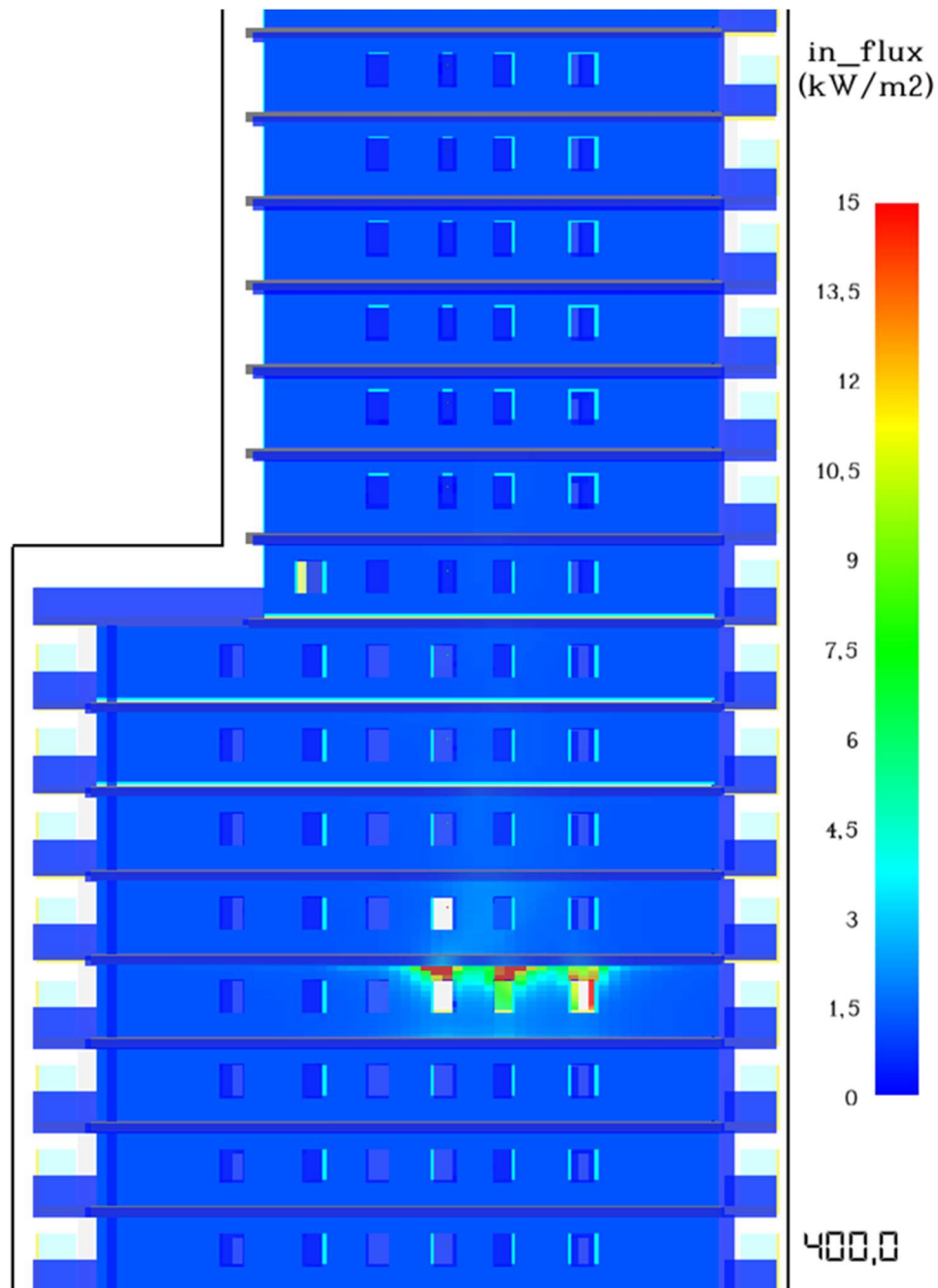


Figura 138TLFEI_02 Incident Heat Flux Time step 400 secondi

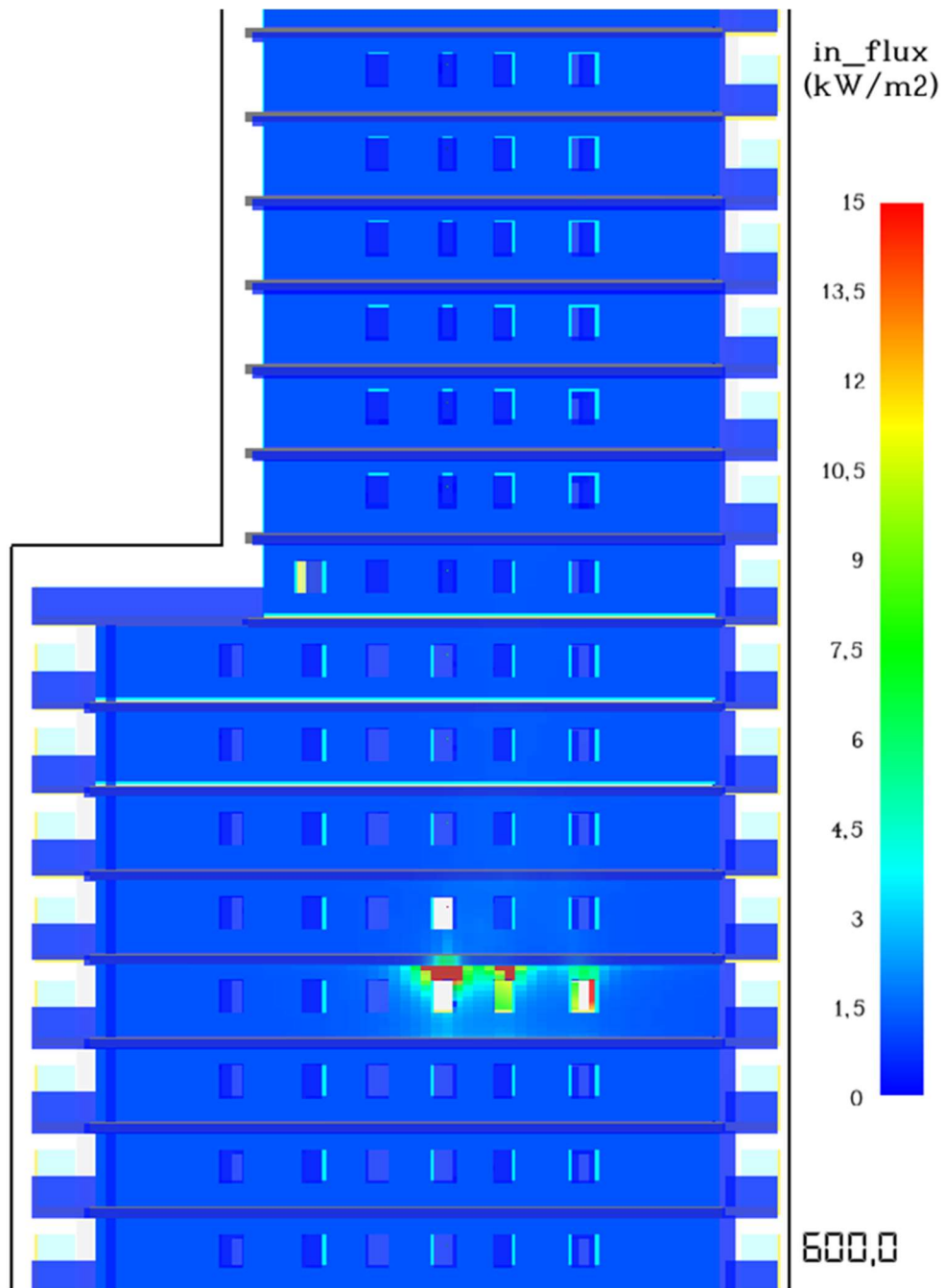


Figura 139TLFEI_02 Incident Heat Flux Time step 600 secondi

Wall Temperature

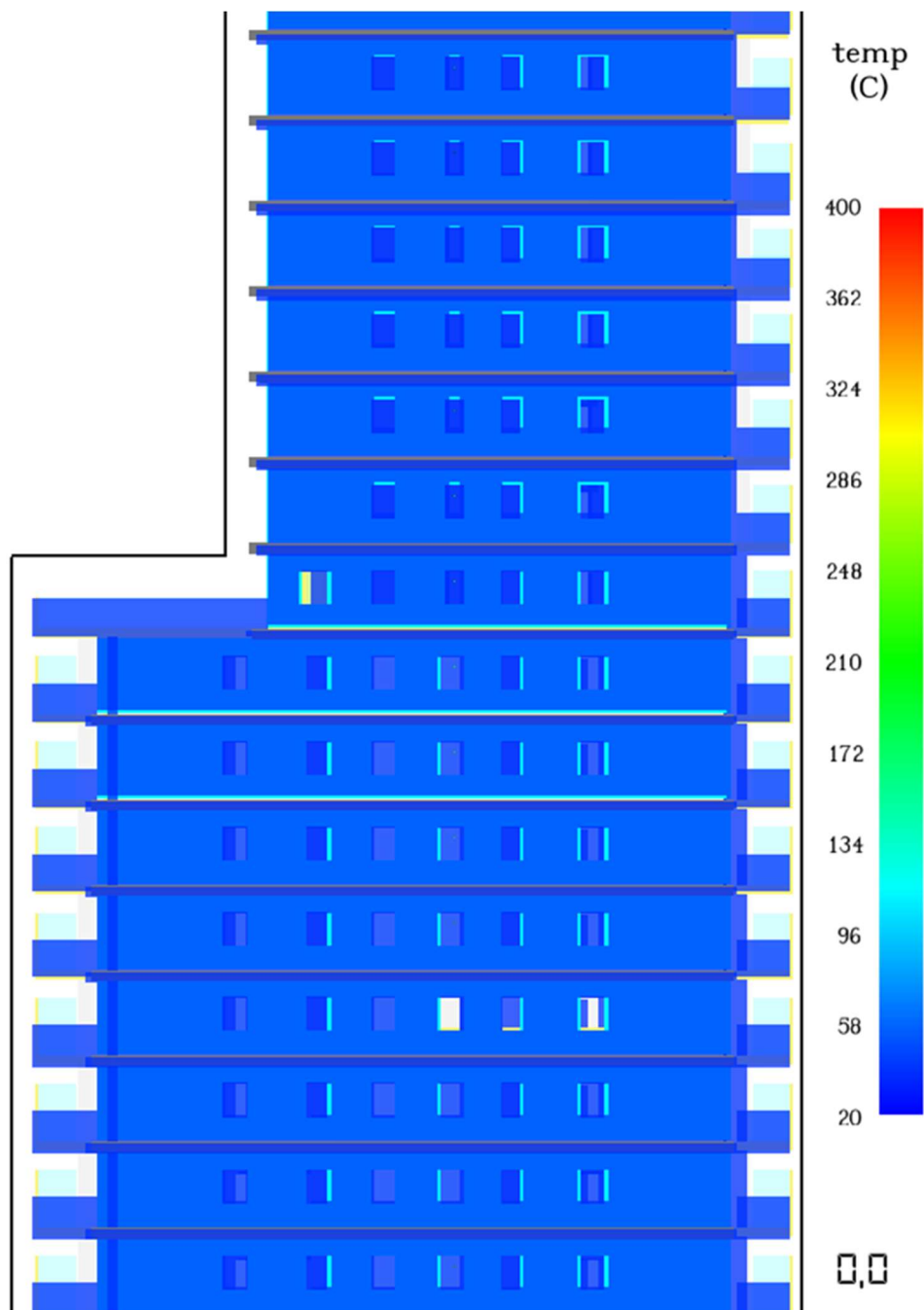


Figura 140 TLFEI_02 Wall Temperature Time step 0 secondi

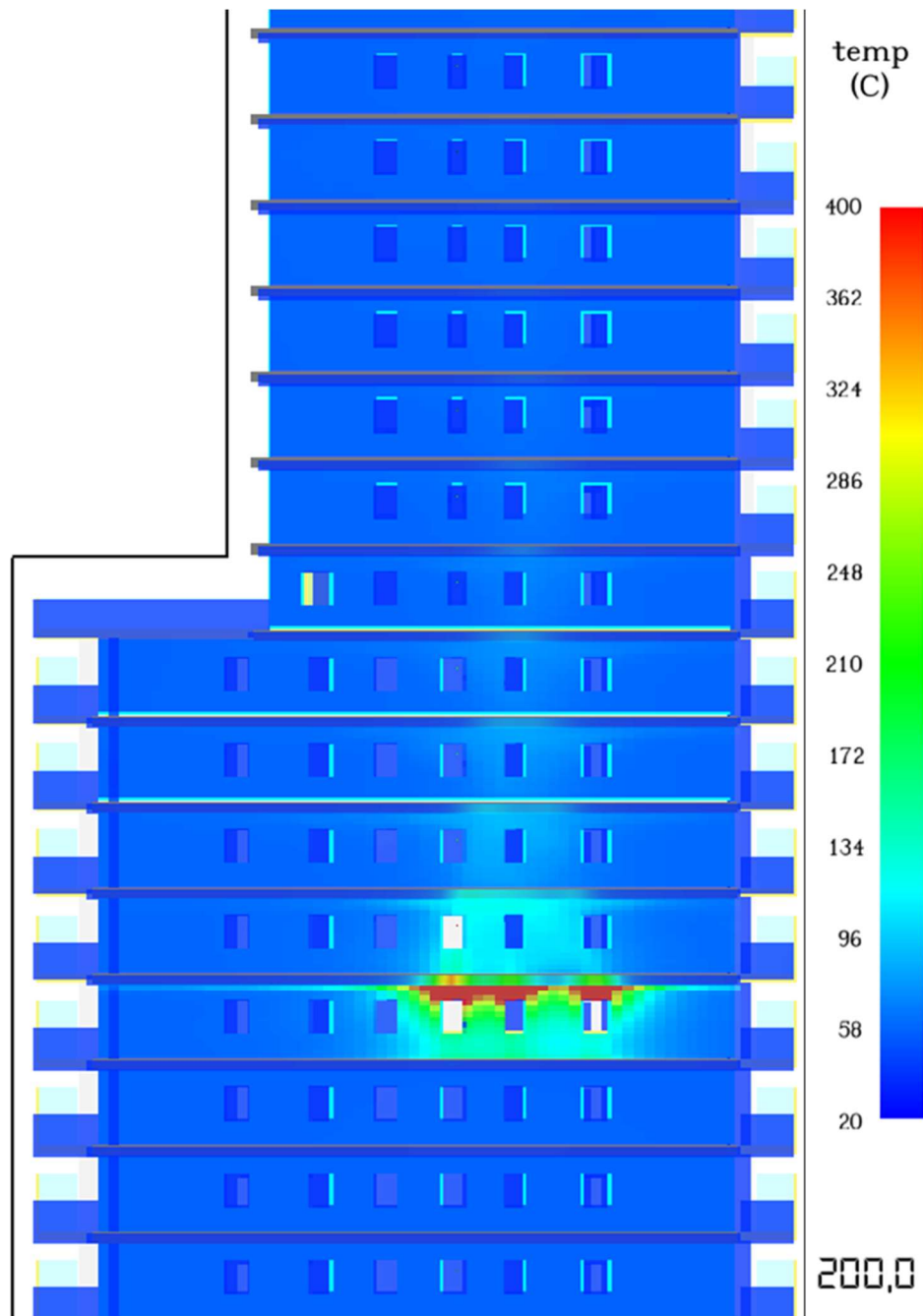


Figura 141 TLFEI_02 Wall Temperature Time step 200 secondi

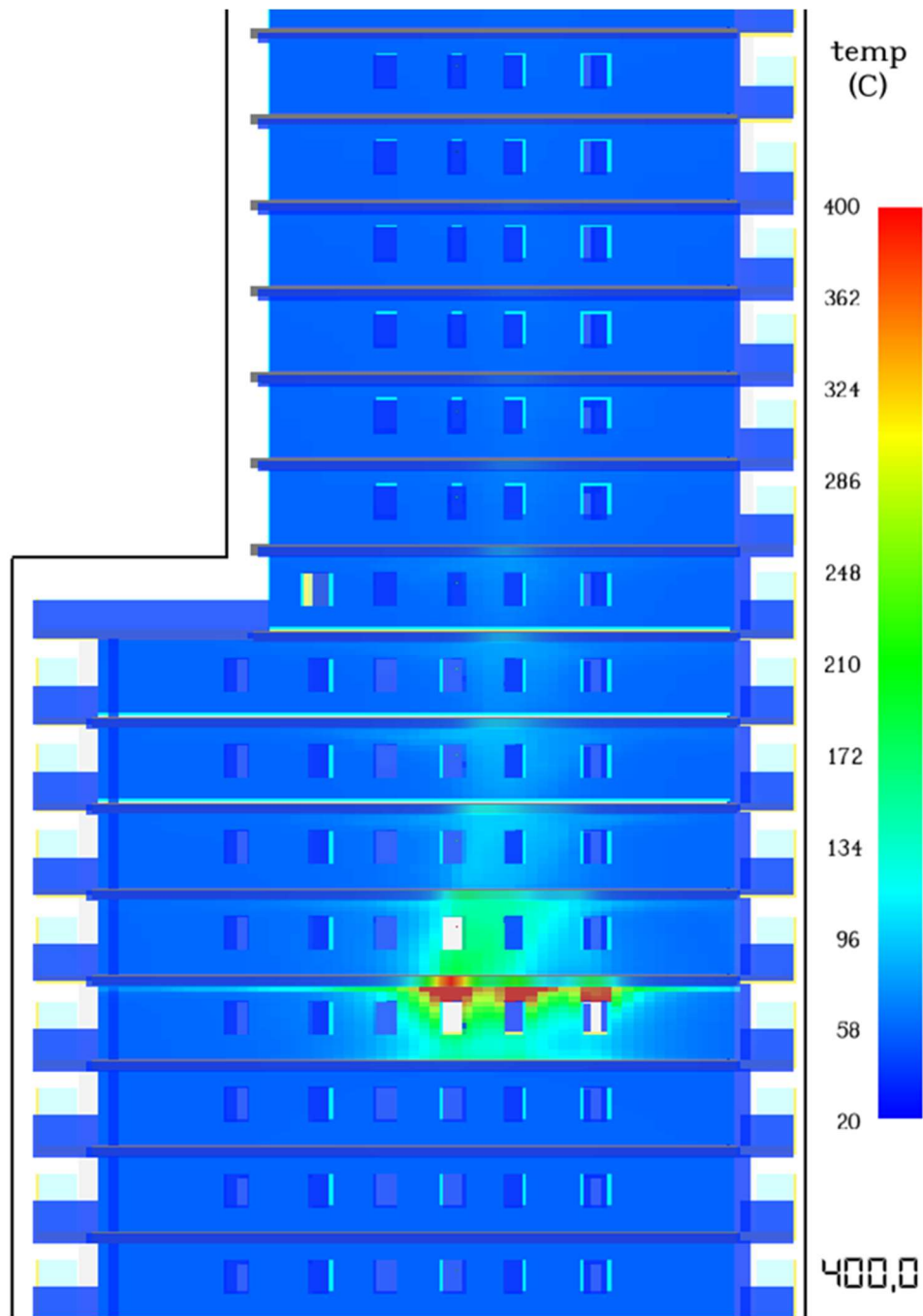


Figura 142 TLFEI_02 Wall Temperature Time step 400 secondi

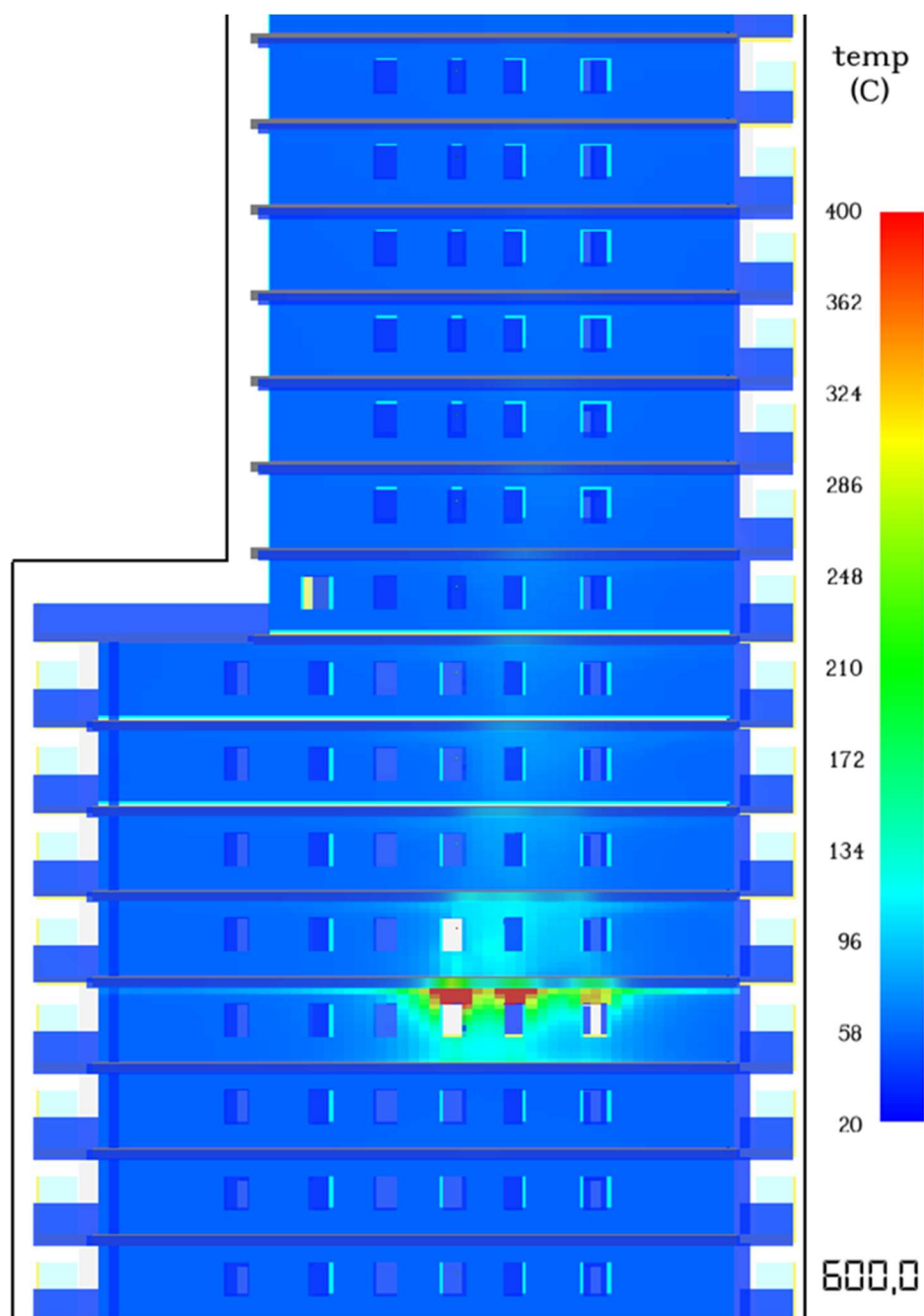


Figura 143 TLFEI_02 Wall Temperature Time step 600 secondi

5.2.3 Scenario TLFEI_03

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Piano dell'incendio	Vento
TLFEI_03	Edificio Intero	EPS	12	\

Questo scenario, denominato scenario di controllo, prevede l'impiego del solo isolante in polistirene espanso (EPS), senza l'adozione di alcuna misura di protezione passiva. L'incendio è stato localizzato al dodicesimo piano, in condizioni di assenza di vento.

Burning Rate

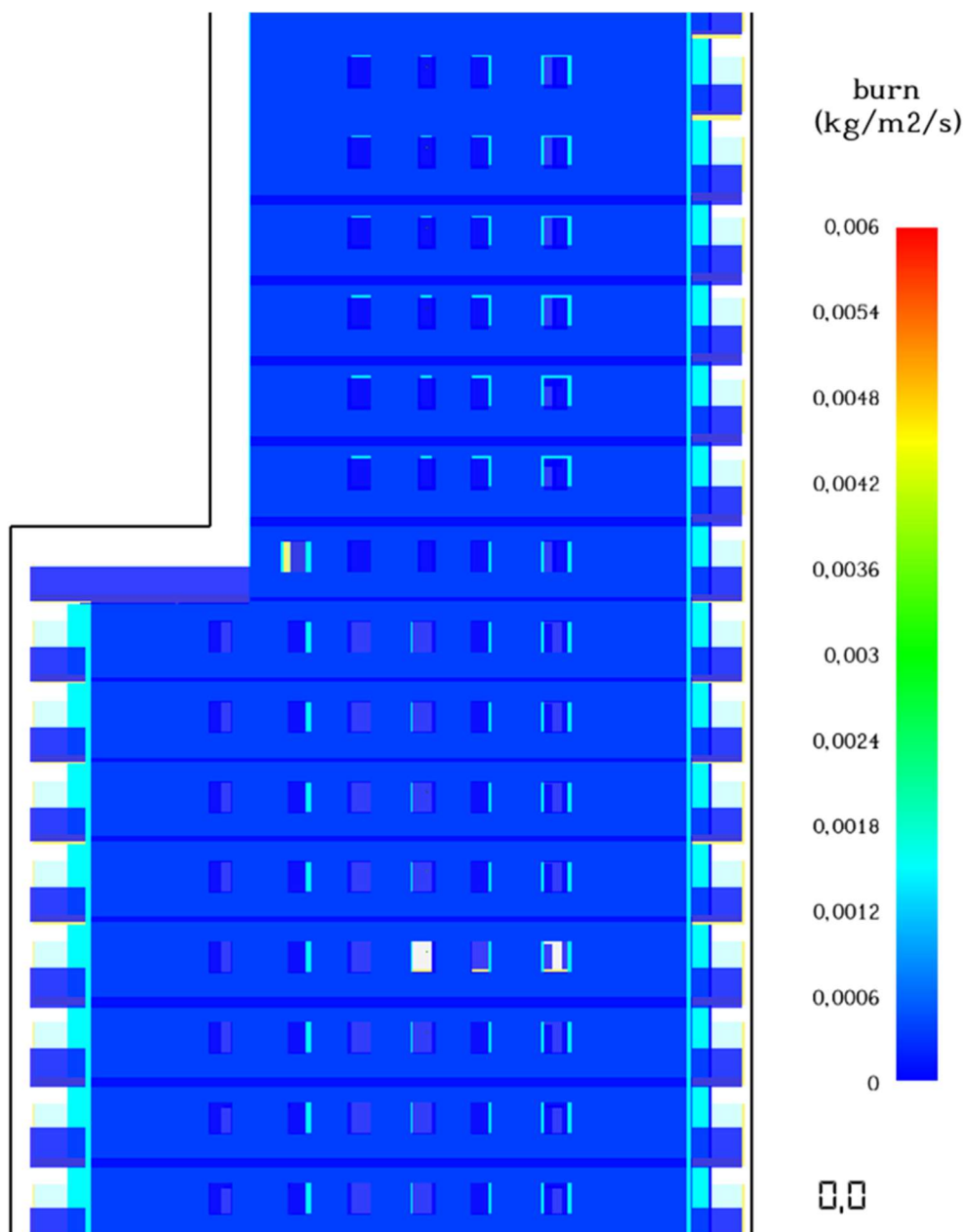


Figura 144 TLFEI_03 Burning Rate Time step 0 secondi

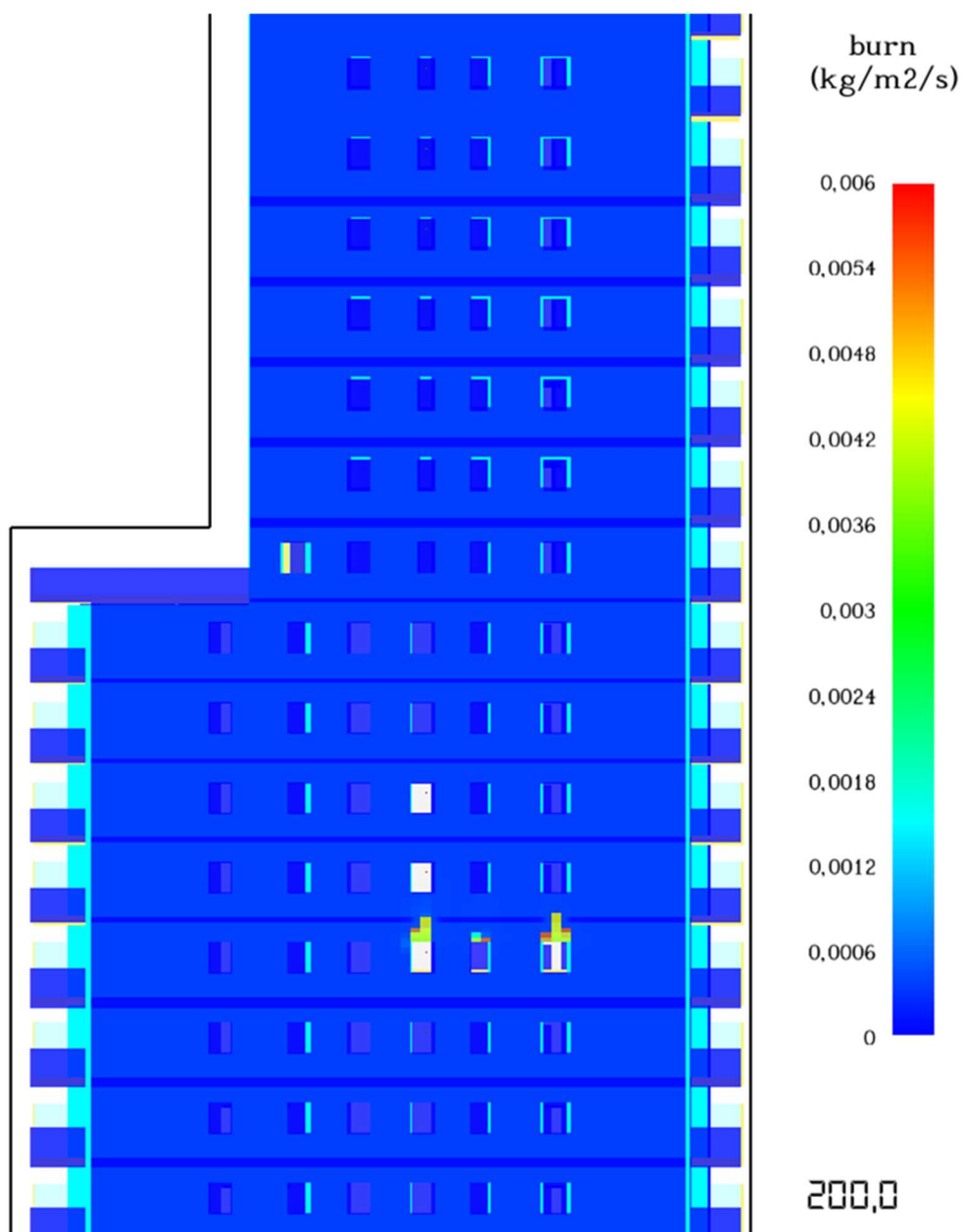


Figura 145 TLFEI_03 Burning Rate Time step 200 secondi

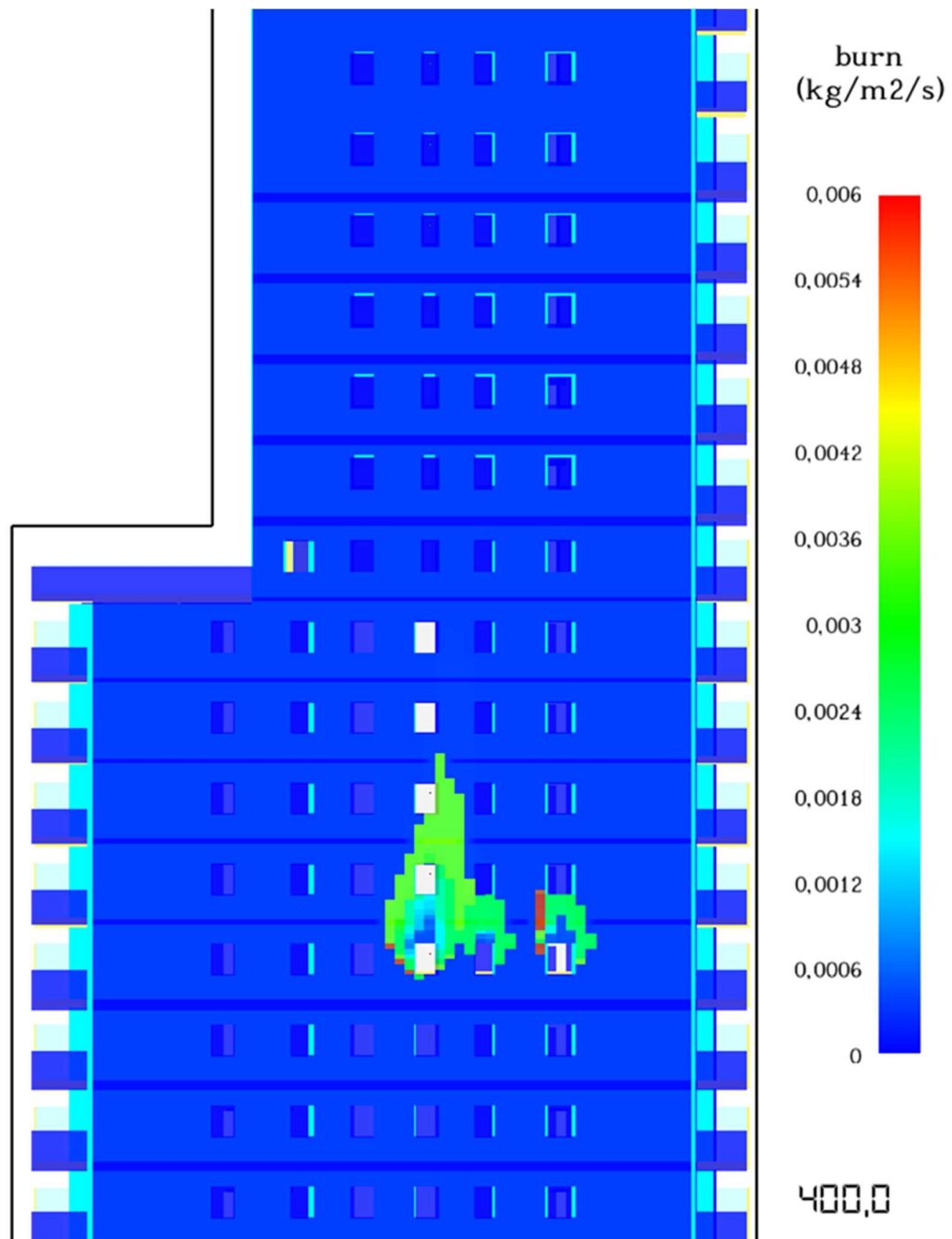


Figura 146 TLFEI_03 Burning Rate Time step 400 secondi

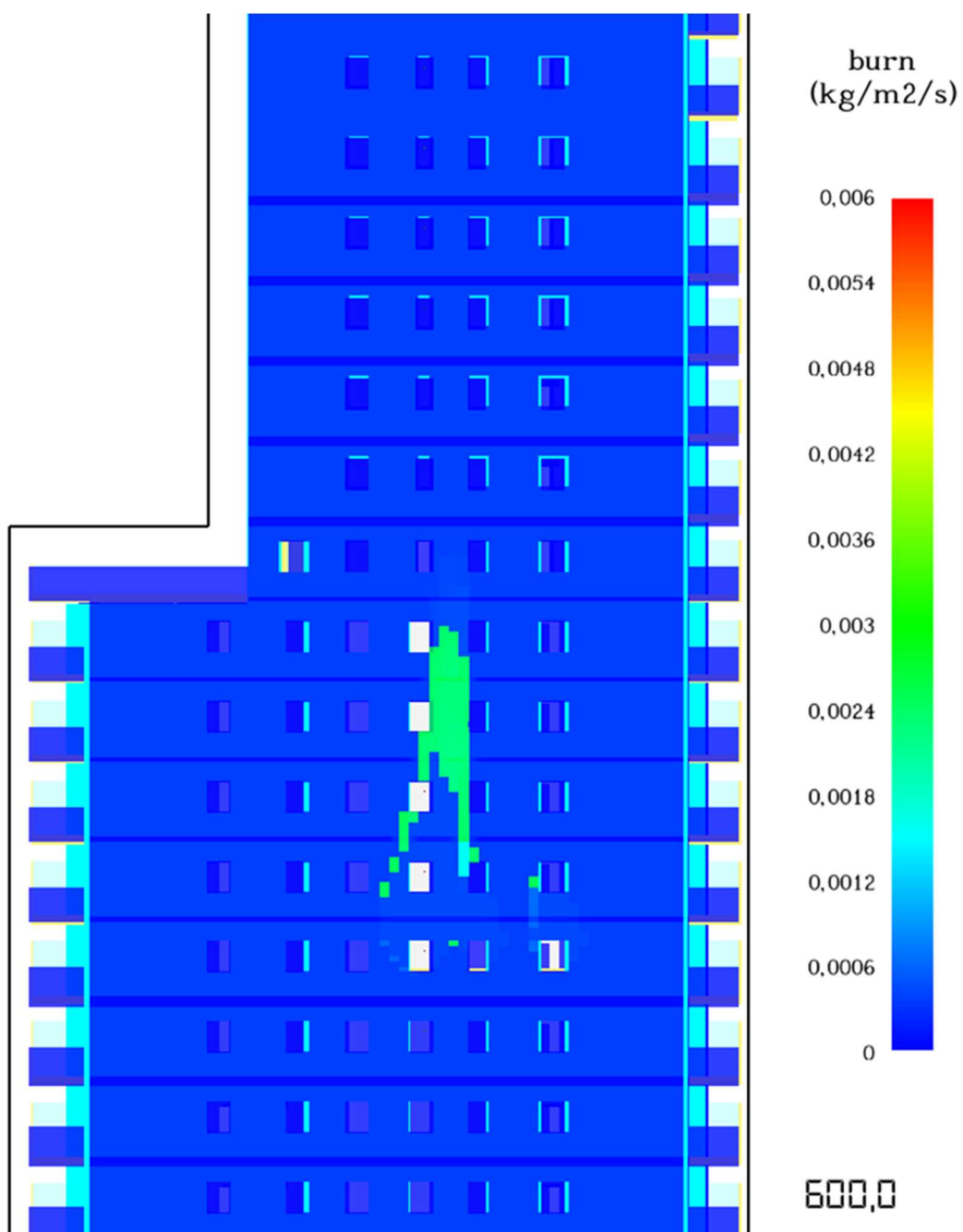


Figura 147 TLFEI_03 Burning Rate Time step 600 secondi

Incident Heat Flux

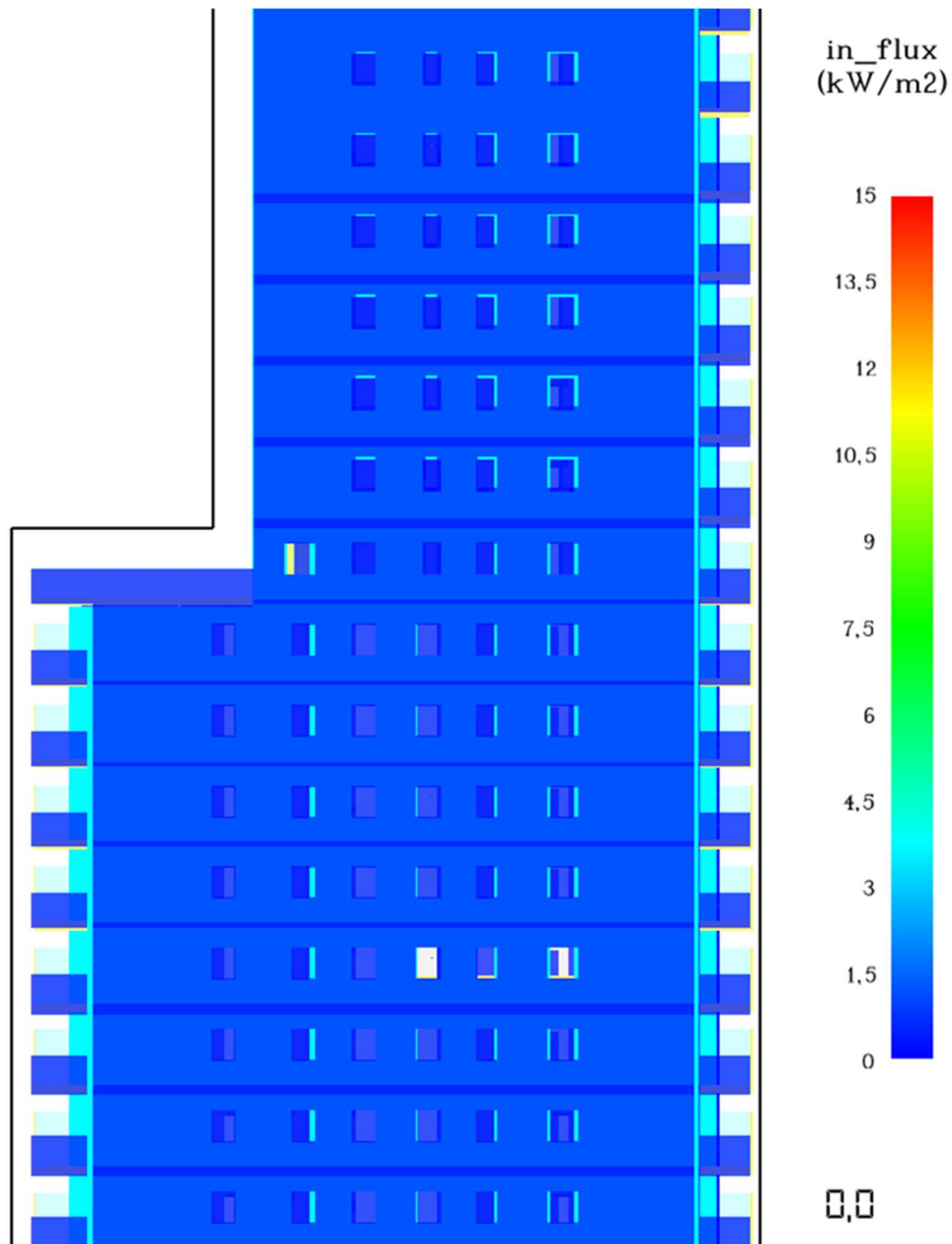


Figura 148 TLFEI_03 Incident Heat Flux Time step 0 secondi

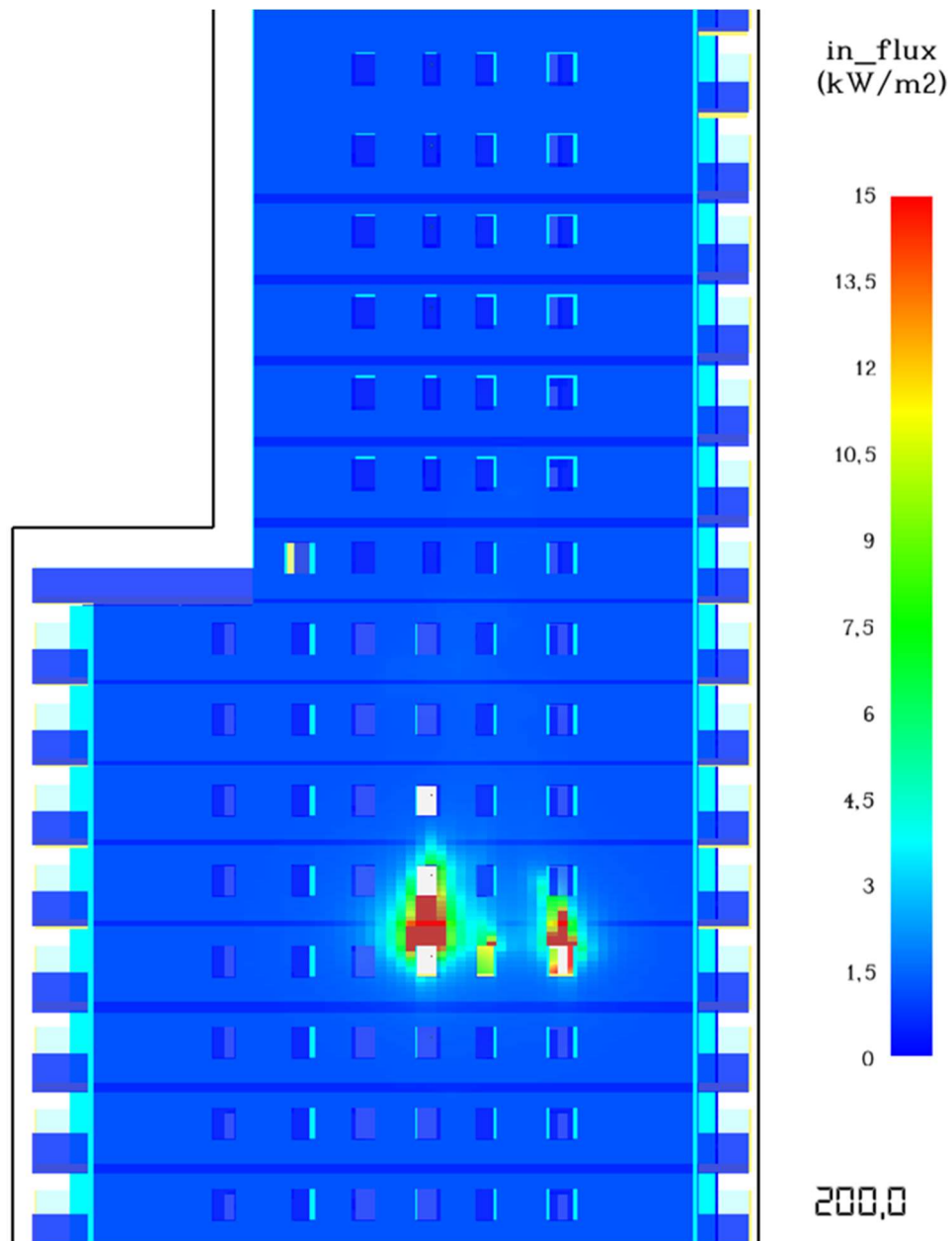


Figura 149 TLFEI_03 Incident Heat Flux Time step 200 secondi

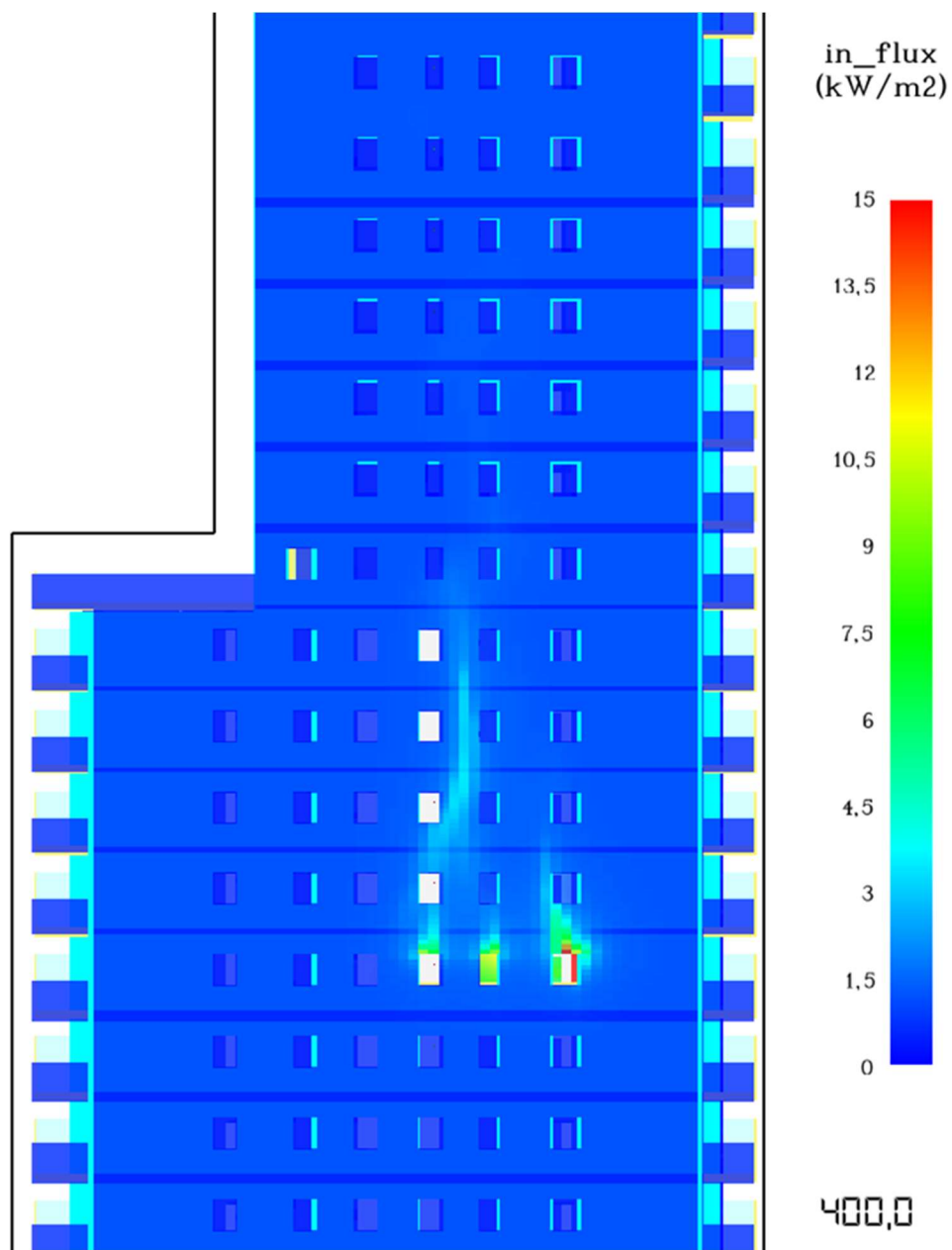


Figura 150 TLFEI_03 Incident Heat Flux Time step 400 secondi

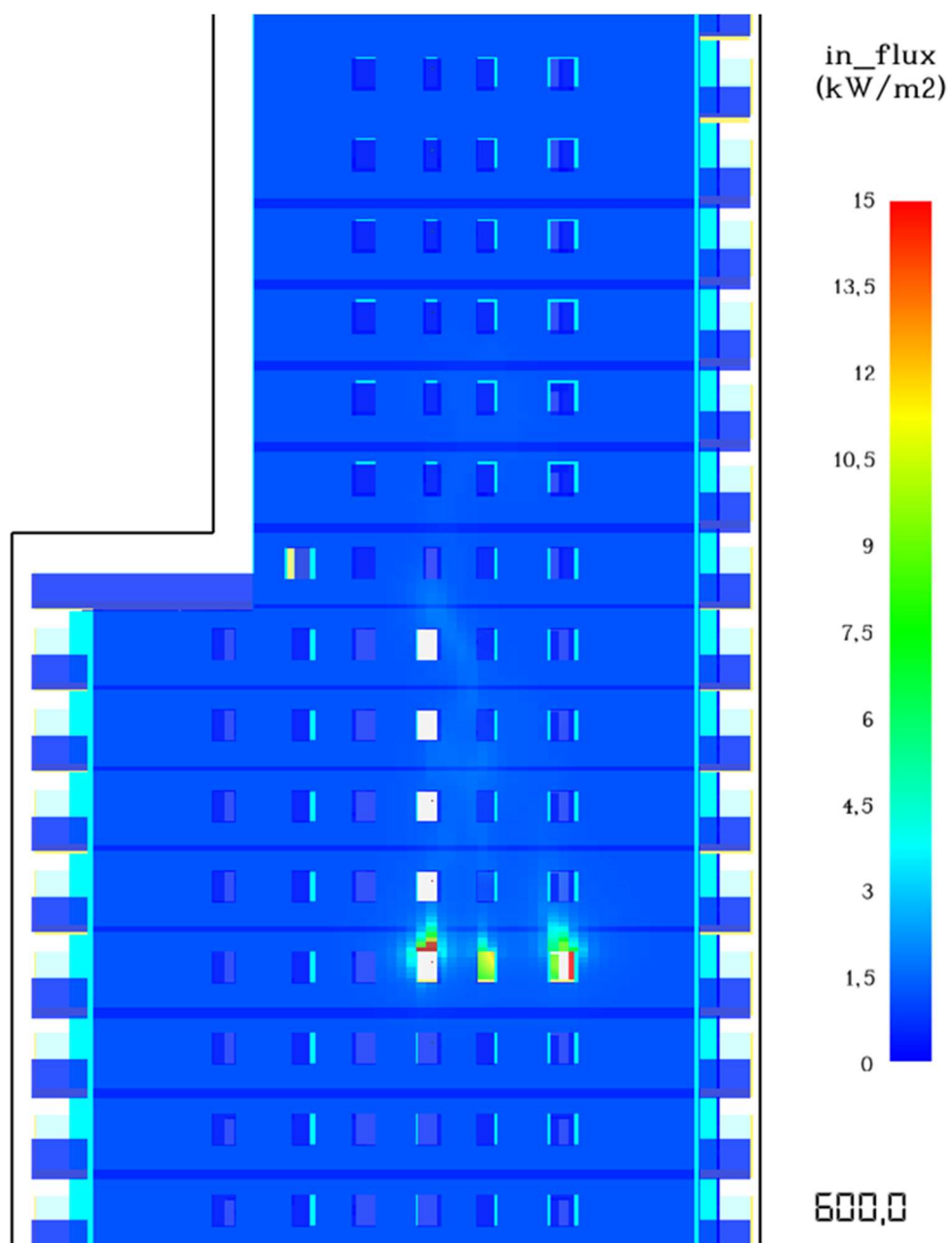


Figura 151 TLFEI_03 Incident Heat Flux Time step 600 secondi

Wall Temperature

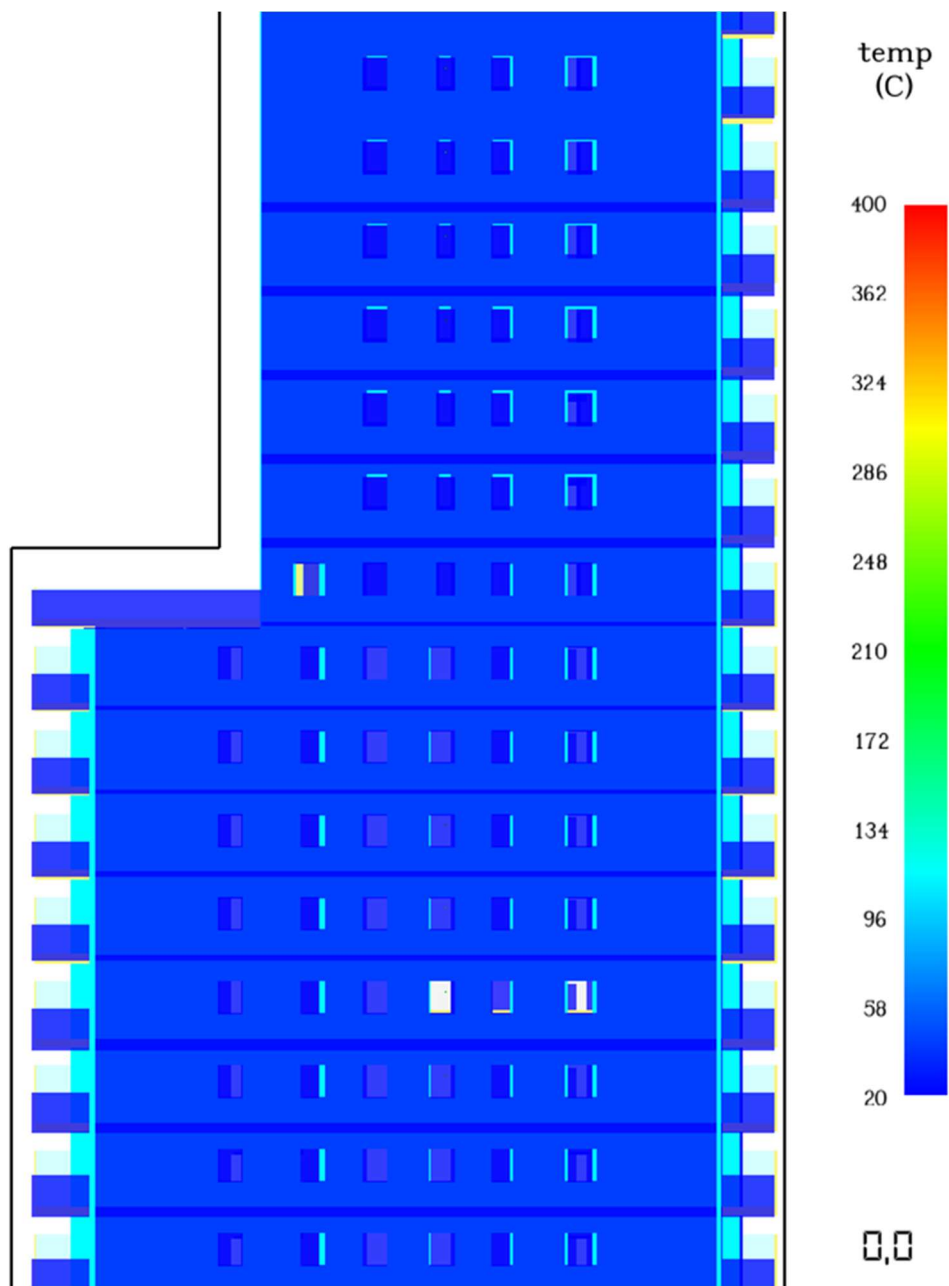


Figura 152 TLFEI_03 Wall Temperature Time step 0 secondi

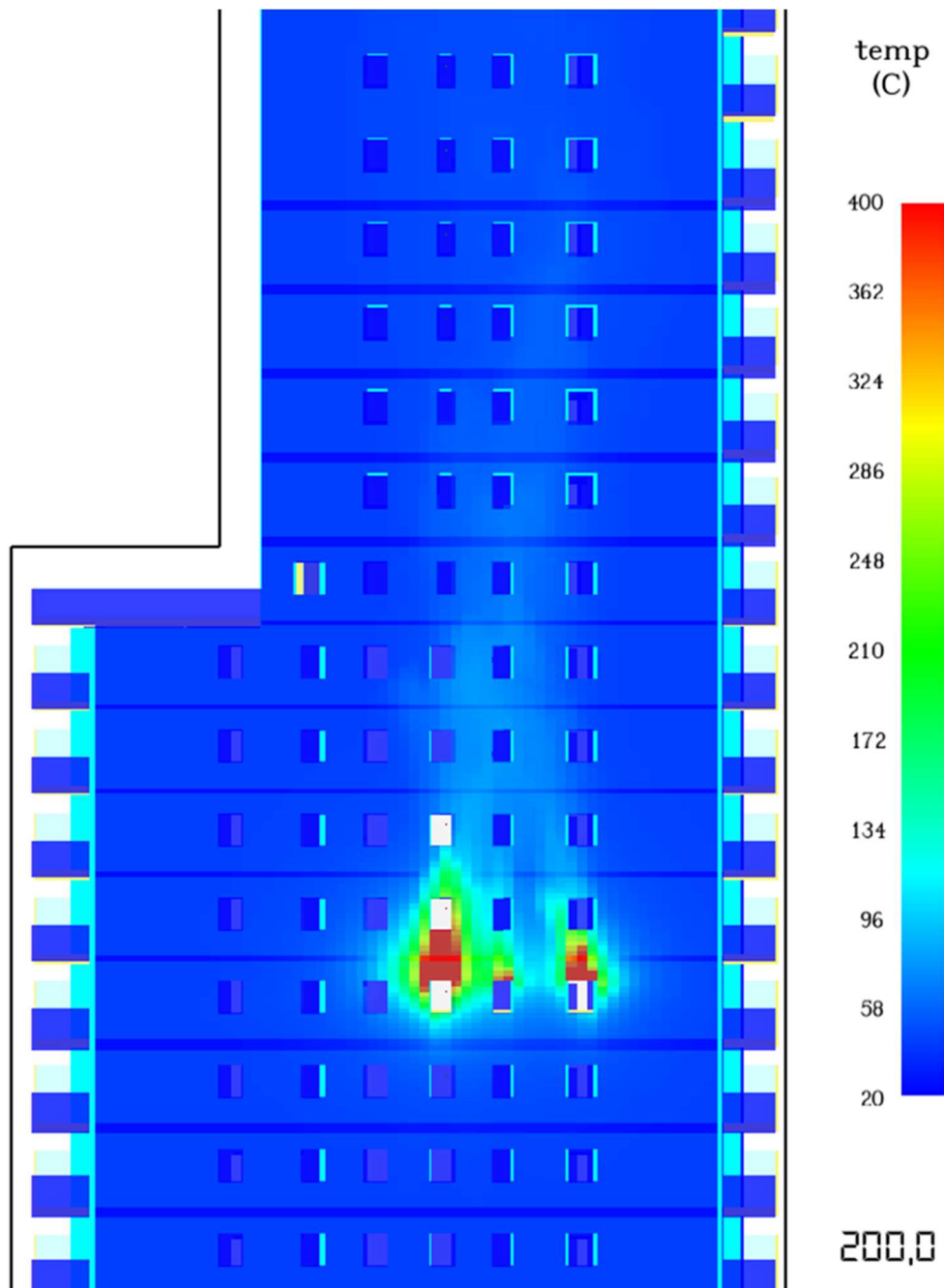


Figura 153 TLFEI_03 Wall Temperature Time step 200 secondi

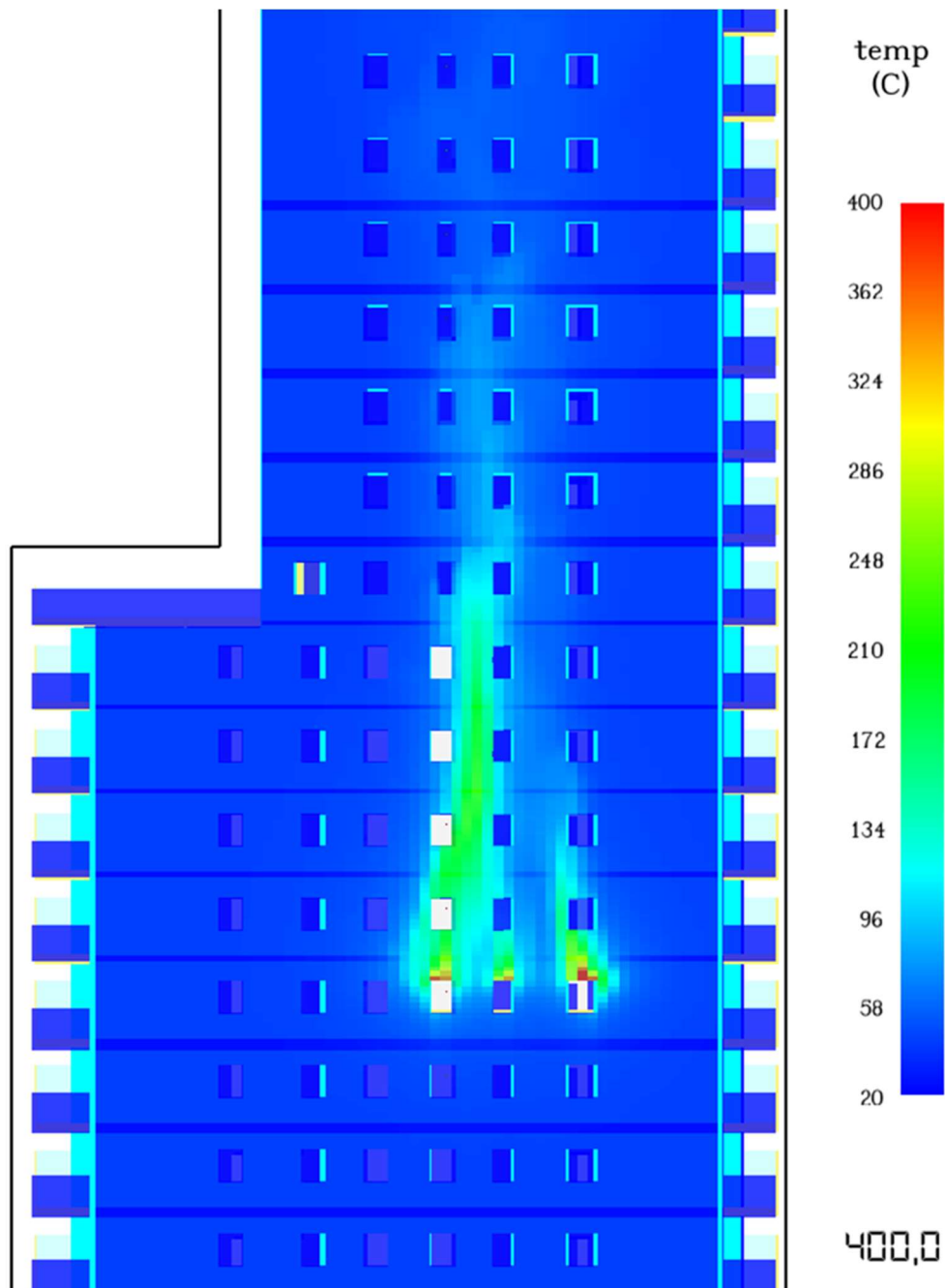


Figura 154 TLFEI_03 Wall Temperature Time step 400 secondi

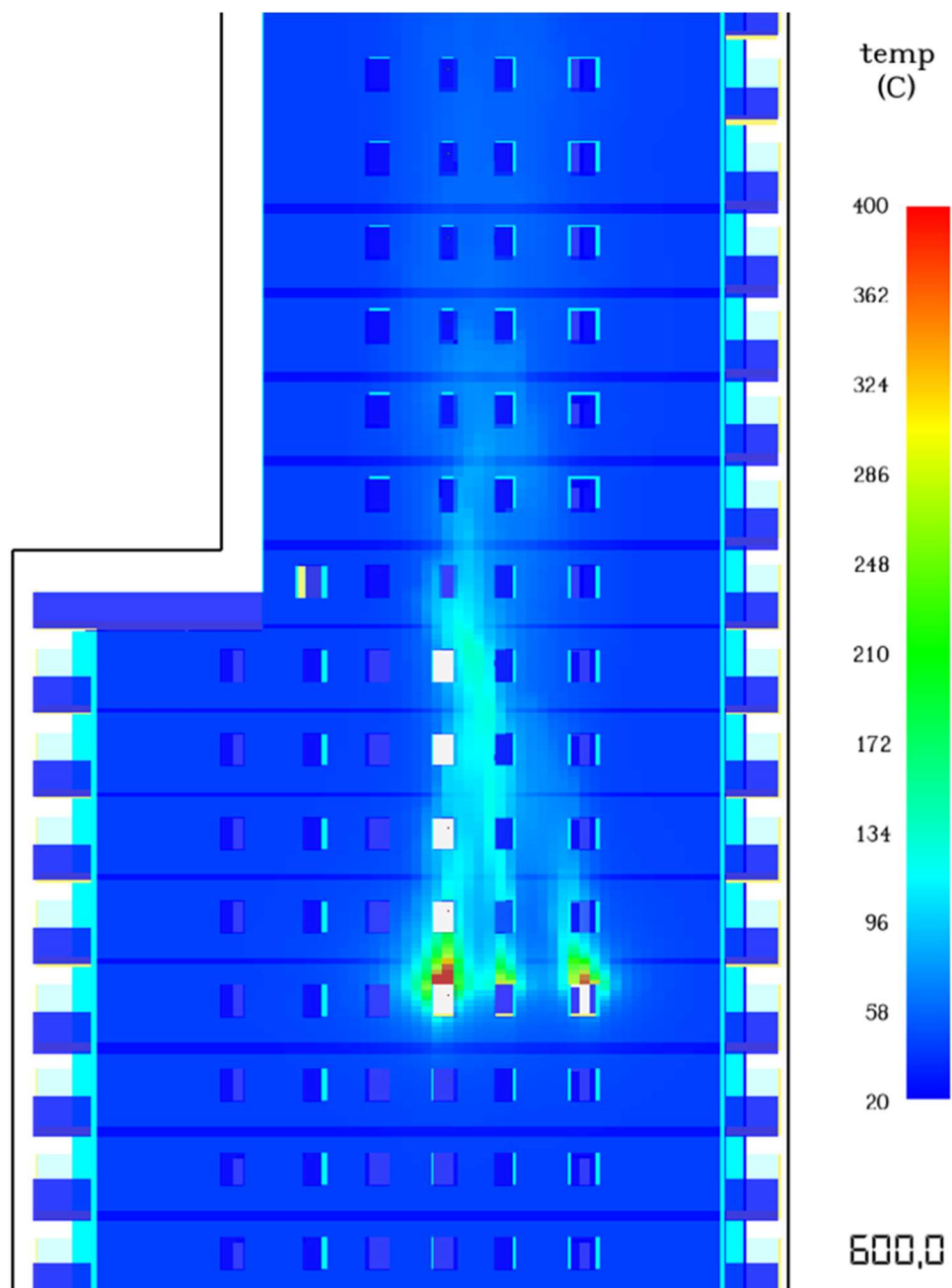


Figura 155 TLFEI_03 Wall Temperature Time step 600 secondi

5.2.4 Scenario TLFEI_04

Scenari	Estensione modello	Materiale facciata	Piano dell'incendio	Vento
TLFEI_04	Edificio Intero	ETICS + Fasce	12	\

Questo scenario è pienamente conforme alla RTV 13 del Codice di Prevenzione Incendi, sia per quanto riguarda i materiali impiegati, sia per la geometria delle soluzioni di protezione passiva adottate. L'incendio è localizzato al dodicesimo piano, in condizioni di assenza di vento.

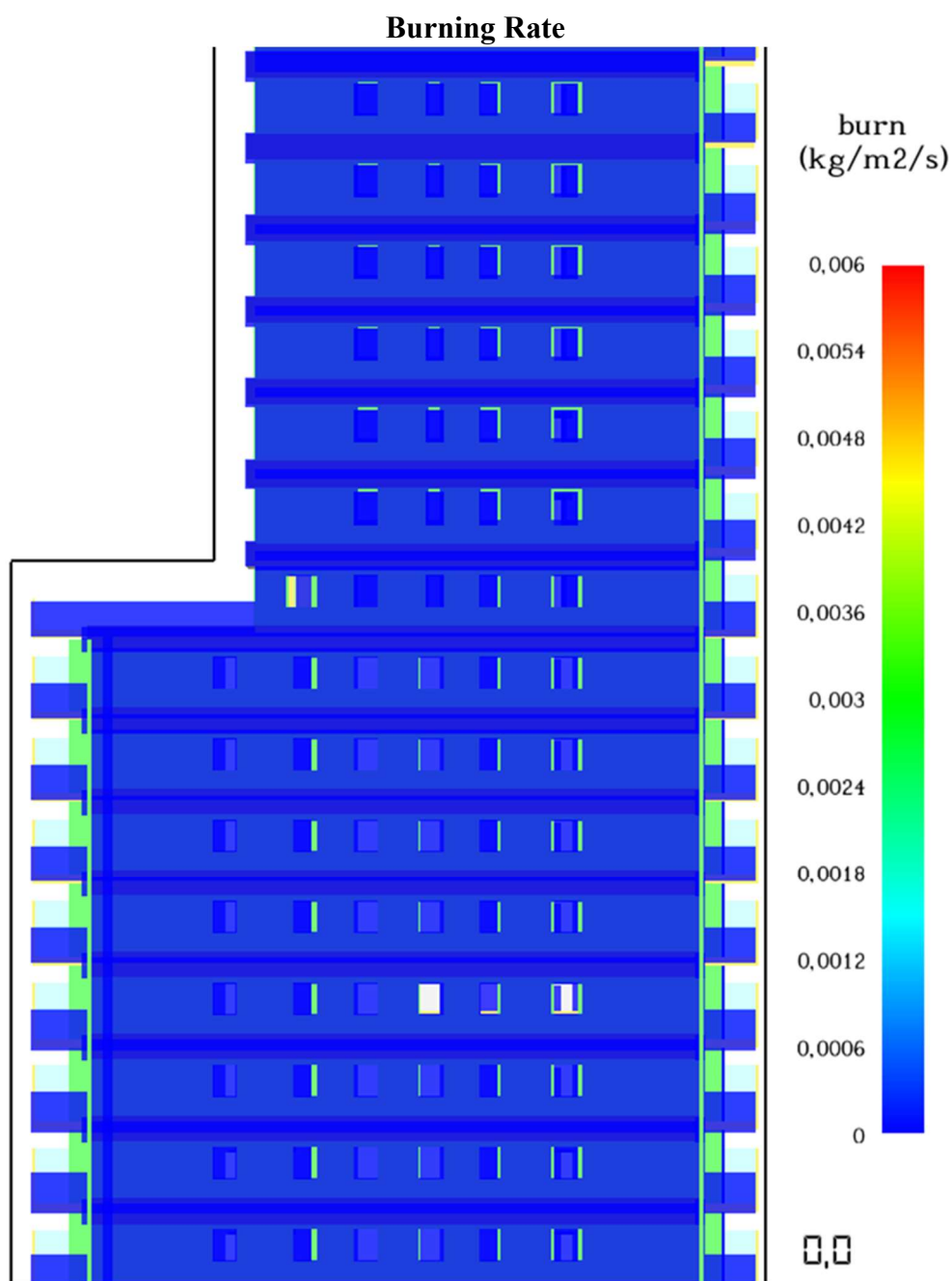


Figura 156 TLFEI_04 Burning Rate Time step 0 secondi

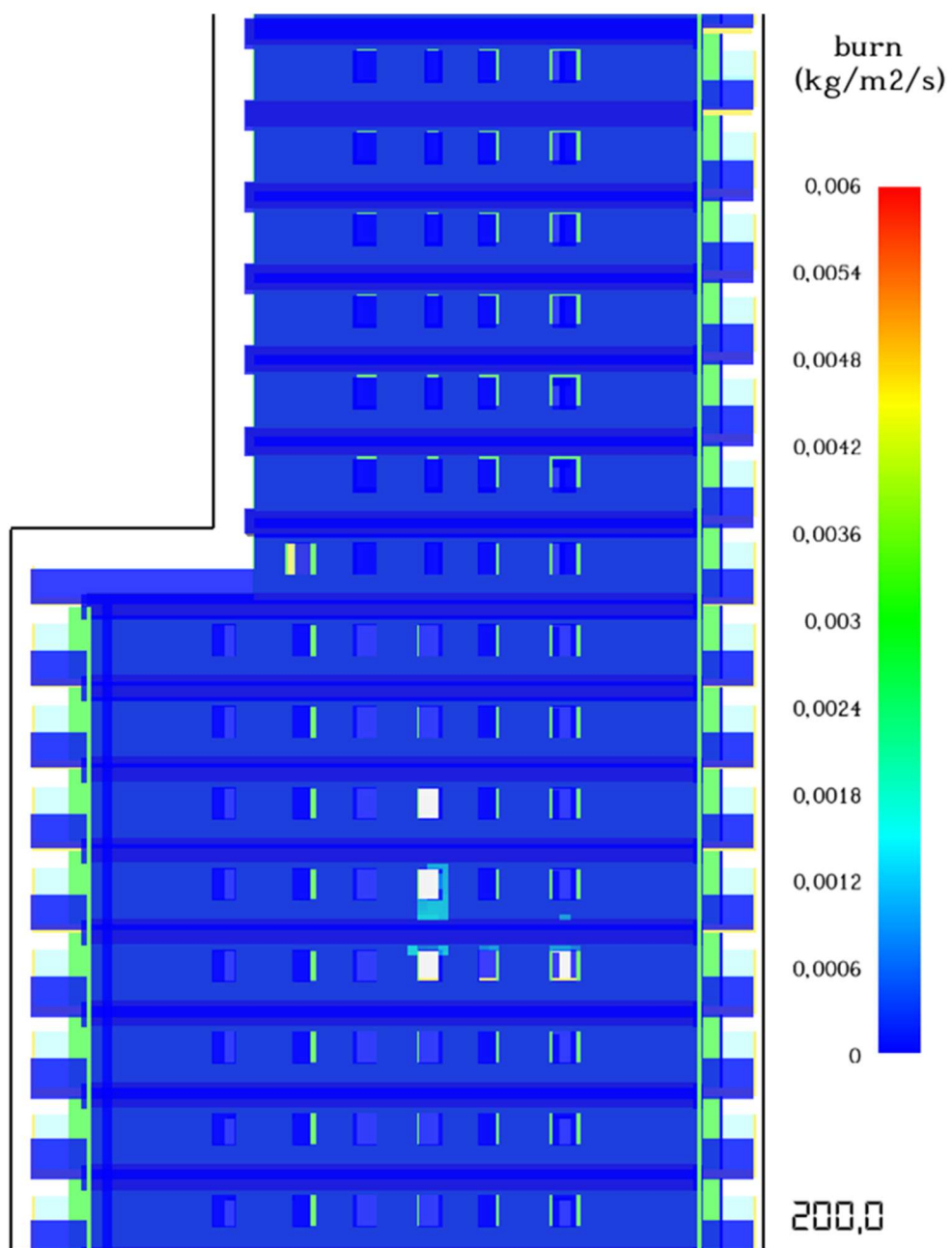


Figura 157 TLFEI_04 Burning Rate Time step 200 secondi

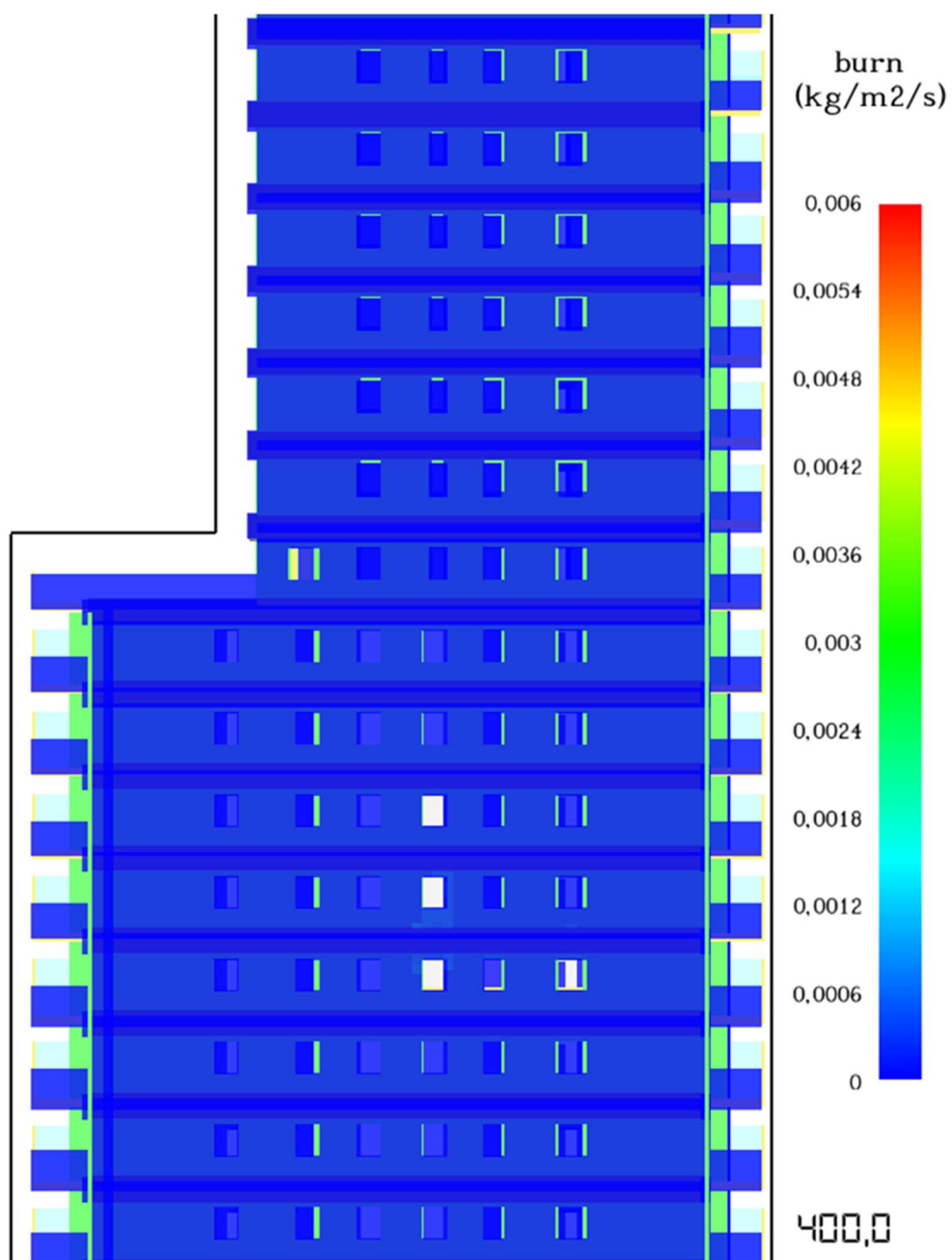


Figura 158 TLFEI_04 Burning Rate Time step 400 secondi

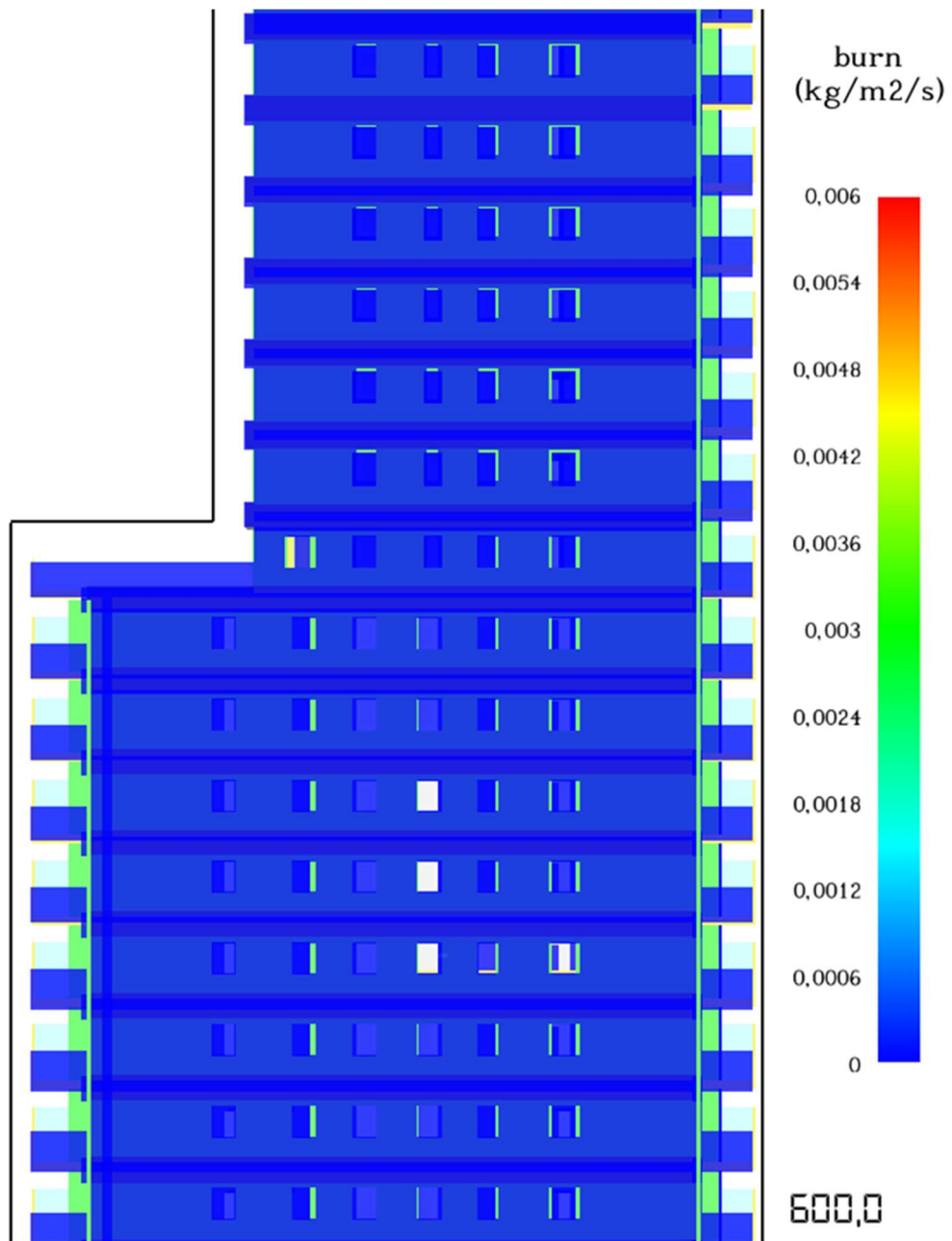


Figura 159 TLFEI_04 Burning Rate Time step 600 secondi

Incident Heat Flux

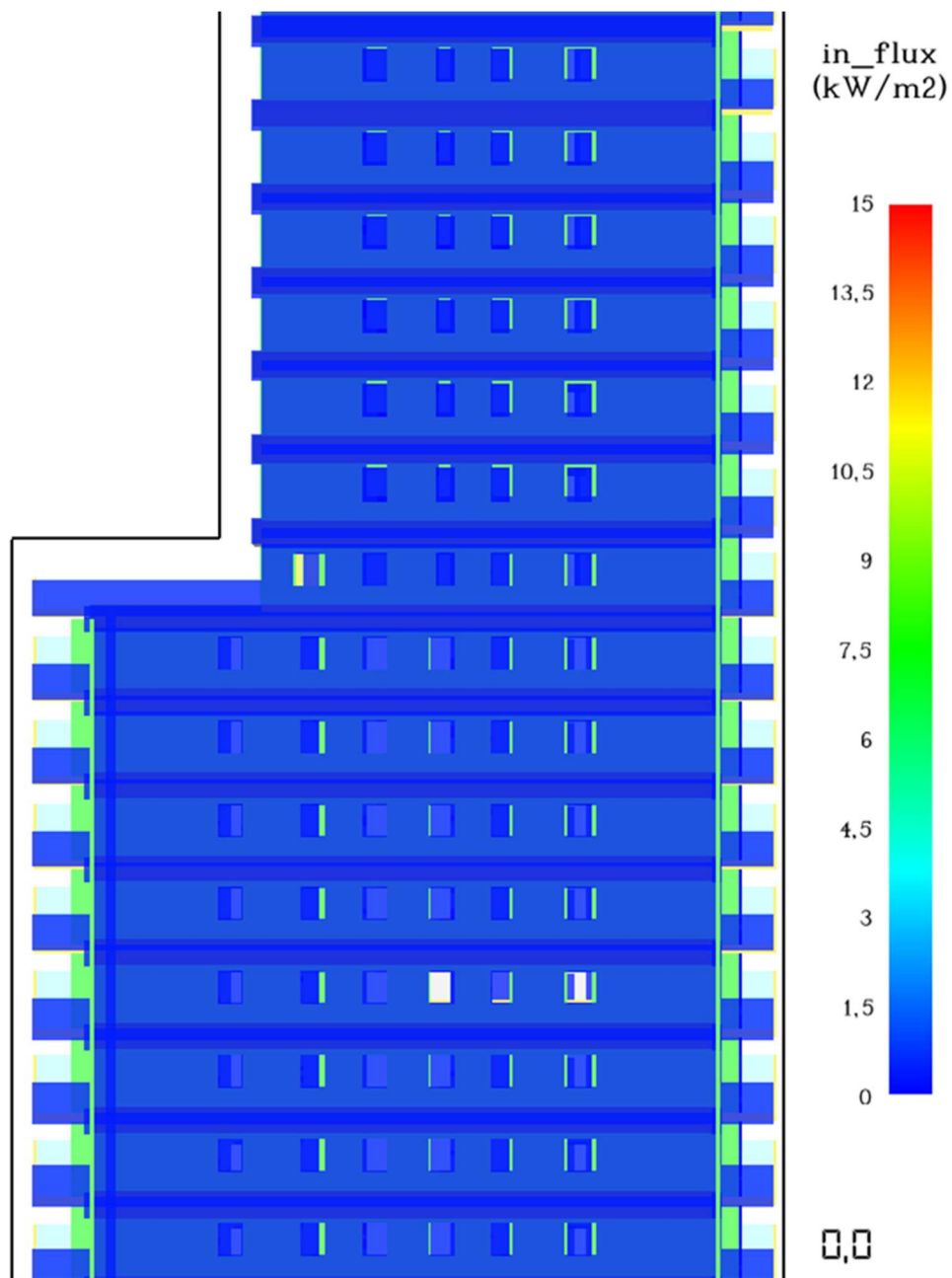


Figura 160 TLFEI_04 Incident Heat Flux Time step 0 secondi

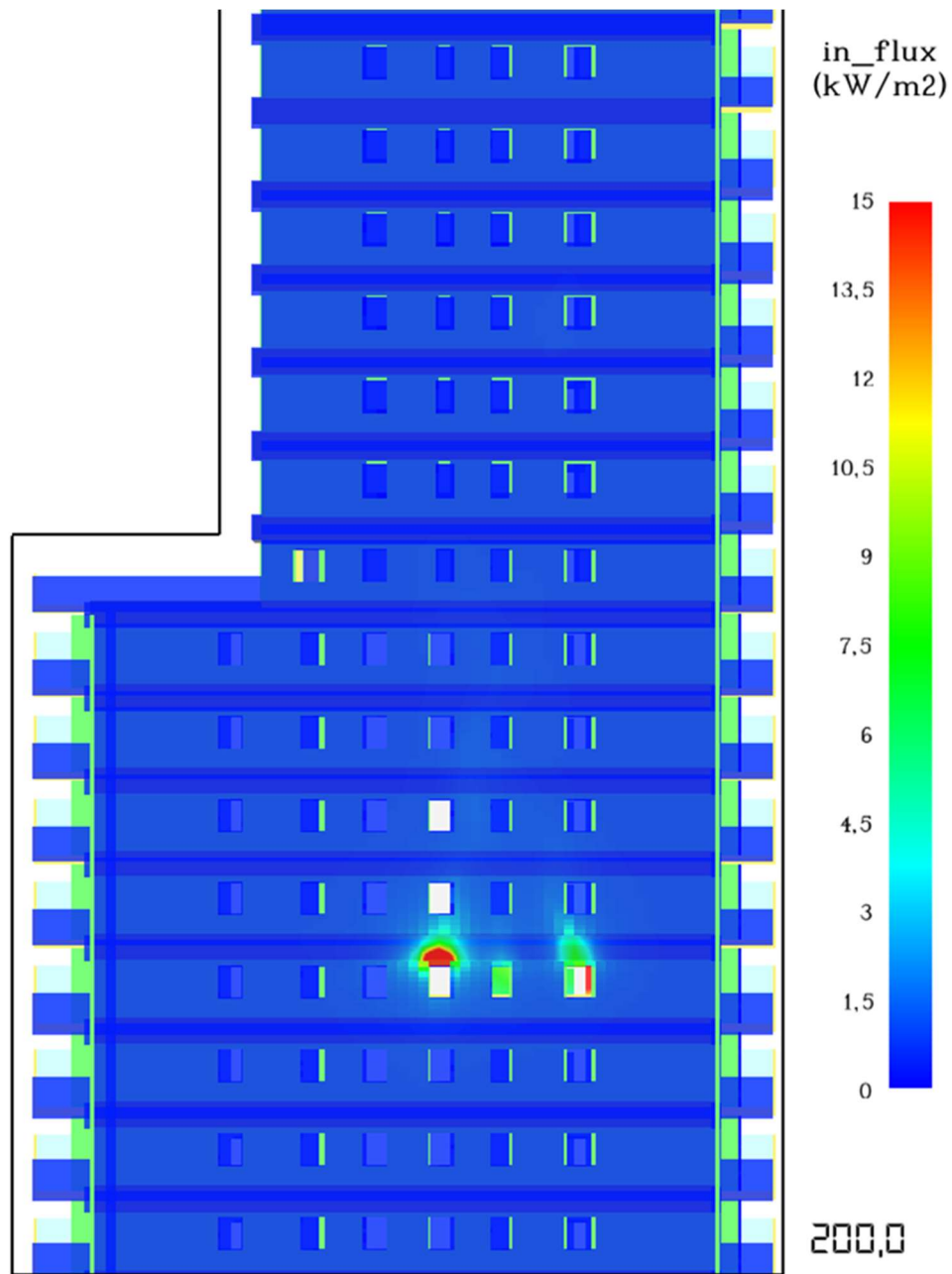


Figura 161 TLFEI_04 Incident Heat Flux Time step 200 secondi

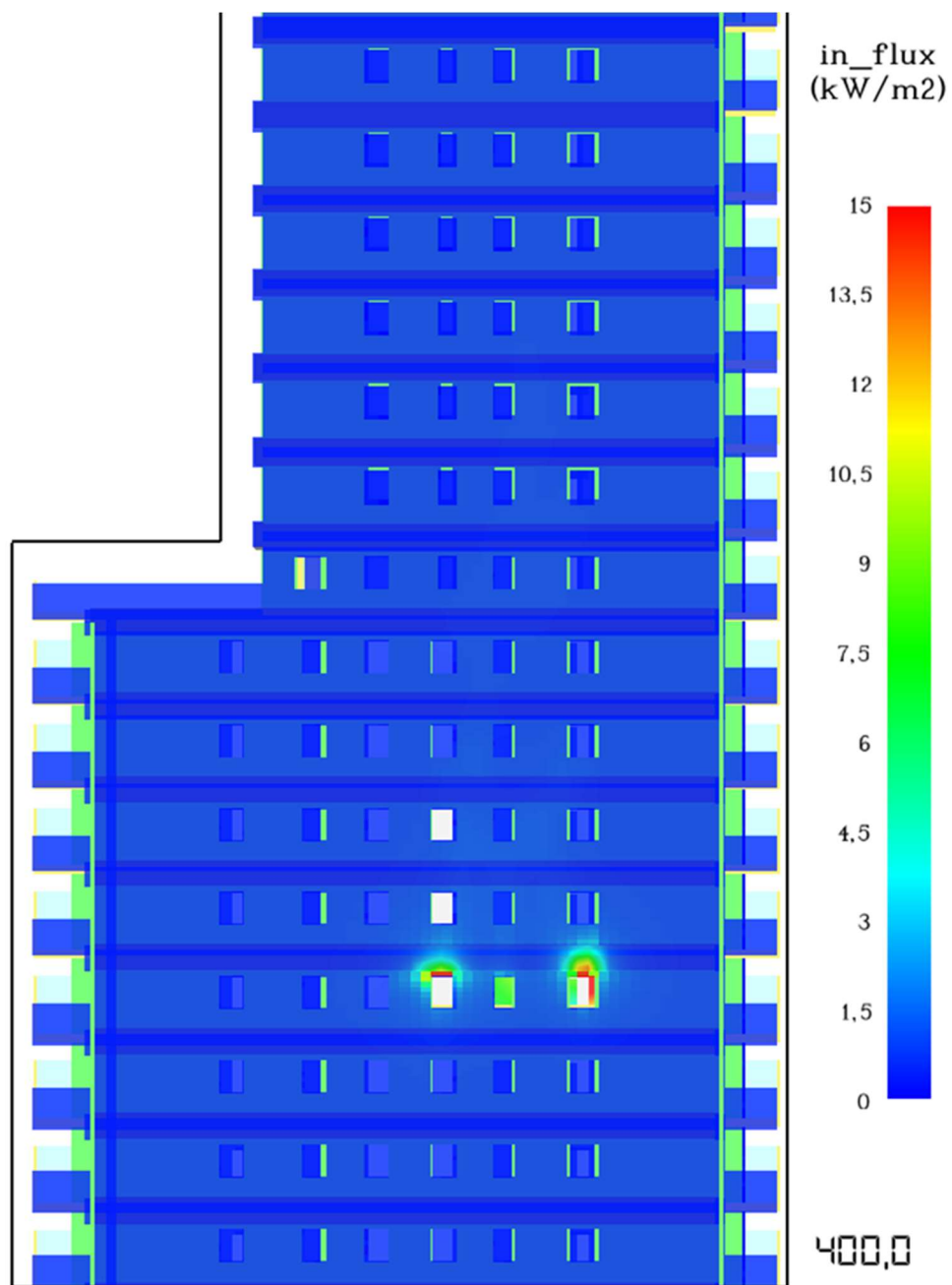


Figura 162 TLFEI_04 Incident Heat Flux Time step 400 secondi

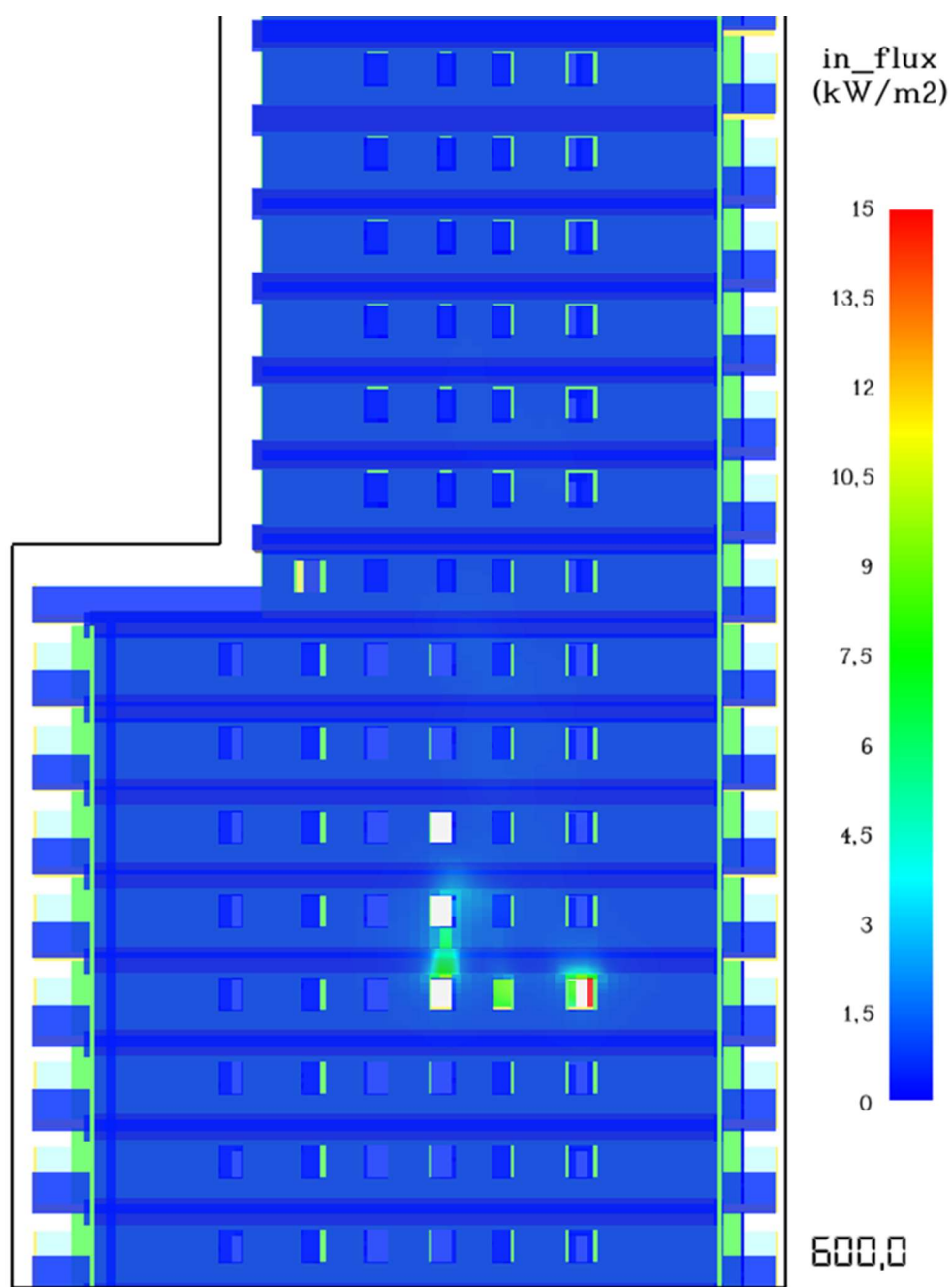


Figura 163 TLFEI_04 Incident Heat Flux Time step 600 secondi

Wall Temperature

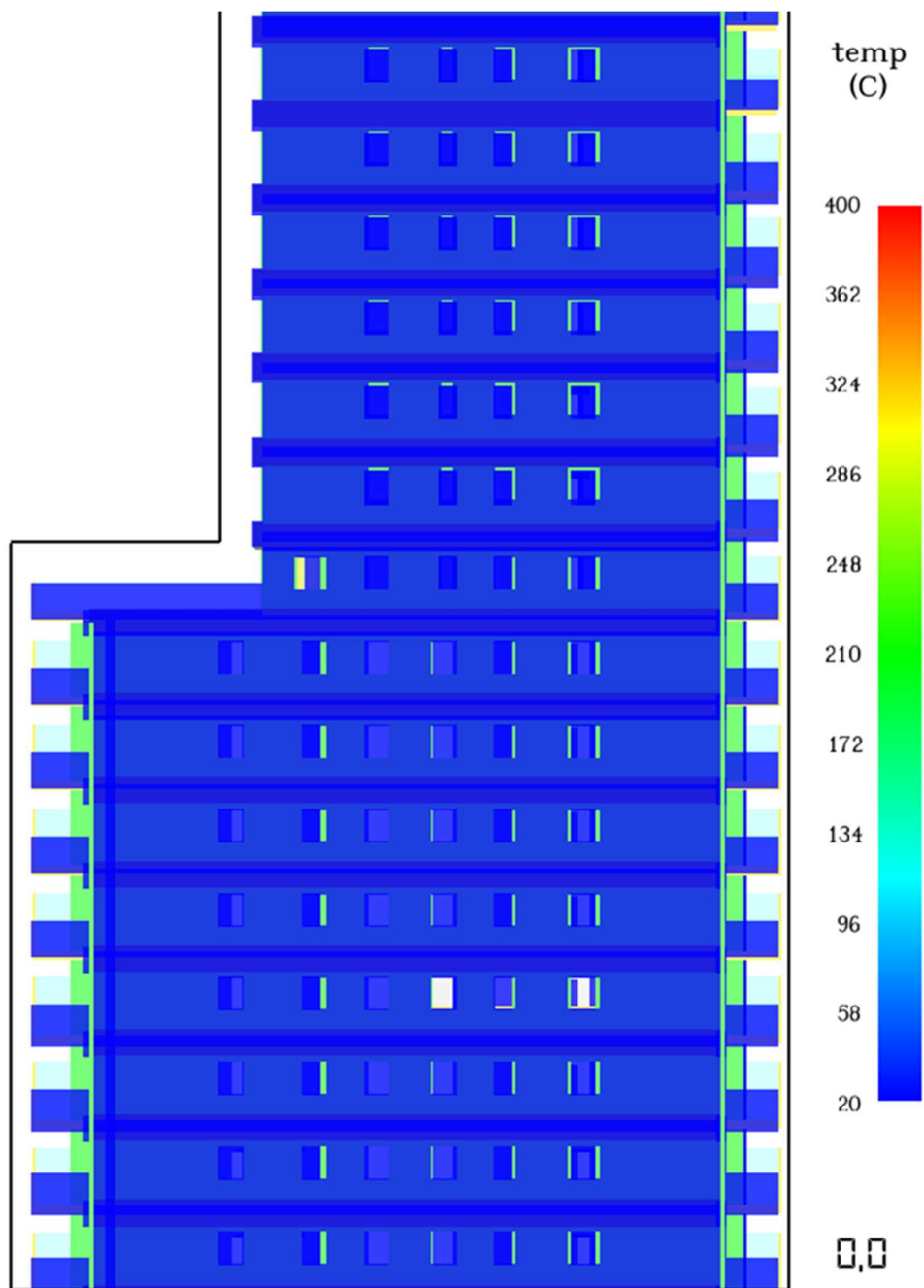


Figura 164 TLFEI_04 Wall Temperature Time step 0 secondi

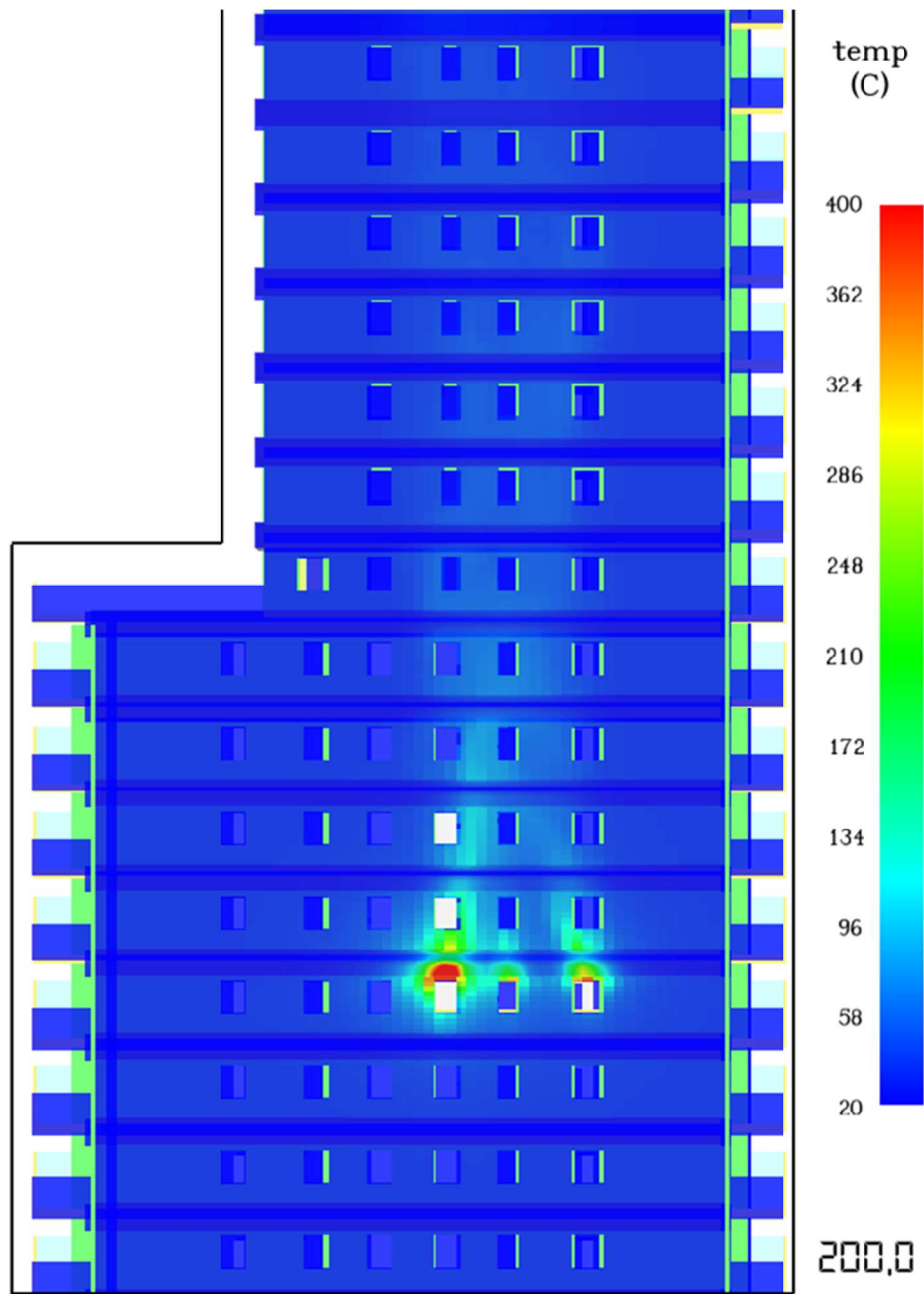


Figura 165 TLFEI_04 Wall Temperature Time step 200 secondi

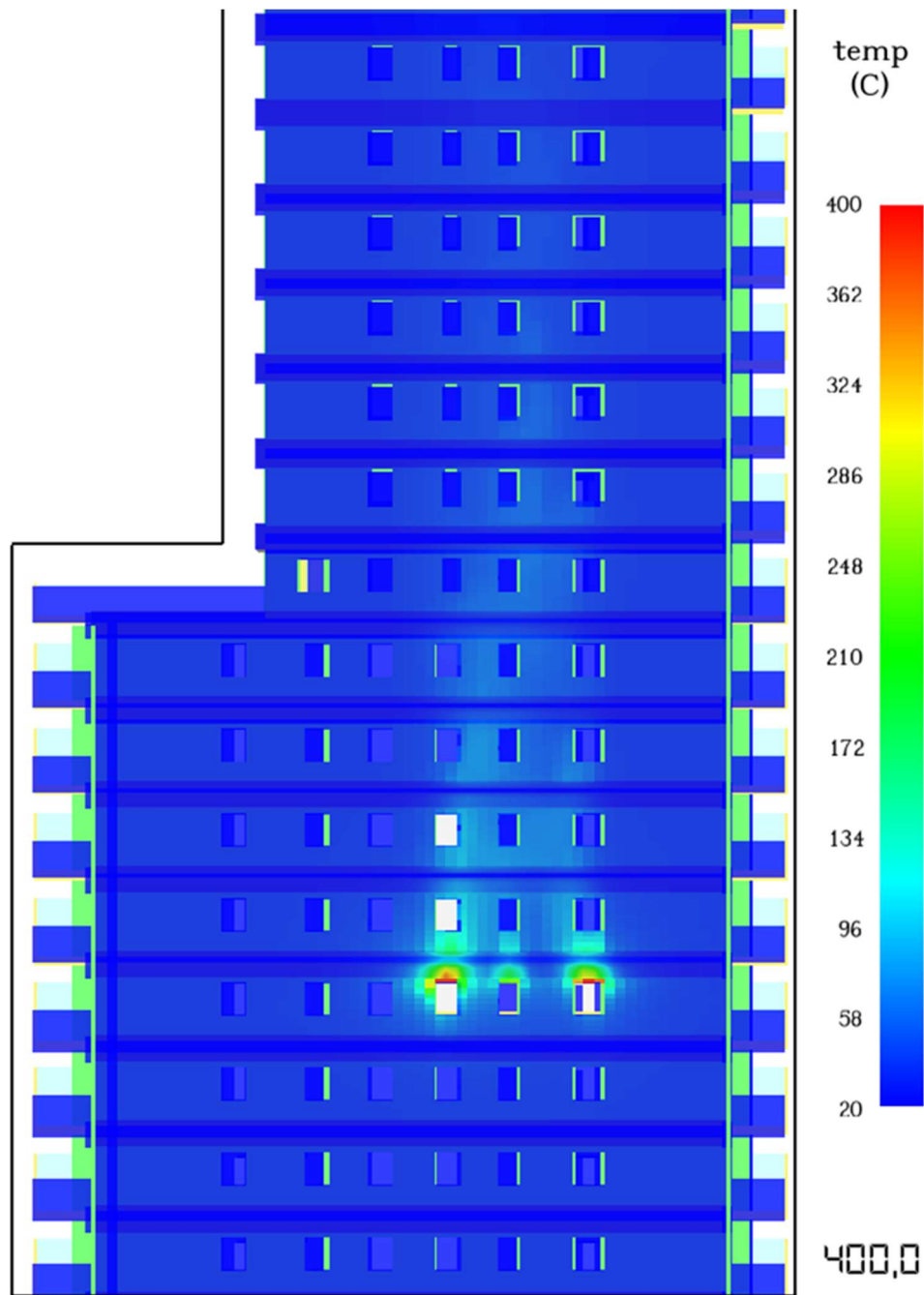


Figura 166 TLFEI_04 Wall Temperature Time step 400 secondi

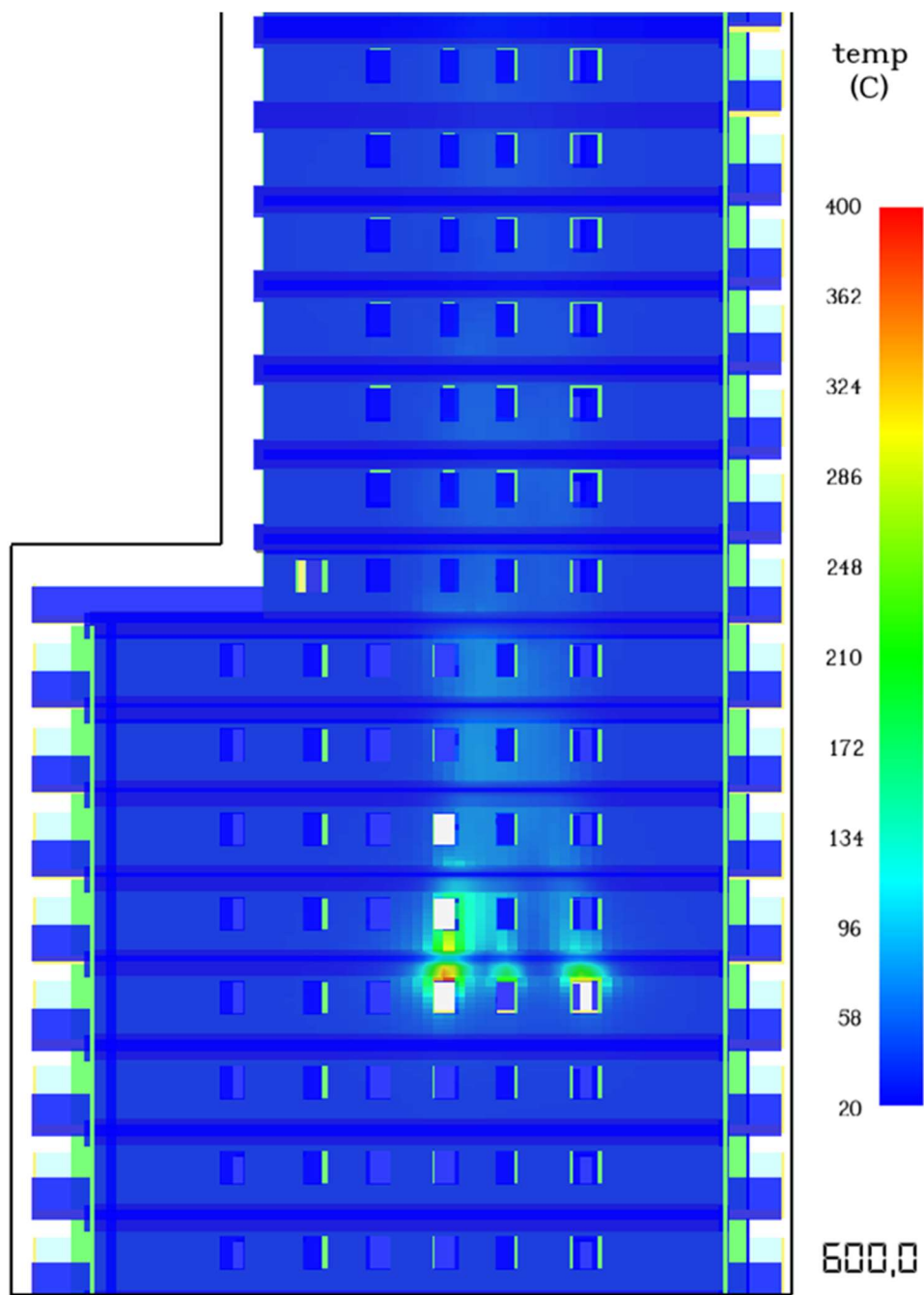


Figura 167 TLFEI_04 Wall Temperature Time step 600 secondi

5.3 Confronto prestazionale tra le due soluzioni alternative

5.3.1 Confronto tempi di innesco compartimento superiore

Dalle simulazioni effettuate, considerando in questa fase specifica il parametro del Burning Rate, emerge con evidenza come i tempi necessari all'innesco del compartimento superiore dell'edificio costituiscano un elemento discriminante tra le due soluzioni progettuali analizzate. Tale parametro risulta infatti cruciale ai fini della sicurezza sia degli occupanti sia dell'opera nel suo complesso. Nel dettaglio, la soluzione con isolante in EPS e fasce di separazione, ha mostrato tempi di innesco pari a 252,7 secondi per il modello a due piani e 234 secondi per il modello dell'intero edificio. Al contrario, la soluzione sempre con EPS ma dotata di marcapiani sporgenti ha ritardato significativamente l'innesco, che si è verificato a 545 secondi nel modello a due piani e a 305,1 secondi nel modello completo. A scopo comparativo, sono state inserite anche le immagini del modello di controllo (privo di protezioni passive) agli istanti temporali di 545 e 305 secondi, corrispondenti rispettivamente ai momenti di innesco della soluzione più performante nei due modelli. Questo confronto visivo evidenzia in modo chiaro l'efficacia della soluzione alternativa nel rallentare la propagazione dell'incendio.

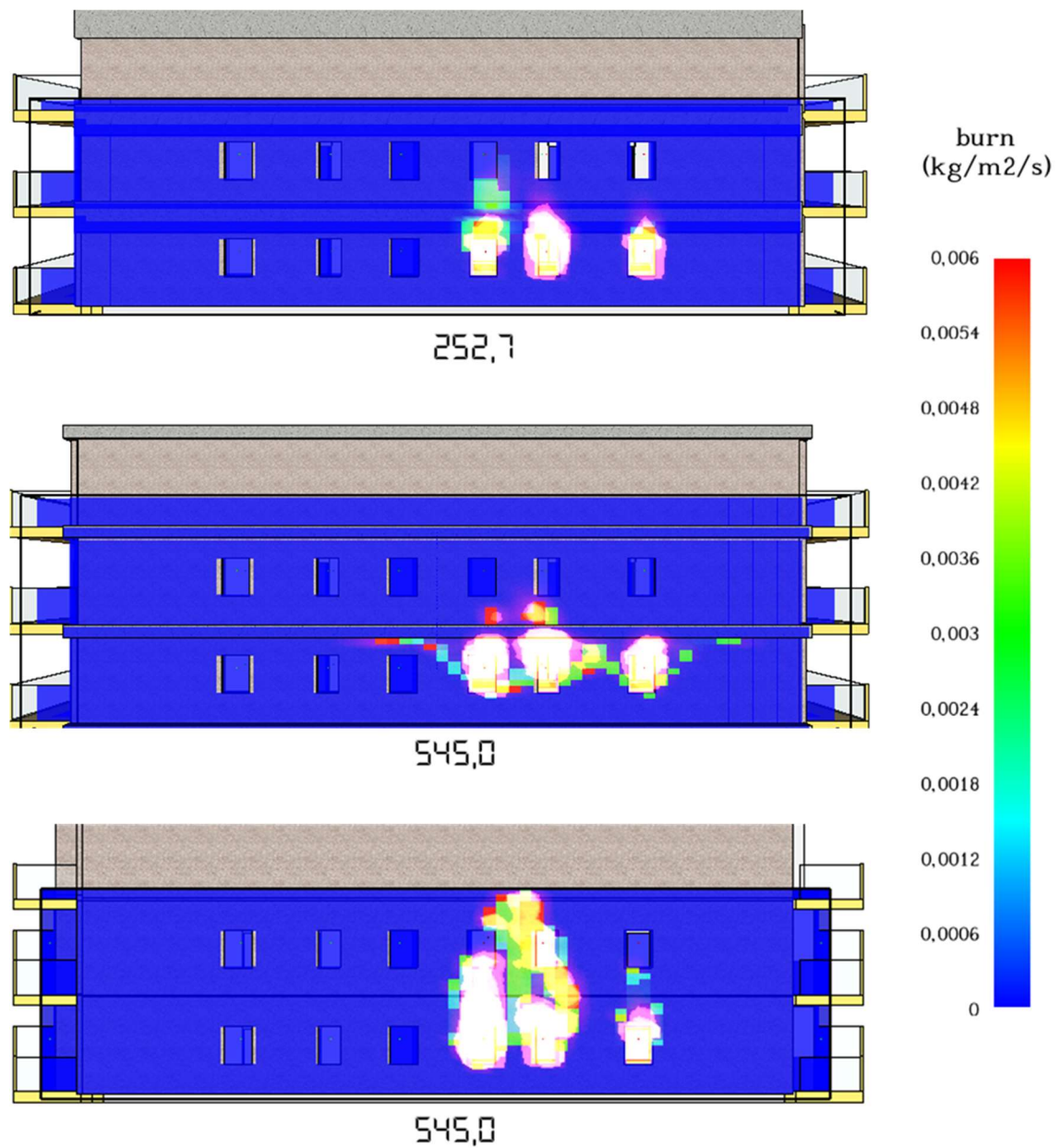


Figura 168 Confronto tempi di innesco compartimento superiore modelli a due piani (In alto EPS con fasce di separazione; al centro EPS con marcapiano sporgente e in basso EPS privo di protezione passiva)

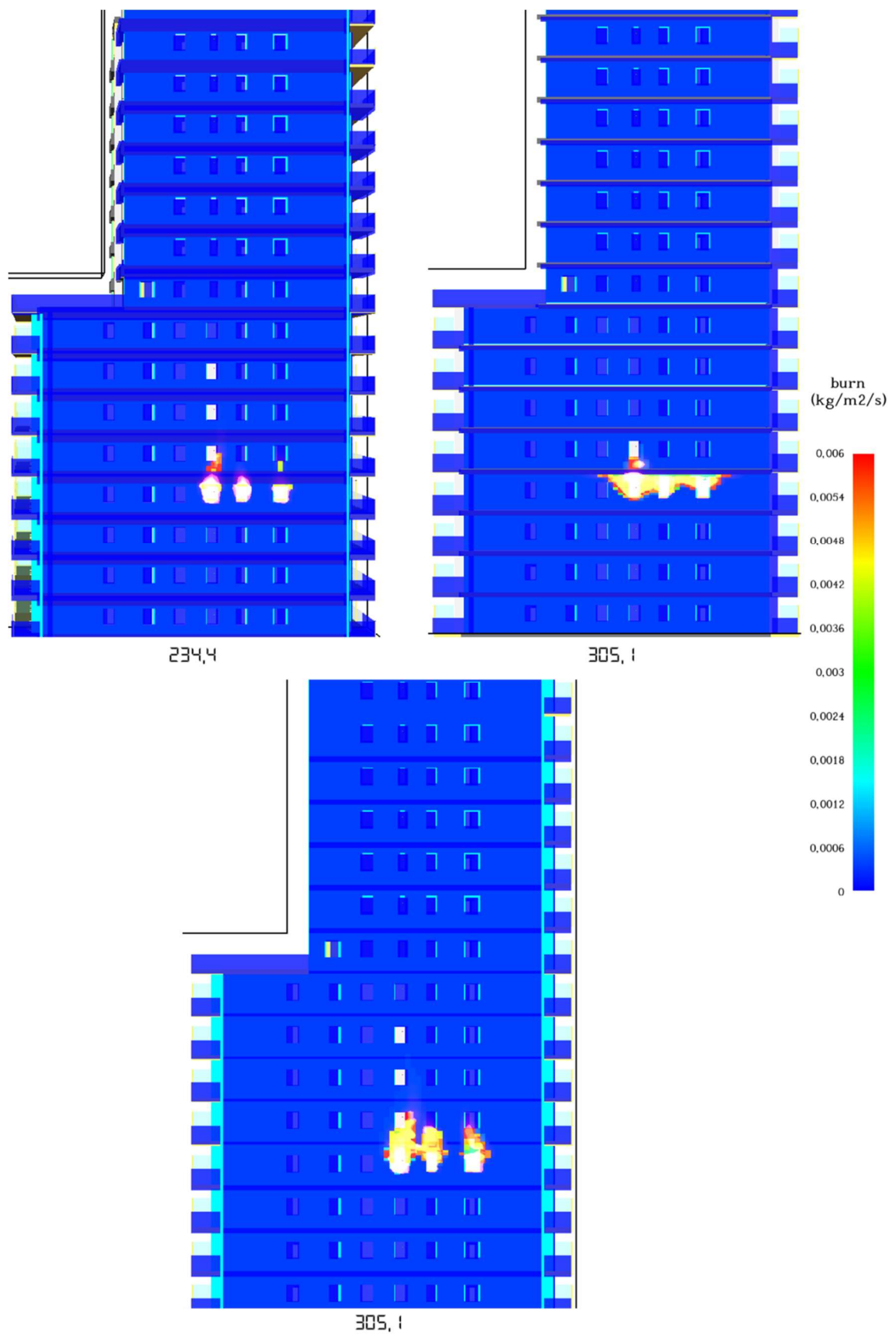


Figura 169 Confronto tempi di innesco compartimento superiore modelli di edificio intero (In alto a sinistra EPS con fasce di separazione; in alto a destra EPS con marcapiano sporgente e in basso EPS privo di protezione passiva)

5.3.2 Confronto temperature interne

Il confronto tra le diverse soluzioni progettuali è stato condotto analizzando le temperature raggiunte sia all'interno che all'esterno dei compartimenti. In particolare, sono stati considerati i valori registrati dalle sonde di temperatura presenti in ciascun modello. Le sonde che hanno rilevato i picchi di temperatura più elevati sono state selezionate e confrontate tra i diversi scenari, al fine di valutare l'effettiva efficacia delle soluzioni adottate nel contenimento e nella propagazione dell'incendio. La disposizione dei dispositivi di rilevazione della temperatura è illustrata nell'immagine seguente: le sonde esterne sono posizionate per monitorare la temperatura in prossimità delle superfici vetrate, valutando il raggiungimento delle condizioni termiche tali da causarne la rottura. Le sonde interne, invece, rilevano la temperatura all'interno del compartimento, parametro che evidenzia la probabilità che si verifichino le condizioni di innesco di un nuovo focolare.

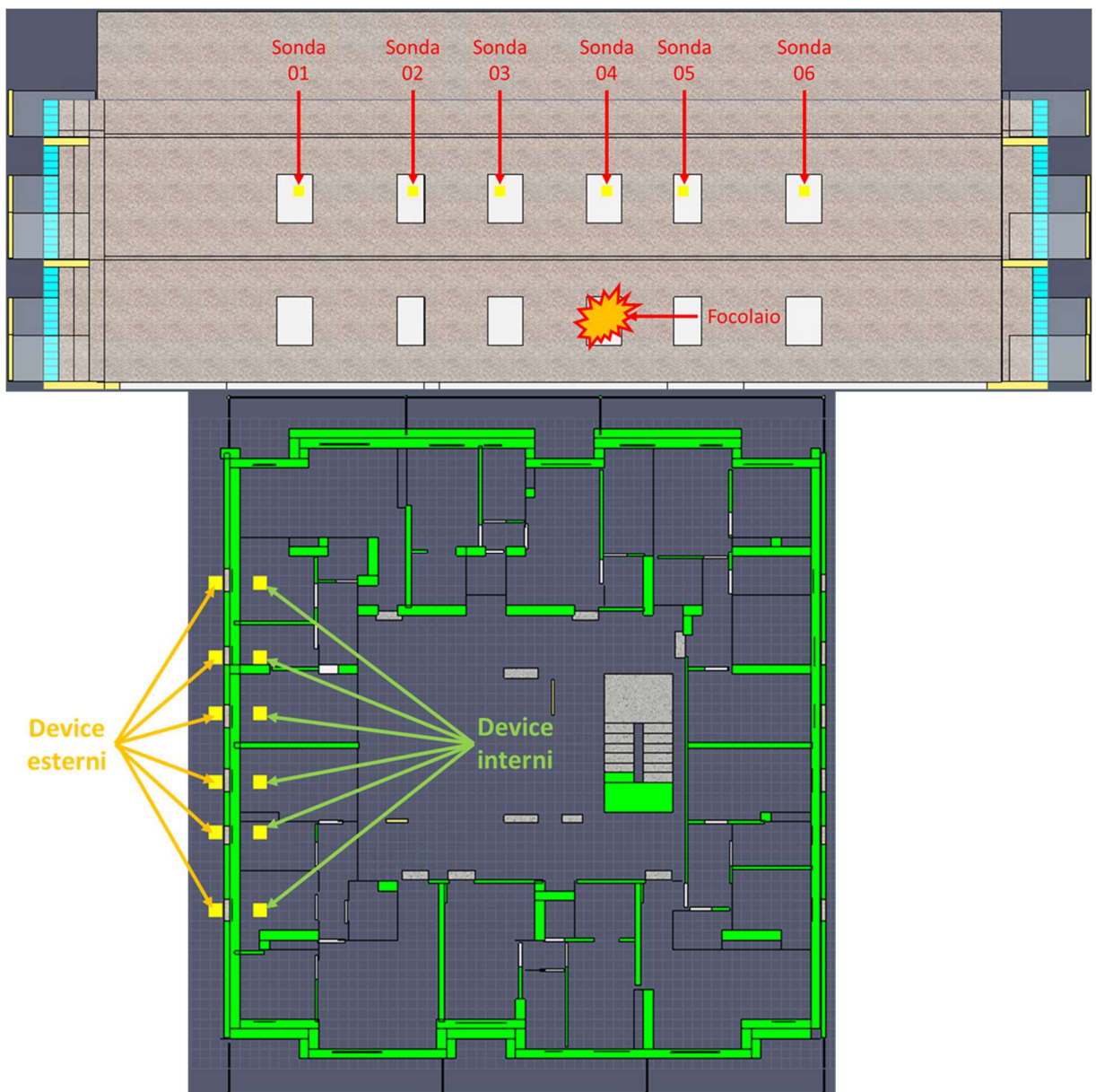


Figura 170 Posizione delle sonde di temperatura in prospettiva e in pianta

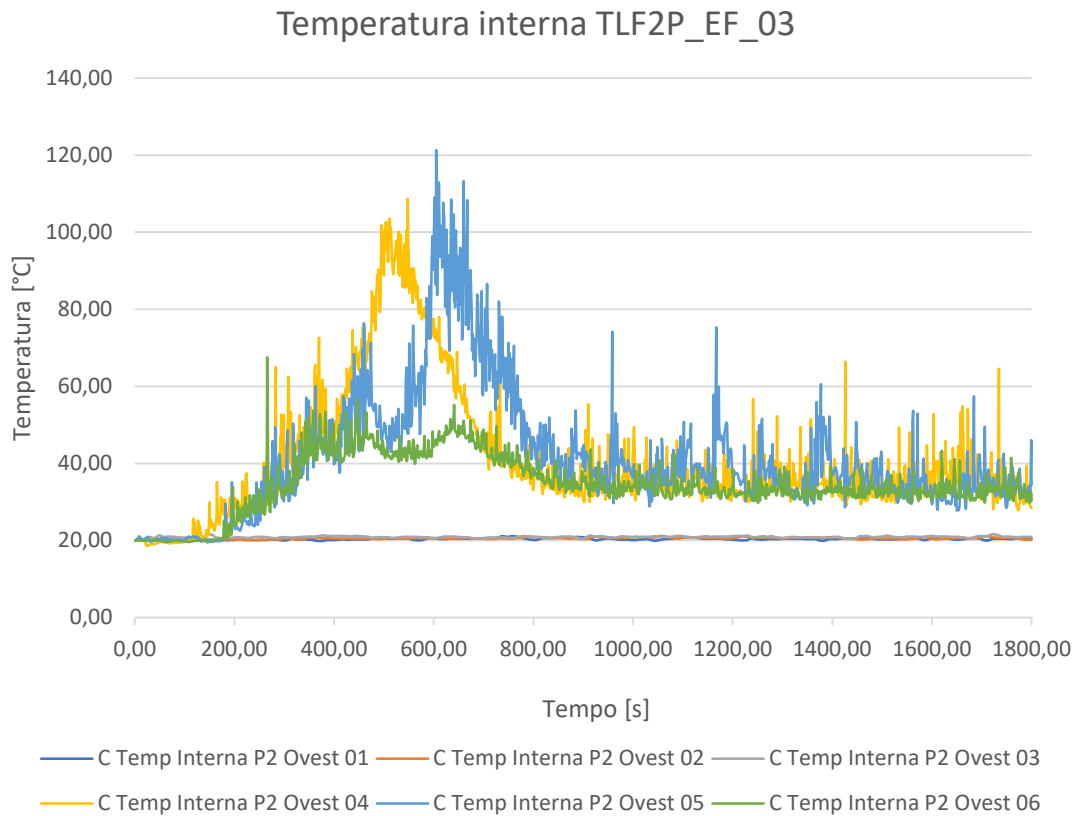


Figura 171 Temperatura device interni modello EPS con fasce di separazione

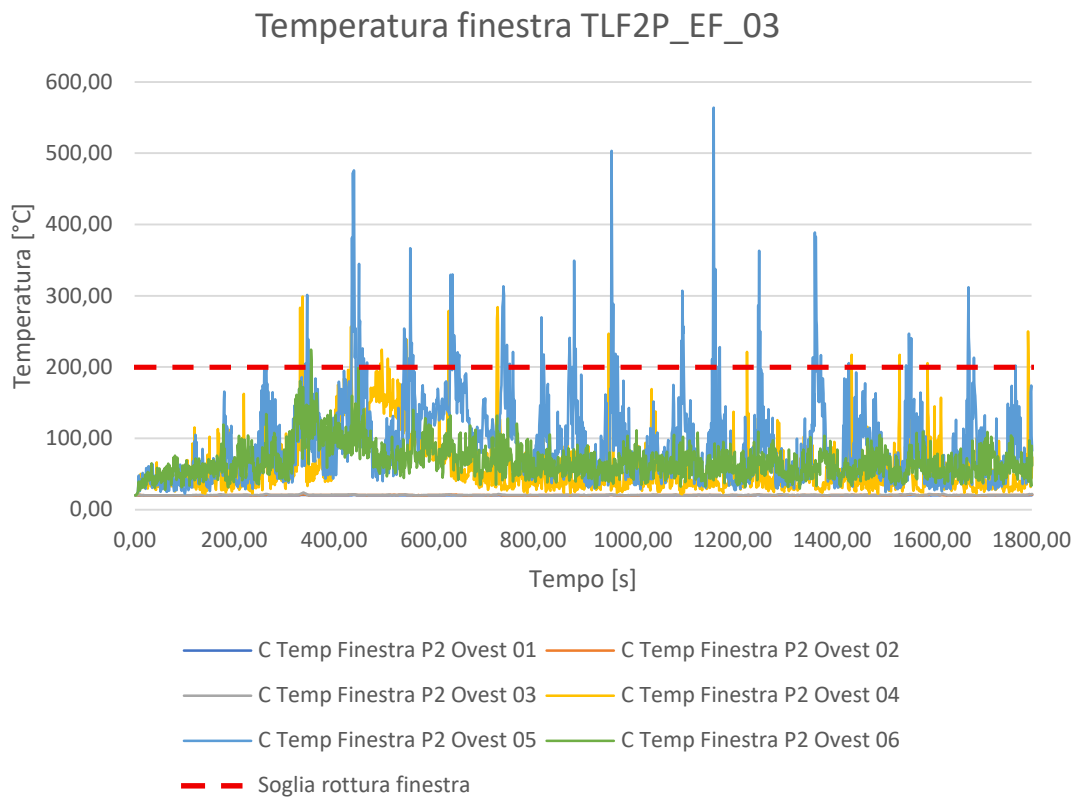


Figura 172 Temperatura device esterni modello EPS con fasce di separazione

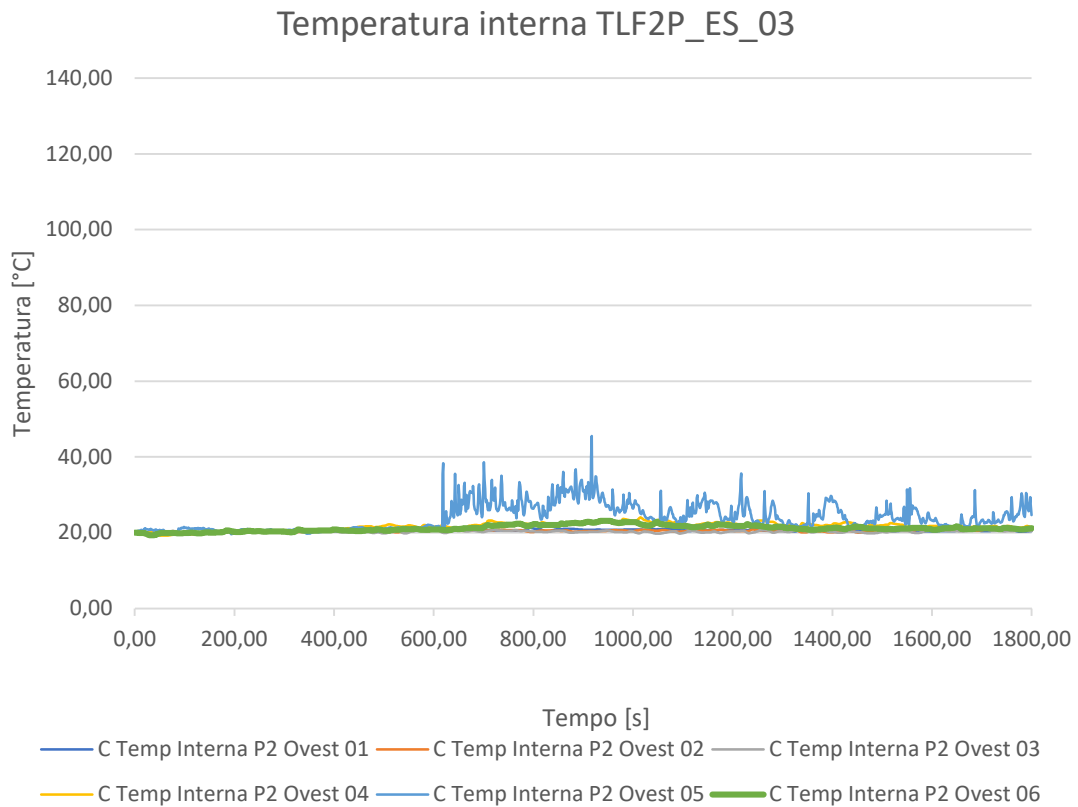


Figura 173 Temperatura device interni modello EPS con marcapiano sporgente

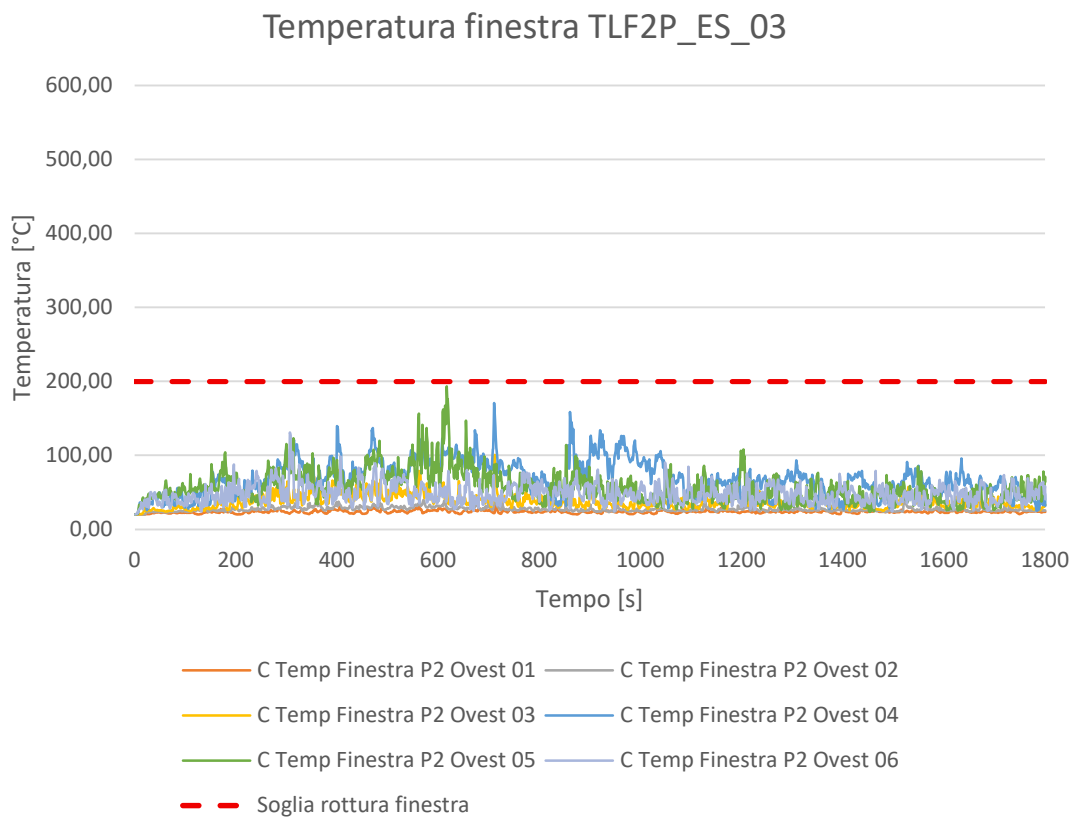


Figura 174 Temperatura device esterni modello EPS con marcapiano sporgente

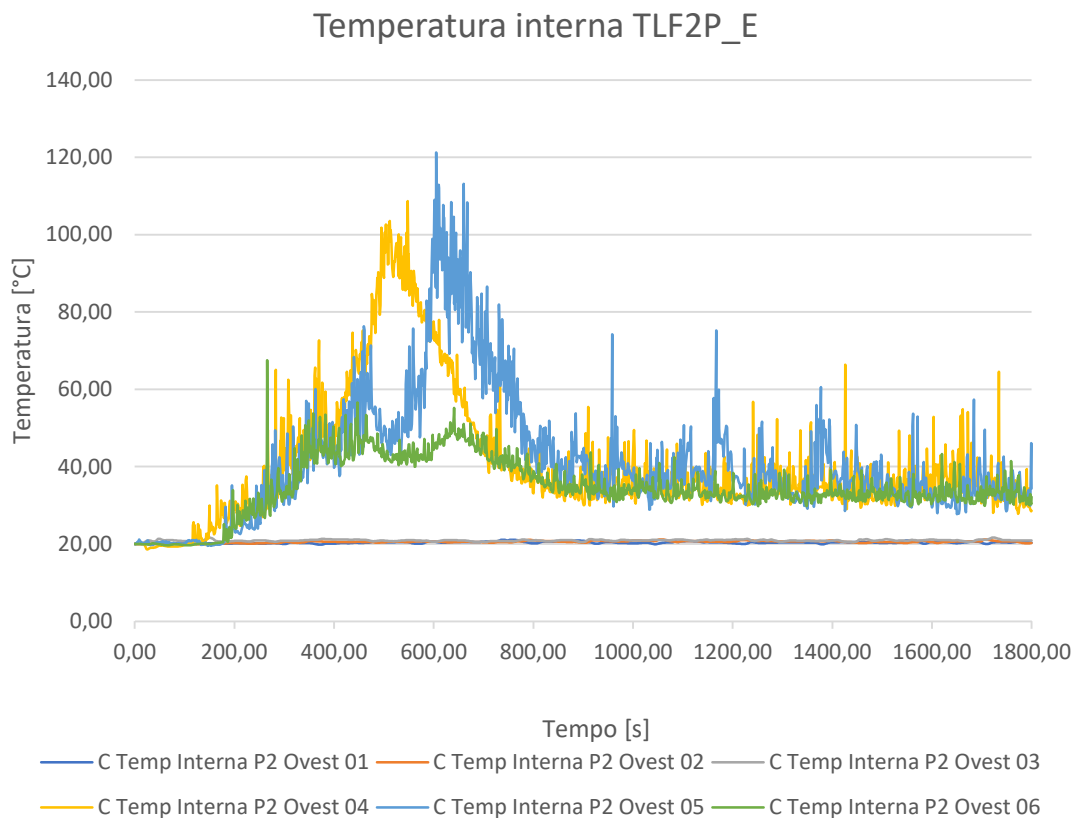


Figura 175 Temperatura device interni modello EPS senza elementi di protezione passiva

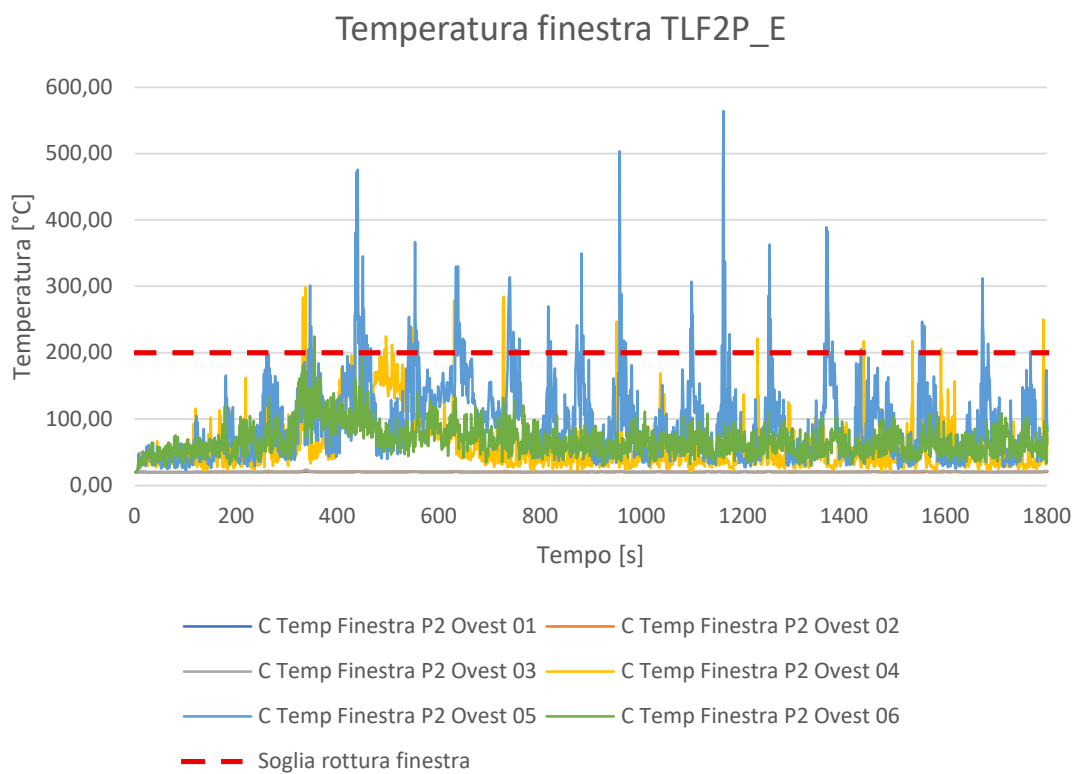


Figura 176 Temperatura device interni modello EPS senza elementi di protezione passiva

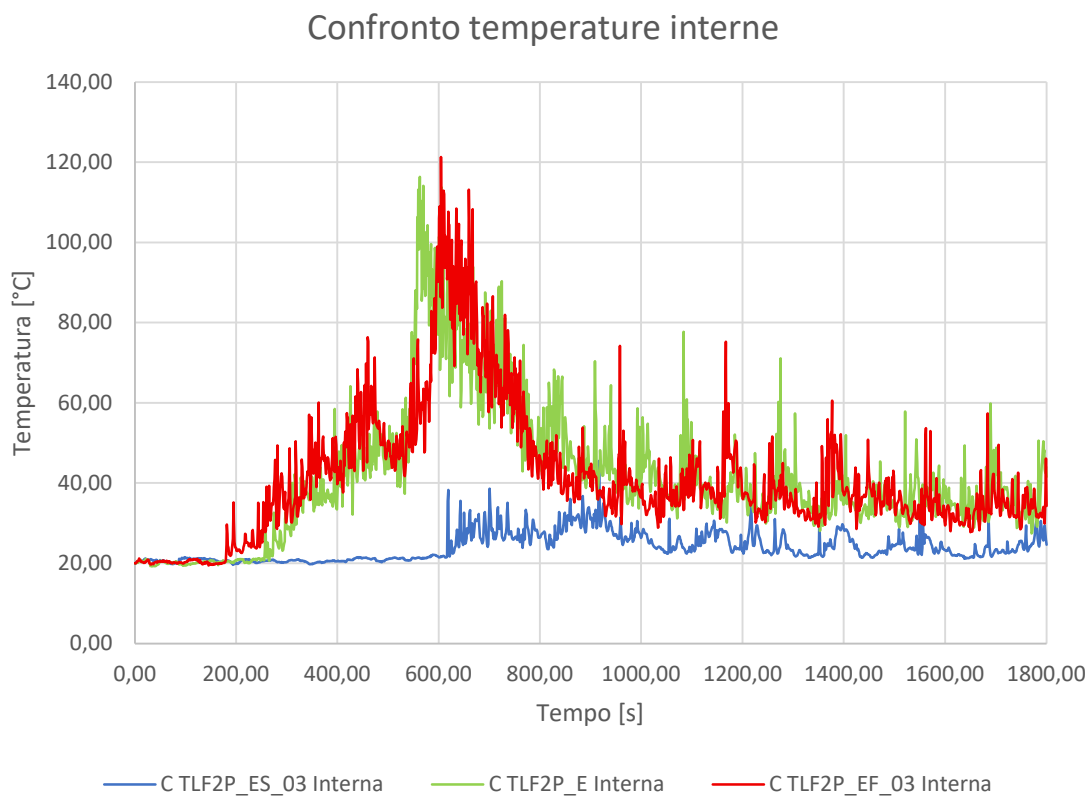


Figura 177 Confronto temperature interne dei tre modelli esaminati

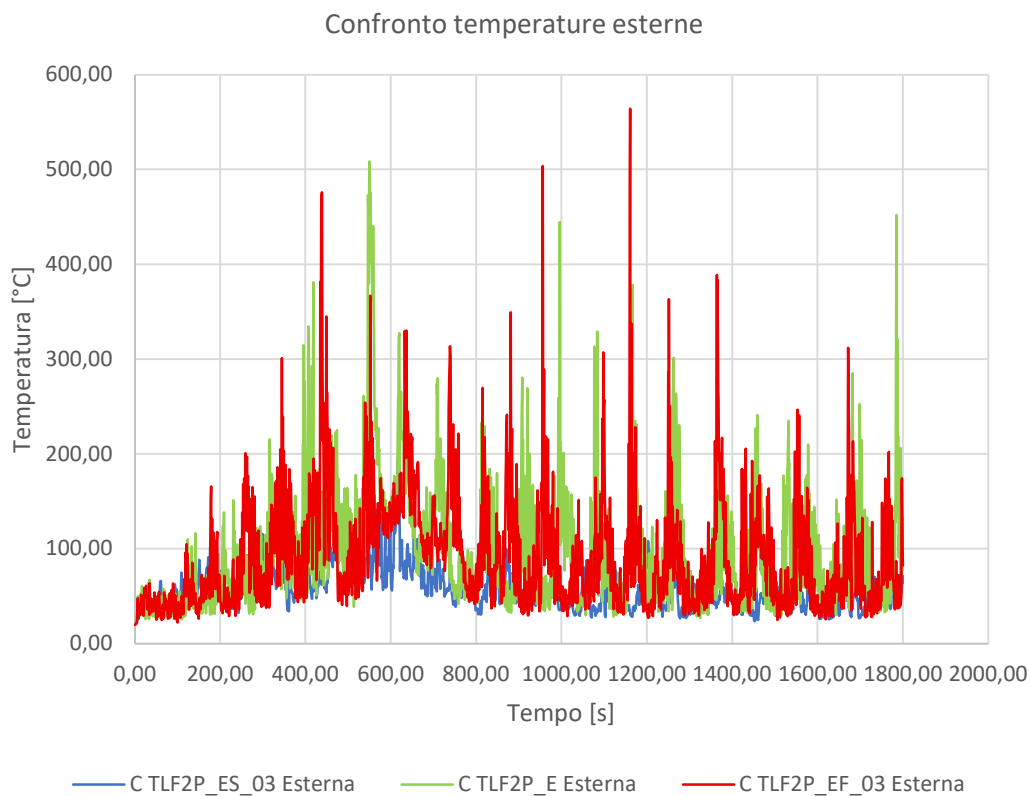


Figura 178 Confronto temperature esterne dei tre modelli esaminati

6. Conclusioni

6.1 Sintesi dei risultati ottenuti

Il presente lavoro ha affrontato, attraverso l'approccio della Fire Safety Engineering, la valutazione prestazionale di due soluzioni alternative per la limitazione della propagazione verticale dell'incendio in facciata, entrambe caratterizzate dalla presenza di isolamento in EPS (polistirene espanso sinterizzato). Le configurazioni analizzate prevedevano, rispettivamente, l'impiego di fasce di separazione verticali, geometricamente conformi ma non protette da materiali incombustibili, e l'utilizzo di marcapiani aggettanti in corrispondenza delle compartimentazioni orizzontali.

L'attività di simulazione è stata articolata su due livelli: un modello ridotto a due piani, su cui sono state condotte 10 simulazioni (incluse varianti con vento), e un modello completo dell'edificio, oggetto di ulteriori 4 simulazioni. Entrambi i modelli sono stati sviluppati con i software PyroSim e FDS, integrando dispositivi per il monitoraggio delle temperature, la rottura delle superfici vetrate e la valutazione del flusso termico incidente.

I risultati hanno mostrato che la configurazione con marcapiani sporgenti è in grado di ritardare in modo significativo la propagazione dell'incendio ai piani superiori, grazie all'interruzione dei flussi convettivi e radiativi tipici di un incendio di facciata. Sebbene in alcuni casi si sia comunque osservato l'innesco del piano superiore, tale ritardo risulta essere strategicamente rilevante: infatti, valutando i tempi medi di intervento dei Vigili del Fuoco, si può ritenere che l'incendio, pur propagandosi, rimarrebbe entro condizioni di gestione operativa, evitando uno scenario generalizzato e fuori controllo, come avverrebbe invece nella configurazione con le semplici fasce di separazione. Inoltre dai grafici di temperatura interna si può notare come, all'interno del compartimento superiore non vengono raggiunte temperature che possano innescare facilmente un secondo focolare, questo fattore riduce notevolmente la probabilità che l'incendio si alimenti ulteriormente.

Al contrario, la soluzione con fasce di separazione, pur rispettando formalmente la geometria prescritta dalla RTV 13, non ha dimostrato una prestazione equivalente in termini di sicurezza: l'incendio si è propagato rapidamente verso l'alto, coinvolgendo più livelli in tempi troppo brevi per un efficace contenimento.

In conclusione, nell'ambito di una valutazione prestazionale, si ritiene che la soluzione con marcapiani aggettanti possa essere considerata accettabile in quanto garantisce un ritardo funzionale alla gestione dell'emergenza, mentre la configurazione con sole fasce verticali in EPS, priva di protezioni, non offre livelli di sicurezza comparabili e non risulta idonea come soluzione alternativa.

6.2 Prospettive di approfondimento e ricerca futura

Il naturale incremento della potenza di calcolo che avverrà nel futuro, renderà più agevole sviluppare studi con tempi di calcolo meno proibitivi e con livelli di dettaglio più alti, potendo portare le analisi su volumi in grado di fornire dati significativi anche sullo sviluppo di un incendio anche attraverso le stratigrafie dell'involucro anche su modelli estesi e rappresentativi di situazioni reali.

In parallelo, un aumento degli studi sulla propagazione degli incendi in facciata, considerando differenti configurazioni, potrebbe portare alla creazione di un database condiviso. Ciò offrirebbe ai progettisti la possibilità di consultare soluzioni alternative, già verificate e testate, ampliando così il ventaglio di opzioni progettuali.

Questa prospettiva renderebbe più accessibile l'adozione di soluzioni difforni rispetto a quelle prescritte dal Codice di Prevenzione Incendi, mantenendo comunque elevati standard di sicurezza, in particolare per edifici che richiedono approcci progettuali non convenzionali.

Bibliografia

- [1] A. Gregory, «Independent,» 04 09 2024. [Online]. Available: <https://www.independent.co.uk/news/uk/home-news/grenfell-tower-fire-what-happened-timeline-b2606742.html>. [Consultato il giorno 13 06 2025].
- [2] «Flarescape,» 05 09 2021. [Online]. Available: <https://www.flarescape.com/blog/incendio-alla-torre-dei-moro-milano-2021>. [Consultato il giorno 13 06 2025].
- [3] C. Treccarichi, «TODAY,» 23 02 2024. [Online]. Available: <https://www.today.it/attualita/incendio-valencia-cappotto-termico-rivestimento-materiali-infiammabili.html>. [Consultato il giorno 13 06 2025].
- [4] AntiFuoco, «AntiFuoco.it,» 14 04 2023. [Online]. Available: <https://antifuoco.it/obblighi-normativi-per-la-protezione-antincendio-delle-facciate-chiusure-d-ambito/>. [Consultato il giorno 13 06 2025].
- [5] M. dell'Interno, *Testo coordinato dell'allegato I del DM 3 agosto 2015*, 3 agosto 2015.
- [6] thunderheadeng, «PyroSim User Manual,» [Online]. Available: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2024-2/user-manual/>. [Consultato il giorno 17 06 2025].
- [7] 3. H. Y. T. N. K. W. X. H. Biao Zhou¹, «Fire Performance of EPS ETICS Façade: Effect of Test Scale and Masonry Cover,» *Fire Technology*, p. 19, 2021.
- [8] M. C. I. B. P. Marija Jelčić Rukavina, «SICUREZZA ANTINCENDIO DELLE FACCIATE NEGLI EDIFICI Manuale per progettisti, architetti, ingegneri ed esperti di fuoco,» Università di Zagabria, 2017.
- [9] P. J. P. a. A. A. JOSHI, «Glass Breaking In Fires,» *FIRE SAFETY SCIENCE*.
- [10] R. A. R. J. X. W. Siaka Dembele*, «Thermal breakage of window glass in room fires conditions – Analysis of some,» *Building and Environment*, vol. Volume 54, p. August , 2012.

Ringraziamenti

Giunto alla fine di questo importante percorso, sento il bisogno profondo di esprimere la mia gratitudine a tutte le persone che, in modi diversi, mi hanno accompagnato, sostenuto e ispirato.

Il mio primo, immenso grazie va ai miei genitori. In ogni passo, in ogni dubbio, in ogni fatica, siete sempre stati lì, con uno sguardo che incoraggiava, con parole semplici ma cariche di forza, con un amore che non ha mai chiesto nulla in cambio. Senza la vostra fiducia silenziosa, la vostra dedizione quotidiana e il vostro esempio, non sarei mai arrivato fin qui. Questo traguardo è anche vostro, è il riflesso dei vostri sacrifici, della vostra pazienza e della vostra infinita generosità. Vi devo tutto, col cuore.

A Carlotta, sei stata al mio fianco in ogni istante, nei momenti di entusiasmo e in quelli di sconforto. Hai saputo ascoltare quando ne avevo bisogno, sostenere quando vacillavo, sorridere con me quando tutto sembrava finalmente andare al suo posto. Il tuo amore, la tua dolcezza e la tua presenza silenziosa ma costante sono stati il mio rifugio più sicuro. In questo percorso difficile e bellissimo, non avrei potuto desiderare una compagna migliore. Grazie per esserci sempre stata, davvero.

Un grazie speciale va ai miei nonni, che sono e saranno sempre le mie radici. Con il vostro amore silenzioso, ma costante, mi avete sostenuto nei momenti più difficili, mi avete ascoltato senza mai giudicare. Non avete mai smesso di guardarmi con occhi pieni di fiducia e affetto. Siete stati le mie guide, i miei punti fermi, la voce calma nei giorni agitati. Porterò per sempre con me ciò che mi avete insegnato, con gratitudine e infinito amore.

Un ringraziamento dal profondo del cuore va a tutti i miei amici e familiari che mi sono stati accanto lungo questo cammino. A chi c'è sempre stato e a chi ho incontrato lungo la strada, ognuno di voi ha reso il viaggio più leggero, più ricco, più autentico. Grazie per le risate, le parole, i gesti, per avermi voluto bene e avermi fatto sentire parte di qualcosa di speciale.

Un ringraziamento sentito a Filippo Così, Emiliano Cereda e Roberto Vancetti, per avermi seguito con competenza e disponibilità in questa fase cruciale del mio percorso. Il vostro aiuto, i vostri consigli e la vostra presenza hanno fatto la differenza, più di quanto possiate immaginare.

Infine, ai colleghi di AI Group, un grazie sentito per avermi accolto in questo nuovo mondo con generosità e disponibilità. Il vostro supporto mi ha permesso di crescere, imparare e sentirmi parte di qualcosa di stimolante e autentico.

A tutti voi, il mio più sincero grazie: senza di voi, questo traguardo non avrebbe avuto lo stesso significato.