

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA BASILICATA

SCUOLA DI INGEGNERIA



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
COSTRUZIONI IN ACCIAIO E LEGNO

**ANALISI NUMERICA DEGLI EFFETTI TERMICI
DELL'IRRAGGIAMENTO SOLARE SUGLI EDIFICI ALTI CON
STRUTTURA DIAGRID**

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE THERMAL EFFECTS OF SOLAR
RADIATION ON TALL BUILDINGS WITH DIAGRID STRUCTURE**

RELATORE:

PROF. FELICE CARLO PONZO

PROF. ELENA MELE

ING. ROCCO DITOMMASO

CORRELATORE:

ING. GIANLUCA AULETTA

LAUREANDO:

ALESSANDRO GIORGIO ARCASENSA

MATR. 61323

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

Indice

Introduzione	20
Abstract	21
1 Gli Edifici Altì	22
1.1 Panoramica storica	22
1.2 Elementi chiave della progettazione	27
1.2.1 Proprietà del sito	27
1.2.2 Caratteristiche dei materiali	30
1.2.3 Sistemi strutturali	30
1.2.4 Caratteristiche del sistema strutturale e gli effetti delle azioni	35
2 I sistemi diagrid	37
2.1 Stato dell'arte	37
2.2 Le proprietà strutturali	38
2.3 Il comportamento strutturale	40
2.4 Le problematiche progettuali	41
2.5 Le imperfezioni dell'acciaio da carpenteria metallica	42
2.6 Evoluzioni e altre applicazioni	47
3 La variazione di temperatura	50
3.1 Classificazione delle variazioni di temperatura	50
3.2 Cause ed effetti	50
3.3 L'irraggiamento solare	52
3.4 Le dilatazioni termiche	54
4 Caso di studio	56
4.1 Descrizione del <i>software</i> RFEM6	56
4.2 Descrizione del modello di calcolo	56
4.3 Analisi modale	58
4.4 Analisi del vento	61
4.5 Valutazione dell'irraggiamento solare	63
4.6 Esiti dell'analisi numerica	65
5 Conclusioni	81
Riferimenti bibliografici	82
Allegato A	83

Elenco delle figure

1	Grande incendio di Chicago - 1871	24
2	Home Insurance Building - Chicago	25
3	William Le Baron Jenney	25
4	Flatiron Building - New York	25
5	Woolworth Building - New York	25
6	Burj Khalifa - Dubai	26
7	Shanghai Tower - Shanghai	26
8	Tipologie di fondazioni	29
9	Sistema strutturale a telaio	31
10	Sistema strutturale a telaio controventato	32
11	World Trade Center - New York (Sistema strutturale a tubo esterno)	33
12	John Hancock Center - Chicago (Sistema strutturale a tubo controventato)	33
13	IBM Buildign - Pittsburgh (Sistema strutturale diagrid)	35
14	Torre Eiffel	37
15	The Gherkin - Londra	38
16	Hearst Tower - New York	38
17	Sforzi dovuti ai carichi verticali nella maglia triangolare	40
18	Momento flettente e taglio derivanti dalle azioni orizzontali	40
19	Sforzi dovuti al momento flettente nella maglia triangolare	41
20	Sforzi dovuti al taglio nella maglia triangolare	41
21	Andamento delle tensioni residue in un profilo laminato a caldo	43
22	Difetti di verticalità	44
23	Difetti di curvatura	44
24	Corrosione su acciaio da carpenteria	45
25	Rottura per fatica dell'acciaio	46
26	Fattori di riduzione del modulo elastico e della tensione di snervamento al variare della temperatura	47
27	Andamento curva sforzo-deformazione al variare della temperatura	47
28	Bird's Nest, Pechino	48
29	Water Cube, Pechino	49
30	Progetti di strutture con maglia con pattern Voronoi	49
31	Formule della temperatura dell'aria esterna	53
32	Pianta tipo dell'impalcato	57
33	Dimensioni maglia diagrid	58
34	Modello in vista 3D	58
35	Primo modo di vibrare	60

36	Secondo modo di vibrare	60
37	Terzo modo di vibrare	61
38	Spostamento max lungo x	63
39	Spostamento max lungo y	63
40	Spostamento max vettoriale	63
41	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO2	65
42	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 1	66
43	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 1	66
44	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 1	67
45	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 1	67
46	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 1	68
47	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 1	68
48	Variazione % trazione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 1	69
49	Variazione % compressione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 1	70
50	Variazione % trazione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, 2.269 kN; Zona 1	70
51	Variazione % compressione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, -119.021 kN; Zona 1	71
52	Variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 1	72
53	Variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 1	72
54	Variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 1	72
55	Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 1	73
56	Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 1	73
57	Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 1	73
58	Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 1	74
59	Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 1	74
60	Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 1	74
61	Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 1	75
62	Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 1	75
63	Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 1	75
64	Andamento della trazione nella combinazione di carico con carichi statici CO2	76
65	Andamento della compressione nella combinazione di carico con carichi statici CO2	77
66	Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 1	77
67	Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 1	77

68	Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 1	77
69	Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 1	78
70	Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 1	78
71	Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 1	78
72	Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 1	78
73	Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 1	79
74	Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 1	79
75	Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 1	79
76	Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 1	79
77	Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 1	80
78	Aste con verifica di resistenza non soddisfatta	80
79	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 1 Grandi Spostamenti	83
80	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 1 Grandi Spostamenti	83
81	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 1 Grandi Spostamenti	84
82	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 1 Grandi Spostamenti	84
83	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 1 Grandi Spostamenti	85
84	Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 1 Grandi Spostamenti	85
85	Variazione % trazione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 1	86
86	Variazione % compressione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 1	86
87	Variazione % trazione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, 16.389 kN; Zona 1	87
88	Variazione % compressione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, -6070.442 kN; Zona 1	87
89	Variazione % trazione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, 14.449 kN; Zona 1	88
90	Variazione % compressione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, -5386.302 kN; Zona 1	88
91	Variazione % trazione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, 12.564 kN; Zona 1	89

92	Variazione % compressione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, -4774.796 kN; Zona 1	89
93	Variazione % trazione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, 10.868 kN; Zona 1	90
94	Variazione % compressione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, -4179.814 kN; Zona 1	90
95	Variazione % trazione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, 9.395 kN; Zona 1	91
96	Variazione % compressione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, -3531.725 kN; Zona 1	91
97	Variazione % trazione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, 8.936 kN; Zona 1	92
98	Variazione % compressione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, -2528.914 kN; Zona 1	92
99	Variazione % trazione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, 7.299 kN; Zona 1	93
100	Variazione % compressione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, -2217.615 kN; Zona 1	93
101	Variazione % trazione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, 6.737 kN; Zona 1	94
102	Variazione % compressione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, -1616.439 kN; Zona 1	94
103	Variazione % trazione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, 5.542 kN; Zona 1	95
104	Variazione % compressione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, -1293.297 kN; Zona 1	95
105	Variazione % trazione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, 4.245 kN; Zona 1	96
106	Variazione % compressione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, -983.055 kN; Zona 1	96
107	Variazione % trazione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, 3.401 kN; Zona 1	97
108	Variazione % compressione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, -684.734 kN; Zona 1	97
109	Variazione % trazione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, 2.271 kN; Zona 1	98

110 Variazione % compressione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, -401.080 kN; Zona 1	98
111 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 1 grandi spostamenti	99
112 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 1 grandi spostamenti	99
113 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 1 grandi spostamenti	99
114 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 1 grandi spostamenti	100
115 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 1 grandi spostamenti	100
116 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 1 grandi spostamenti	100
117 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 1 grandi spostamenti	101
118 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 1 grandi spostamenti	101
119 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 1 grandi spostamenti	101
120 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 1 grandi spostamenti	102
121 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 1 grandi spostamenti	102
122 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 1 grandi spostamenti	102
123 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 1 grandi spostamenti	103
124 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 1 grandi spostamenti	103
125 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 1 grandi spostamenti	103
126 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 1 grandi spostamenti	104
127 Andamento della trazione nella combinazione di carico C05, Zona 1 grandi spo- stamenti	104

128 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 1 grandi spostamenti	104
129 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 1 grandi spostamenti	105
130 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 1 grandi spostamenti	105
131 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 1 grandi spostamenti	105
132 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 1 grandi spostamenti	106
133 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 1 grandi spostamenti	106
134 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 1 grandi spostamenti	106
135 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 2	107
136 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 2	107
137 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 2	108
138 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 2	108
139 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 2	109
140 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 2	109
141 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti	110
142 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti	110
143 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti	111
144 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 2 grandi spostamenti	111
145 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 2 grandi spostamenti	112
146 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 2 grandi spostamenti	112
147 Variazione % trazione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 2	113
148 Variazione % compressione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 2	113

149	Variazione % trazione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 2	114
150	Variazione % compressione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 2	114
151	Variazione % trazione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, 16.389 kN; Zona 2	115
152	Variazione % compressione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, -6070.442 kN; Zona 2	115
153	Variazione % trazione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, 14.449 kN; Zona 2	116
154	Variazione % compressione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, -5386.302 kN; Zona 2	116
155	Variazione % trazione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, 12.564 kN; Zona 2	117
156	Variazione % compressione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, -4774.796 kN; Zona 2	117
157	Variazione % trazione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, 10.868 kN; Zona 2	118
158	Variazione % compressione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, -4179.814 kN; Zona 2	118
159	Variazione % trazione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, 9.395 kN; Zona 2	119
160	Variazione % compressione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, -3531.725 kN; Zona 2	119
161	Variazione % trazione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, 8.396 kN; Zona 2	120
162	Variazione % compressione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, -2528.914 kN; Zona 2	120
163	Variazione % trazione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, 7.299 kN; Zona 2	121
164	Variazione % compressione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, -2217.615 kN; Zona 2	121
165	Variazione % trazione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, 6.737 kN; Zona 2	122
166	Variazione % compressione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, -1616.439 kN; Zona 2	122

167 Variazione % trazione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, 5.542 kN; Zona 2	123
168 Variazione % compressione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, -1293.297 kN; Zona 2	123
169 Variazione % trazione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, 4.245 kN; Zona 2	124
170 Variazione % compressione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, -983.055 kN; Zona 2	124
171 Variazione % trazione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, 3.401 kN; Zona 2	125
172 Variazione % compressione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, -684.734 kN; Zona 2	125
173 Variazione % trazione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, 2.271 kN; Zona 2	126
174 Variazione % compressione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, -401.080 kN; Zona 2	126
175 Variazione % trazione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, 2.269 kN; Zona 2	127
176 Variazione % compressione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, -119.021 kN; Zona 2	127
177 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 2	128
178 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 2	128
179 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 2	128
180 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 2	129
181 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 2	129
182 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 2	129
183 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 2	130
184 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 2	130
185 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 2	130
186 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 2	131
187 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 2	131
188 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 2	131
189 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti	132
190 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti	132

191 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti	132
192 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti	133
193 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti	133
194 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti	133
195 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 2 grandi spostamenti	134
196 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 2 grandi spostamenti	134
197 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 2 grandi spostamenti	134
198 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 2 grandi spostamenti	135
199 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 2 grandi spostamenti	135
200 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 2 grandi spostamenti	135
201 Andamento della trazione nella combinazione di carico COCO3, Zona 2	136
202 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 2	136
203 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 2	136
204 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 2	136
205 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 2	137
206 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 2	137
207 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 2	137
208 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 2	137
209 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 2	138
210 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 2	138
211 Andamento della trazione combinazione di carico CO8, Zona 2	138
212 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 2	138
213 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti	139
214 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti	139

215 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti	139
216 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti	140
217 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti	140
218 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti	140
219 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 2 grandi spostamenti	141
220 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 2 grandi spostamenti	141
221 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 2 grandi spostamenti	141
222 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 2 grandi spostamenti	142
223 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 2 grandi spostamenti	142
224 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 2 grandi spostamenti	142
225 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 3	143
226 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 3	143
227 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 3	144
228 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 3	144
229 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 3	145
230 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 3	145
231 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 3 grandi spostamenti	146
232 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti	146
233 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti	147
234 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 3 grandi spostamenti	147
235 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti	148

236 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti	148
237 Variazione % trazione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 3	149
238 Variazione % compressione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 3	149
239 Variazione % trazione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 3	150
240 Variazione % compressione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 3	150
241 Variazione % trazione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, 16.389 kN; Zona 3	151
242 Variazione % compressione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, -6070.442 kN; Zona 3	151
243 Variazione % trazione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, 14.449 kN; Zona 3	152
244 Variazione % compressione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, -5386.302 kN; Zona 3	152
245 Variazione % trazione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, 12.564 kN; Zona 3	153
246 Variazione % compressione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, -4774.796 kN; Zona 3	153
247 Variazione % trazione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, 10.868 kN; Zona 3	154
248 Variazione % compressione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, -4179.814 kN; Zona 3	154
249 Variazione % trazione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, 9.395 kN; Zona 3	155
250 Variazione % compressione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, -3531.725 kN; Zona 3	155
251 Variazione % trazione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, 8.396 kN; Zona 3	156
252 Variazione % compressione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, -2528.914 kN; Zona 3	156
253 Variazione % trazione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, 7.299 kN; Zona 3	157

254 Variazione % compressione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, -2217.615 kN; Zona 3	157
255 Variazione % trazione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, 6.737 kN; Zona 3	158
256 Variazione % compressione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, -1616.439 kN; Zona 3	158
257 Variazione % trazione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, 5.542 kN; Zona 3	159
258 Variazione % compressione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, -1293.297 kN; Zona 3	159
259 Variazione % trazione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, 4.245 kN; Zona 3	160
260 Variazione % compressione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, -983.055 kN; Zona 3	160
261 Variazione % trazione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, 3.401 kN; Zona 3	161
262 Variazione % compressione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, -684.734 kN; Zona 3	161
263 Variazione % trazione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, 2.271 kN; Zona 3	162
264 Variazione % compressione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, -401.080 kN; Zona 3	162
265 Variazione % trazione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, 2.269 kN; Zona 3	163
266 Variazione % compressione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, -119.021 kN; Zona 3	163
267 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 3 . . .	164
268 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 3 . . .	164
269 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 3 . . .	164
270 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 3 . . .	165
271 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 3 . . .	165
272 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 3 . . .	165
273 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 3 . . .	166
274 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 3 . . .	166
275 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 3 . . .	166
276 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 3 . . .	167
277 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 3 . . .	167

278 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 3	167
279 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 3 grandi spostamenti	168
280 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 3 grandi spostamenti	168
281 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti	168
282 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti	169
283 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti	169
284 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti	169
285 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 3 grandi spostamenti	170
286 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 3 grandi spostamenti	170
287 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti	170
288 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti	171
289 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti	171
290 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti	171
291 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 3	172
292 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 3	172
293 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 3	172
294 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 3	173
295 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 3	173
296 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 3	173
297 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 3	174
298 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 3	174
299 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 3	174
300 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 3	175
301 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 3	175
302 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 3	175

303 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 3 grandi spostamenti	176
304 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 3 grandi spostamenti	176
305 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti	176
306 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti	177
307 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti	177
308 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti	177
309 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 3 grandi spostamenti	178
310 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 3 grandi spostamenti	178
311 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti	178
312 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti	179
313 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti	179
314 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti	179
315 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 4	180
316 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 4	180
317 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 4	181
318 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 4	181
319 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 4	182
320 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 4	182
321 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti	183
322 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti	183
323 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti	184

324 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti	184
325 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti	185
326 Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti	185
327 Variazione % trazione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 4	186
328 Variazione % compressione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 4	186
329 Variazione % trazione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 4	187
330 Variazione % compressione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 4	187
331 Variazione % trazione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, 16.389 kN; Zona 4	188
332 Variazione % compressione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, -6070.442 kN; Zona 4	188
333 Variazione % trazione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, 14.449 kN; Zona 4	189
334 Variazione % compressione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, -5386.302 kN; Zona 4	189
335 Variazione % trazione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, 12.564 kN; Zona 4	190
336 Variazione % compressione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, -4774.796 kN; Zona 4	190
337 Variazione % trazione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, 10.868 kN; Zona 4	191
338 Variazione % compressione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, -4179.814 kN; Zona 4	191
339 Variazione % trazione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, 9.395 kN; Zona 4	192
340 Variazione % compressione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, -3531.725 kN; Zona 4	192
341 Variazione % trazione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, 8.396 kN; Zona 4	193

342 Variazione % compressione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, -2528.914 kN; Zona 4	193
343 Variazione % trazione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, 7.299 kN; Zona 4	194
344 Variazione % compressione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, -2217.615 kN; Zona 4	194
345 Variazione % trazione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, 6.737 kN; Zona 4	195
346 Variazione % compressione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, -1616.439 kN; Zona 4	195
347 Variazione % trazione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, 5.542 kN; Zona 4	196
348 Variazione % compressione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, -1293.297 kN; Zona 4	196
349 Variazione % trazione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, 4.245 kN; Zona 4	197
350 Variazione % compressione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, -983.055 kN; Zona 4	197
351 Variazione % trazione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, 3.401 kN; Zona 4	198
352 Variazione % compressione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, -684.734 kN; Zona 4	198
353 Variazione % trazione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, 2.271 kN; Zona 4	199
354 Variazione % compressione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, -401.080 kN; Zona 4	199
355 Variazione % trazione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, 2.269 kN; Zona 4	200
356 Variazione % compressione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, -119.021 kN; Zona 4	200
357 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 4 . . .	201
358 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 4	201
359 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 4 . . .	201
360 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 4	202
361 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 4 . . .	202
362 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 4	202
363 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 4 . . .	203

364 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 4	203
365 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 4	203
366 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 4	204
367 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 4	204
368 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 4	204
369 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti	205
370 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti	205
371 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti	205
372 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti	206
373 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti	206
374 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti	206
375 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti	207
376 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti	207
377 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti	207
378 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti	208
379 Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti	208
380 Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti	208
381 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 4	209
382 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 4	209
383 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 4	209
384 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 4	210
385 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 4	210
386 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 4	210
387 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 4	211
388 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 4	211

389 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 4	211
390 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 4	212
391 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 4	212
392 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 4	212
393 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti	213
394 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti	213
395 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti	213
396 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti	214
397 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti	214
398 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti	214
399 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti	215
400 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti	215
401 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti	215
402 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti	216
403 Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti	216
404 Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti	216

Introduzione

Il presente lavoro di tesi si propone di valutare gli effetti dell'irraggiamento solare su una struttura alta realizzata in acciaio, analizzando come l'esposizione ai raggi solari influenzino le caratteristiche strutturali dell'edificio. L'oggetto della tesi è un grattacielo moderno con sistema strutturale diagrid, con design e materiali rappresentativi delle tecniche di costruzioni in acciaio contemporanee.

Questa ricerca si propone di approfondire la conoscenza delle interazioni tra l'involucro edilizio e l'ambiente circostante, con particolare attenzione all'influenza della variazione di radiazione solare sull'acciaio strutturale. Attraverso un'analisi approfondita, si mira a sviluppare modelli predittivi per valutare l'impatto delle sollecitazioni termiche, in termini di incremento dello stato tensionale negli elementi strutturali, utili per proporre soluzioni progettuali ottimizzate.

Per effettuare quest'analisi è stato utilizzato il software di modellazione e calcolo strutturale RFEM6, che ha permesso l'applicazione del carico termico alle facciate del grattacielo direttamente esposte alla luce solare, consentendo, così, di valutare gli effetti che queste provocavano sui singoli elementi e di conseguenza sull'intera struttura.

L'elaborato si articola in diverse parti: i) uno stato dell'arte sulle strutture alte; ii) un focus su quali siano le problematiche attuali riguardanti questa tipologia di edificio; iii) una presentazione, modellazione e analisi di un caso studio; iv) ed in ultimo i risultati delle simulazioni con relativa discussione.

Le simulazioni condotte hanno evidenziato come i carichi termici indotti dall'irraggiamento solare siano in grado di produrre un impatto sulla struttura paragonabile a quello dei carichi statici o dinamici tradizionali, e che, pertanto, è fondamentale considerarli nella fase progettuale.

Abstract

The aim of this thesis is to evaluate the effects of solar radiation on a tall steel structure by analysing how exposure to the sun's rays affects the building's structural characteristics. The subject of the thesis is a modern high-rise with a diagrid structural system, with design and materials representative of contemporary steel construction techniques.

This research aims to deepen the knowledge of the interactions between the building envelope and the surrounding environment, with a focus on the influence of solar radiation variation on structural steel. Through an in-depth analysis, the aim is to develop predictive models to assess the impact of thermal stress, in terms of increasing the tensional state in structural elements, useful for proposing optimised design solutions.

To carry out this analysis, the structural modelling and calculation software RFEM6 was used, which allowed the application of the thermal load to the façades of the high-rise building directly exposed to sunlight, thus enabling the evaluation of the effects these caused on the individual elements and consequently on the entire structure.

The paper is divided into several parts: i) a state of the art on tall structures; ii) a focus on what are the current issues concerning this type of building; iii) a presentation, modelling and analysis of a case study; iv) and finally the results of the simulations with discussion.

The simulations conducted have shown that the thermal loads induced by solar radiation are capable of producing an impact on the structure comparable to that of traditional static or dynamic loads, and that it is therefore essential to consider them in the design phase.

1 Gli Edifici Altì

1.1 Panoramica storica

Gli edifici alti, comunemente noti come grattacieli, sono caratterizzati da una struttura che si sviluppa verticalmente rispetto i comuni edifici che compongono l'area urbana delle città; spesso vengono definiti come tali se superano i 100 metri d'altezza, anche se non ne esiste una definizione universalmente condivisa. Al giorno d'oggi esistono molti grattacieli, dislocati in diverse parti del mondo, che superano diverse centinaia di metri d'altezza. Questa tipologia di costruzioni richiede solitamente tecnologie molto avanzate e materiali specializzati, in quanto, a causa della loro significativa altezza, sono necessarie strutture complesse e sofisticate in grado di sostenere il loro peso, assicurare stabilità e resistere alle forze dovute ad azioni naturali, quali vento e sisma. I grattacieli possono ospitare una grande varietà di funzioni all'interno delle città, come uffici, residenze, hotel, centri commerciali; infatti molti grattacieli combinano tutte queste funzioni attraverso una suddivisione dei piani. Sono realizzati principalmente in acciaio, calcestruzzo armato oppure una combinazione dei due, attraverso i quali è possibile realizzare gli elementi strutturali necessari adatti a questa tipologia di edifici, quali travi e pilastri per sistemi a telaio, controventi o anche nuclei centrali. Con lo sviluppo sempre maggiore della sostenibilità, diversi nuovi grattacieli vengono progettati con caratteristiche eco-friendly, quali il riciclo dell'acqua piovana, sistemi di illuminazione a risparmio energetico e che sfruttano l'irraggiamento solare, pareti verdi che permettono di ridurre il consumo energetico e l'impatto ambientale che queste grandi strutture avrebbero all'interno del tessuto urbano. I grattacieli che vediamo ai giorni nostri hanno avuto origine nel XIX secolo, negli USA; tuttavia l'idea degli edifici alti esiste da molto tempo, basti pensare ad delle strutture realizzate nei primi anni dello sviluppo della civiltà umana e che si possono definire come precorritrici dei grattacieli moderni, quali le piramidi egizie, le ziggurat mesopotamiche e le torri babilonesi, caratterizzate da altezze notevoli rispetto gli altri edifici e che erano simboli di potere e grandezza da parte delle persone che ne ordinavano la costruzione. Durante il periodo del Rinascimento e del Barocco in Europa sono stati costruiti diversi edifici alti, come ad esempio le torri in Italia, ma nulla che possa essere paragonato ai grattacieli in termini di altezza e struttura. Inoltre, negli ultimi secoli abbiamo assistito anche ad una crescita esponenziale della popolazione mondiale: analizzando le previsioni demografiche, si prevede infatti che, nel prossimo futuro, questa raggiungerà i 9 miliardi. Ne consegue l'insostenibilità dell'attuale modello di sviluppo urbanistico, basato sull'illusoria premessa della disponibilità infinita delle risorse, quali suolo, acqua ed energia, destinate invece ad un progressivo esaurimento, data la quantità limitata delle risorse citate. Vi è altresì un ulteriore aspetto da considerare: attualmente gli edifici e i trasporti contribuiscono ai 2/3 delle emissioni di anidride carbonica e sono ritenuti dai più come le principali cause dei cambiamenti climatici, a causa del posizionamento degli edifici e di come ci muoviamo tra di

loro; pertanto il futuro del nostro pianeta dipende anche dalla capacità di costruire città non solo piacevoli e vivibili, ma soprattutto ben pensate e organizzate dal punto di vista urbanistico e della sostenibilità. Una delle chiavi per raggiungere questo obiettivo è rappresentata proprio da una già citata invenzione americana del XIX secolo, ovvero i grattacieli (in inglese, skyscrapers), costruiti in cemento armato prima, in acciaio e vetro poi, che hanno portato ad una grande rivoluzione nel campo dell'architettura. Le condizioni per la loro realizzazione furono dovute ad una concomitanza di eventi e di straordinari progressi tecnologici:

1. L'evoluzione dell'industria portò ad avere disponibilità di elementi strutturali in acciaio, prodotti in serie e a basso costo che consentirono la progettazione e la costruzione di strutture molto più alte e snelle di quelle tradizionali in muratura portante;
2. Lo sviluppo del sistema costruttivo a telaio, modulare e ripetibile ad ogni piano;
3. La realizzazione di aperture più ampie con il conseguente miglioramento delle condizioni di illuminazione e comfort;
4. La maggiore disponibilità di dispositivi di collegamento e elementi strutturali, grazie alla rivoluzione industriale, quali bulloni e rivetti, in precedenza realizzati solo artigianalmente;
5. La diffusione dell'energia elettrica e l'invenzione dell'ascensore, brevettato nel 1853 da Elisha Graves Otis, rese poi l'utilizzo dei piani più alti molto più semplice, trasformandoli in quelli di maggior valore, data la più elevata luminosità e la distanza dai rumori della strada.

Con le rivoluzioni che si sono sviluppate nell'ambito ingegneristico-architettonico, nel XIX secolo si arrivò a importanti innovazioni strutturali, quali l'utilizzo dell'acciaio e del cemento armato, materiali tali da consentire la costruzione di edifici sempre più alti e stabili. La prima applicazione delle nuove tecnologie per la costruzione degli edifici alti è avvenuta a Chicago a seguito dell'incendio che distrusse la città nel 1871. Questo evento ha rappresentato una grande opportunità per ripensare il progetto e la costruzione del tessuto urbanistico e per approfondire la comprensione del comportamento delle potenzialità dei nuovi sistemi strutturali, consentendo così di superare i limiti dei materiali comunemente utilizzati e di sviluppare e concepire nuovi sistemi di trasporto verticali per muovere le persone all'interno degli edifici alti.



Figura 1: Grande incendio di Chicago - 1871

Poiché Chicago, uno dei principali nodi commerciali tra Est e Ovest, attraversava una fase di crescita economica, era necessario ricostruire rapidamente degli edifici che consentissero anche di sfruttare al massimo le costose aree del centro della città. Queste esigenze costituirono le condizioni ideali che portarono poi alla definizione di una nuova tipologia edilizia: i grattacieli. Dal punto di vista strutturale, le costruzioni tradizionali in legno e in muratura non consentivano di superare una determinata altezza, in quanto più era alto l'edificio e più c'era la necessità di avere pareti spesse ai piani bassi, ciò portava ad una perdita di spazio che rendeva la costruzione antieconomica. Per superare questo ostacolo, le pareti in muratura furono sostituite da travi e pilastri in acciaio, in modo da formare uno scheletro metallico relativamente sottile e identico per ogni piano. Le facciate, perduta la funzione portante, potevano essere realizzate agganciando dei pannelli di chiusura al telaio strutturale, con notevole aumento delle parti vetrate. Queste innovazioni dei sistemi strutturali hanno portato poi ad un notevole avanzamento anche dei metodi di analisi strutturale. Così nel 1885 è stato costruito l'Home Insurance Building a Chicago, progettato dall'architetto William Le Baron Jenney, dai più considerato come il primo vero grattacielo moderno, nonostante avesse solo 10 piani e fosse alto 42.1 metri, perché introdusse l'uso di una struttura interna in acciaio che sopportava il peso del materiale, consentendo lo sviluppo dell'edificio in altezza.



Figura 2: Home Insurance Building -
Chicago



Figura 3: William Le Baron Jenney

A fine XIX secolo e inizio del XX, le città di New York e Chicago furono soggette ad un vero e proprio boom della costruzione di grattacieli; tra i più noti si possono citare il Flatiron Building (New York, 1902, 86.9 metri) e il Woolworth Building (New York, 1913, 241 metri), che divennero i simboli dell’urbanizzazione del progresso tecnologico.



Figura 4: Flatiron Building
- New York



Figura 5: Woolworth Building - New
York

Nel 1930 Hardy Cross, un professore di ingegneria strutturale, presso la University of Illinois Urbana-Champaign, pubblicò l'articolo “Analysis of Continuous Frames by Distributing Fixed-End Moments” che mostrava come determinare l'andamento delle sollecitazioni nei sistemi indeterminati, che all'epoca costituiva il più difficile problema dell'analisi strutturale. Dopo una pausa dovuta alla seconda guerra mondiale, la costruzione degli edifici alti in acciaio riprese poi con un approccio maggiormente minimalista. Ulteriori progressi si ebbero negli anni '70, quando la nascita dei primi supercomputer fornì la potenza di calcolo necessaria per la modellazione di edifici sempre più complessi. Ulteriori progressi si ebbero grazie alla nascita di nuove discipline, quali l'ingegneria del vento e l'ingegneria geotecnica, che consentirono lo sviluppo di soluzioni sempre più ardite e simultaneamente nacquero anche alternative che sfruttavano il conglomerato cementizio armato. Una maggiore comprensione delle caratteristiche fisiche e meccaniche del calcestruzzo, insieme ad un incremento della resistenza a compressione, condussero a soluzioni economicamente vantaggiose, alternative all'acciaio strutturale per la realizzazione degli edifici alti. Da questo periodo, la costruzione dei grattacieli si è espansa in tutto il mondo attraverso lo sviluppo di nuove tecnologie, materiali e innovazioni che consentono ancora oggi la costruzione di edifici sempre più alti, sostenibili ed importanti, da parte di ingegneri e architetti che provano sempre di più a sfidare quelli che sono i limiti della progettazione, esempi di quanto detto si possono considerare il Burj Khalifa (Dubai, 2009, 829.8 metri), il grattacielo più alto del mondo, e la Shanghai Tower (Shanghai, 2008, 632 metri).



Figura 6: Burj Khalifa - Dubai



Figura 7: Shanghai Tower - Shanghai

Si può quindi concludere che i grattacieli sono da considerare delle straordinarie manifestazioni.

stazioni dell'ingegno dell'uomo, che sfidando i limiti della progettazione e della costruzione, è riuscito a realizzare delle vere e proprie icone che definiscono il paesaggio urbano delle città contemporanee e future.

1.2 Elementi chiave della progettazione

Gli edifici alti, così come tutti i tipi di costruzioni, devono possedere un'adeguata resistenza ed essere in grado di svolgere la funzione per cui vengono progettati, perciò è richiesta un'attenta valutazione di aspetti come:

- Entità degli spostamenti laterali;
- Accelerazioni indotte dal vento;
- Smorzamento;
- Accorciamenti elastici;
- Viscosità e ritiro.

I fattori che influenzano la progettazione degli edifici alti, quindi la definizione della loro altezza massima, possono essere quindi identificati in:

1. Proprietà del sito;
2. Caratteristiche dei materiali;
3. Sistemi strutturali;
4. Caratteristiche del sistema strutturale e gli effetti delle azioni;
5. Esigenze simboliche e limitazioni economiche.

1.2.1 Proprietà del sito

Le caratteristiche del sito comprendono tutti gli aspetti naturali che influenzano la zona in cui dovrà sorgere l'edificio: si tratta delle condizioni geotecniche del suolo di fondazione, l'esposizione al vento e ad eventuali eventi sismici.

Gli edifici alti sono generalmente molto flessibili e presentano un periodo fondamentale di vibrazione molto alto, anche superiore a 5 s, com'è possibile notare dalla formula di calcolo riportata nella NTC per i due materiali da costruzione citati:

$$T = C_1 \cdot H^{0.75} \quad (1)$$

Con C_1 valore dipendente dal materiale utilizzato pari a 0.085 per strutture in acciaio e 0.061 per strutture in calcestruzzo.

Per questa ragione, in caso di terremoto, tali edifici sono generalmente soggetti a forze d'inerzia molto più piccole rispetto ad edifici più bassi, caratterizzati da un periodo fondamentale di vibrazione più piccolo.

Il comportamento strutturale degli edifici alti più di 200 m e realizzati in zone fortemente sismiche è influenzato quindi maggiormente dagli effetti dovuti al vento, piuttosto che da quelli sismici, e ciò sia nel caso di edifici realizzati in acciaio che nel caso di quelli realizzati in calcestruzzo, che ha una massa molto maggiore. L'azione del vento esercita una pressione sulla parete dell'edificio direttamente investita e provoca invece una depressione su quella opposta, mentre sulle pareti parallele si ha un'azione di trascinamento. L'azione del vento è di tipo dinamico (variabile nel tempo) e determina una vibrazione dell'intero edificio, influenzando le condizioni di comfort al suo interno. L'entità di queste azioni può essere analizzata attraverso le prescrizioni presenti nelle normative. Un'altra metodologia, molto efficace per la valutazione dell'azione del vento prevede uno studio condotto con l'ausilio della galleria del vento, soprattutto quando la presenza di altri edifici alti realizzati nelle zone limitrofe può esercitare una significativa influenza, così da avere delle indicazioni più accurate delle azioni esercitate dal vento.

Per quanto riguarda invece la natura del suolo, questa influenza principalmente la scelta del tipo di fondazione che si andrà a progettare per l'edificio: quindi sono molto importanti gli aspetti legati al consolidamento del suolo, ad eventuali sedimenti differenziali e alla possibilità di liquefazione durante un forte terremoto. Dati i numerosi fattori che influenzano le condizioni del suolo, sono molteplici le fondazioni che è possibile utilizzare per la costruzione di un edificio alto, tra cui possiamo citare le fondazioni superficiali a platea e le fondazioni profonde su pali, queste ultime utilizzate qualora sia necessario raggiungere uno strato portante di terreno in profondità. Storicamente, la progettazione delle fondazioni si è basata su formule empiriche che permettono di ottenere risultati approssimativi portando a soluzioni non univoche e conservative, spesso sovra-progettate e costose. Negli ultimi anni sono stati compiuti grandi progressi nello sviluppo di moderni metodi di prove *in situ* per misurare con maggiore precisione i parametri geotecnici necessari per la progettazione delle fondazioni e comprendere l'interazione suolo-struttura. Questa interazione influisce significativamente sulla distribuzione dei carichi verticali, sulle sollecitazioni nella struttura oltre che sulla progettazione della struttura e sul comportamento dinamico della stessa sotto carichi laterali quali vento e terremoti. Una volta stabilite le condizioni del terreno e completate le indagini sul sito, le opzioni di fondazione per le strutture alte includono due tipologie principali:

1. Fondazione a zattera, conosciuta anche come "fondazione a platea", che trasferisce i carichi dell'edificio nello strato di terreno immediatamente sottostante. Si tratta di una lastra continua che si estende per l'intera impronta dell'edificio e si appoggia direttamente sul terreno, trasferendo così i pesi e i carichi in modo più uniforme. Particolarmente utile

quando il terreno è poco resistente o quando il carico della struttura deve essere distribuito su una grande superficie, poiché riduce lo stress sul suolo anziché concentrare il carico in aree più piccole o in singoli punti. Lo spessore delle zattere può essere di diversi metri per resistere agli effetti della punzonatura e taglio delle colonne fortemente caricate, garantendo al contempo un'adeguata distribuzione del carico sugli strati sottostanti.

2. Fondazioni su pali, comunemente utilizzate quando il terreno superficiale è troppo debole per sostenere il carico della struttura, per cui non è fattibile realizzare fondazioni superficiali a causa della profondità di scavo necessaria. Il carico della sovrastruttura viene trasferito dai pali attraverso strati di terreno debolmente compressibile fino a raggiungere strati più rigidi o di roccia dura. Generalmente i progettisti optano per l'uso di gruppi di pali di grande diametro per le strutture alte. Importante è la differenza di prestazioni tra il singolo e un gruppo di pali, in quanto per il singolo, queste dipendono dell'attrito lungo l'albero del palo e dalla resistenza del terreno alla sua base. Al contrario un gruppo di pali può agire assieme al terreno circostante come un'unica unità, in quanto la capacità complessiva viene determinata dalla somma delle capacità individuali e influenzata anche dalla spaziatura tra di essi.

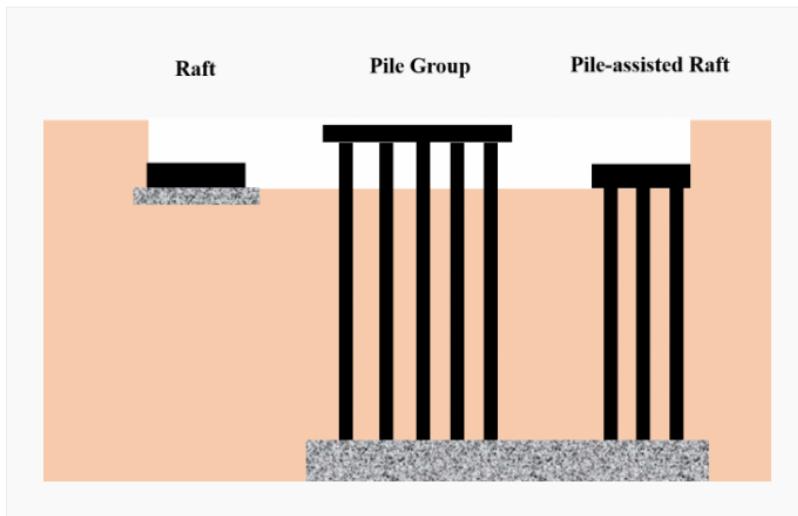


Figura 8: Tipologie di fondazioni

Quando una fondazione a zattera convenzionale non può fornire un supporto adeguato, può essere migliorata aggiungendo dei pali. La fondazione a zattera con supporto di pali è una scelta diffusa per edifici alti quando il terreno non è adatto per prevenire un eccessivo insediamento: l'aggiunta dei pali aumenta l'area di contatto della fondazione e può contribuire a resistere ai carichi laterali. Mentre la zattera fornisce capacità aggiuntiva per il carico finale, i pali garantiscono la maggior parte della rigidità. Complessivamente questo sistema può migliorare le prestazioni della fondazione sia in termini di capacità di carico finale che nella riduzione dell'in-

sedimento e del cedimento differenziale. Questi tipi di fondazioni sono complessi e richiedono un maggiore sforzo di ingegneria strutturale rispetto a sistemi di fondazioni convenzionali utilizzati per gli edifici di altezza medio-bassa, per cui è comune rendere il progetto della fondazione un processo collaborativo tra ingegneri strutturali e geotecnici.

1.2.2 Caratteristiche dei materiali

La comprensione delle proprietà meccaniche dei materiali e del comportamento globale dell'edificio sotto i carichi applicati sono fondamentali per la valutazione di fattibilità del progetto e delle condizioni d'uso della costruzione (6). Come detto in precedenza, il progetto strutturale è basato, oltre che sui carichi gravitazionali anche sulle azioni del vento che presentano un periodo di ritorno di 50 anni, tuttavia riducibili attraverso un'adeguata scelta delle proprietà aerodinamiche dell'edificio, nonché delle azioni sismiche che hanno una probabilità del 10% di essere superate in 50 anni. Negli ultimi anni i materiali da costruzione hanno subito una notevole evoluzione, infatti ad oggi si può contare sull'utilizzo di calcestruzzi con resistenza a compressione che arriva fino a 110Mpa e acciai strutturali con resistenza allo snervamento anche di 450MPa, quindi valori molto elevati rispetto a quelli utilizzati per le costruzioni tradizionali, che consentono di realizzare progetti sempre più efficienti e efficaci, mediante l'impiego di elementi strutturali più snelli.

1.2.3 Sistemi strutturali

Nel corso del tempo l'architettura degli edifici alti ha subito diverse trasformazioni che hanno portato all'utilizzo di svariati sistemi strutturali. La classificazione si basa generalmente sugli schemi statici che sono definiti per scopi operativi:

1. *Sistema a gabbia*, in cui gli elementi sia orizzontali che verticali definiscono uniformemente lo spazio interno dell'edificio. La facciata, solitamente, ha una sua identità ed è concettualmente separata da una pilastrata esterna. Le dimensioni dei pilastri sono principalmente determinati da considerazioni funzionali e dalla disposizione del volume dell'edificio. I pilastri sono disposti con spazi regolari, mentre gli elementi di servizio sono posizionati in modo differenziato. La griglia strutturale così definita risolve efficacemente tutti i problemi relativi al posizionamento e alle dimensioni nel progetto dell'edificio.
2. *Sistema orientato*, usato in caso l'asse longitudinale prenda il sopravvento su quello trasversale, la somma delle forze ribaltanti che agiscono lungo la direzione di minima inerzia ortogonale a tale asse richiede una strutturazione degli elementi statici orientata trasversalmente, portando ad una disposizione "a pettine" degli ambienti lungo le facciate principali, con il sistema di distribuzione e servizio posizionato al centro. L'ottimizzazione dello spessore trasversale è cruciale per garantire un funzionamento adeguato, poiché la

possibilità di deviazioni è limitata ai punti terminali e di conseguenza si ha una distribuzione unidirezionale, che può essere parziale o totale, degli elementi portanti con un forte orientamento funzionale e tipologico dell'impianto.

3. *Sistema a telaio rigido con nodi rigidi*, costituito da travi e colonne collegate mediante giunti rigidi o semi-rigidi, con lo scopo di ripartire il momento flettente generato dalle azioni esterne, da cui dipende la resistenza alle azioni laterali esterne. Le connessioni semi-rigide non impediscono totalmente la relazione relativa tra gli elementi, riducendo così la capacità di trasferire il momento flettente, ma mantenendo una certa resistenza alle azioni orizzontali; nel caso in cui invece la capacità di trasferimento del momento flettente è minima, il comportamento della connessione è assimilabile a quello di un appoggio in quanto trasmette solo sforzo di taglio e sforzo assiale. Le strutture a telaio, sebbene non siano molto efficienti, compensano le azioni orizzontali tramite la flessione degli elementi strutturali e non attraverso lo sforzo assiale. Per strutture più alte di 15 piani, oltre a richiedere elementi di dimensioni notevoli, presentano spostamenti strutturali eccessivi.



Figura 9: Sistema strutturale a telaio

4. *Sistema a telaio controventato o con pareti*, caratterizzati da una maggiore rigidezza dei telai a nodi rigidi e adatti per strutture con più di 30 piani. Infatti rappresentano un'efficace e conveniente soluzione dal punto di vista economico per contrastare le azioni laterali, in quanto ottimizzano la funzionalità del telaio rigido ed eliminano il momento flettente nelle colonne e nelle travi attraverso l'impiego dei controventi. Questi sistemi si comportano come una trave reticolare costituita da travi e colonne, che sostengono i carichi verticali, affiancati dagli elementi di controventamento di diverse forme (ad X, a V, a K concentrici oppure eccentrici), che assorbono invece le azioni orizzontali. Il sistema a telaio controventato è comunemente utilizzato per edifici in acciaio, in quanto si rivela efficace

nel contenere gli spostamenti laterali e migliorare la stabilità complessiva della struttura, mentre il sistema a telaio con le pareti è preferibile per costruzioni in calcestruzzo armato o compositi, in quanto le pareti, elementi verticali a sbalzo di varie forme (circolari, ovali, scatolari, triangolari o rettilinee), contrastano le azioni orizzontali trasmesse all'edificio attraverso dei diaframmi di piano, aumentando la rigidezza e la resistenza complessiva della struttura.



Figura 10: Sistema strutturale a telaio controventato

5. *Sistema outrigger*, che rappresenta un'evoluzione del tradizionale telaio controventato e a pareti, adottabile sia in costruzioni in acciaio che composite. Consiste nell'uso di un nucleo centrale, eventualmente integrato con sistemi di controventatura, e travi orizzontali, semplici o reticolari (outrigger), che collegano il nucleo alle colonne esterne, spesso interconnesse tramite una trave esterna di collegamento. Quando l'edificio è soggetto a forze orizzontali, la rotazione del nucleo centrale è ostacolata dal vincolo outrigger, per cui queste strutture sono adatte anche per edifici con più di 100 piani in quanto dimostrano una maggiore resistenza laterale quando la profondità degli outrigger è di almeno 2 piani.
6. *Sistema a nucleo*, in cui il nucleo centrale dei servizi è caratterizzato da un'elevata inerzia e assume il compito di fornire resistenza controventante all'edificio, lasciando al resto della struttura la sola resistenza alla forza peso. Questo approccio porta ad una significativa riduzione del peso degli elementi strutturali lungo le facciate esterne e promuove una maggiore simmetria, consentendo una risposta uniforme alle sollecitazioni provenienti da diverse direzioni. Lo schema ideale di riferimento prevede una matrice poligonale con un nucleo concentrato, in cui lo spazio servente e quello servito si completano in modo anulare con uno spessore uniforme su tutti i lati. Gli elementi costituenti l'edificio tendono a specializzarsi, il nucleo agisce come "colonna vertebrale", contrastando le azioni orizzontali trasmesse dalle facciate, i solai fungono invece da elementi di rinforzo aggiuntivi.
7. *Sistema a tubo esterno*, in cui le colonne perimetrali sono vicine e connesse da elementi

profondi, consentendo all'edificio di funzionare come una grande trave a sbalzo resistente ai momenti ribaltanti, garantendo quindi resistenza alle forze laterali grazie ad un gran numero di unioni rigide lungo il perimetro, creando una sorta di tubo ampio. La maggior parte della rigidezza complessiva è concentrata nelle strutture di facciata, mentre gli elementi interni sostengono principalmente i carichi verticali trasferiti dai solai. All'interno, ogni fattore contribuisce alla stabilità complessiva dell'edificio; l'ossatura interna è meno sollecitata grazie all'accumulo di rigidezza nell'involucro esterno, consentendo l'articolazione discontinua dello spazio interno e l'eliminazione di alcuni solai per creare vani di altezze differenti. Per mantenere una buona trasparenza della facciata, è possibile aumentare la densità dei pilastri perimetrali o collegarla con elementi diagonali di controventamento per ridurla ad un insieme di "archi a tre cerniere", eliminando i momenti flettenti dagli incastri e massimizzando l'indeformabilità, facendo lavorare solo tramite sforzi di trazione e compressione. L'efficienza di questo sistema dipende dal rapporto altezza/larghezza, dalle dimensioni in pianta, dallo spazio tra le colonne e dai collegamenti.



Figura 11: World Trade Center - New York (Sistema strutturale a tubo esterno)



Figura 12: John Hancock Center - Chicago (Sistema strutturale a tubo controventato)

8. *Sistema a tubo controventato*, nel quale vengono inseriti dei controventi diagonali su più piani della facciata del tubo per aumentare la rigidezza e l'efficienza del sistema. Ciò in quanto il taglio prodotta dalle azioni laterali viene assorbito dai diagonali, eliminando virtualmente l'effetto shear leg e ottenendo un comportamento puramente flessionale poiché le diagonali forniscono una rigidezza rilevante nei confronti di queste azioni; questo approccio trova largo impiego per edifici ad altezza considerevoli. Negli edifici in acciaio, i controventi possono essere costituiti da diagonali o travi reticolari in acciaio , mentre

nel caso di calcestruzzo armato le diagonali sono spesso realizzate attraverso pareti di calcestruzzo, permettendo alle colonne di collaborare nel sopportare i carichi verticali e orizzontali, conferendo al sistema un comportamento simile a quello di trave a sbalzo. Sebbene sia utilizzabile per edifici con più di 100 piani, presenta sfide progettuali per quanto riguarda i dettagli relativi ai rivestimenti. Questa soluzione venne adottata da F.Khan per la progettazione del John Hancock Center.

9. *Sistema a doppio tubo*, in cui il collegamento rigido tra il nucleo centrale e l'involtino esterno contribuisce a migliorare la stabilità del sistema. Tale solidarizzazione può avvenire in modo discontinuo in diversi punti o in modo diffuso ad ogni piano. Questo approccio rappresenta la fusione di due tubi coassiali che distribuiscono uniformemente lo sforzo complessivo e promuovono una maggiore collaborazione tra gli elementi strutturali, permettendo una notevole ottimizzazione dell'utilizzo dei materiali e di conseguenza un aumento significativo dell'altezza dell'edificio. Tale sistema trova applicazione per edifici di più di 100 piani ed è particolarmente efficace quando l'oscillazione laterale rappresenta l'elemento critico e determinante del processo progettuale.
10. *Sistema a fascio di tubi*, in cui la resistenza a ribaltamento è potenziata attraverso il collegamento di più elementi a tubo. Ogni tubo assume un carattere autonomo rispetto agli altri, che comporta la rottura della logica conformazione anulare dello spazio di piano. Il sistema dei servizi non è più vincolato da criteri posizionali rigidi, pur mantenendo un'efficace gestione funzionale dello spazio interno. L'assoluta indipendenza di ciascun modulo consente una libertà totale nella disposizione combinatoria e consente di modificare la forma complessiva e di diversificare l'altezza dei singoli elementi strutturali.
11. *Sistema diagrid*, il cui nome deriva dall'unione delle parole "diagonal" e "grid", in quanto il sistema è una combinazione di griglie diagonali. La struttura è costituita da travi metalliche o in calcestruzzo armato che si intersecano diagonalmente ed è comunemente impiegata nella costruzione di edifici. Rispetto ai telai convenzionali, richiede una quantità minore di acciaio strutturale. Questa tipologia di struttura, ampiamente utilizzata nel terzo millennio per gli edifici alti, si distingue per il suo comportamento altamente efficiente in campo elastico, grazie alla triangolazione della griglia, per cui le sollecitazioni globali causate dai carichi verticali e orizzontali si traducono principalmente in sollecitazioni e deformazioni assiali nelle travi della griglia. Sotto l'azione dei carichi orizzontali, questa caratteristica porta alla riduzione dell'effetto "shear leg" e della deformabilità tagliente, tuttavia, se sottoposta a carichi orizzontali incrementali, la struttura mostra una scarsa capacità di redistribuzione plastica, con conseguente ridotta duttilità complessiva, pur presentando una significativa capacità di sovraresistenza rispetto alla progettazione standard.



Figura 13: IBM Buildign - Pittsburgh (Sistema strutturale diagrid)

1.2.4 Caratteristiche del sistema strutturale e gli effetti delle azioni

La resistenza e la funzionalità sono i principali requisiti per una corretta progettazione, bisogna quindi fare particolare attenzione a quella che è la percezione degli effetti delle azioni esterne sugli occupanti. La progettazione quindi dipende dalla funzione che svolge l'edificio, oltre che dalla rigidezza, la massa e lo smorzamento del sistema strutturale.

Oggi gli edifici alti si progettano con uno spostamento elastico massimo di $h/500$ per effetto dell'azione del vento con periodo di ritorno di 50 anni, e attraverso questo criterio è possibile definire la rigidezza del sistema strutturale in funzione della sua massa e dello smorzamento. Gli spostamenti laterali possono causare degli effetti P- Δ (del secondo ordine) significativi, che possono portare ad un notevole aumento degli spostamenti e delle sollecitazioni negli elementi resistenti verticali. Lo smorzamento, ovvero la capacità di dissipare energia durante le vibrazioni, ha un ruolo importante sulla valutazione delle forze di progetto e sull'entità delle accelerazioni dovute alle azioni laterali, può essere dovuto a cicli di isteresi dei materiali strutturali e non strutturali, ad effetti aero-elastici, alla presenza di elementi dissipativi (dissipazione supplementare), usati per ridurre l'accelerazione, infatti un edificio alto non è utilizzabile se l'accelerazione indotta dalle forze laterali supera una certa soglia, generalmente le accelerazioni trasversali alla direzione del vento sono maggiori di quelle longitudinali, inoltre la percezione del moto rispetto gli edifici vicini, soprattutto in caso di moti torsionali, può creare sensazioni di disagio e anche nausea da parte degli occupanti. Il limite accettabile di velocità torsionale è pari a 3.0 milli-radiani/sec, mentre i limiti di accelerazione percettibile sono espressi in funzione della funzione dell'edificio del periodo di ritorno del vento come riportato in tabella I.

Occupancy type	Horizontal accelerations return wind period	
	1 year	10 years
Office	10-13 milli-g's	20-25 milli-g's
Hotel	7-10 milli-g's	15-20 milli-g's
Apartment	5-7 milli-g's	12-15 milli-g's

Tabella 1: Limiti di accelerazione percettibile

Bisogna anche prestare attenzione agli elementi strutturali verticali, in quanto soggetti ad accorciamenti a causa dei notevoli carichi sopportati. Il processo di accorciamento inizia nel momento della costruzione e può continuare per lungo tempo, a causa degli effetti viscosi, per cui questi spostamenti devono rientrare nei limiti dati da normativa in quanto possono influenzare gli elementi non strutturali e gli impianti. Questi fenomeni possono però essere previsti e i loro effetti vengono opportunamente portati in conto durante la sequenza costruttiva.

Sistema strutturale	Acciaio utilizzato
Telaio	100-200 kg/m ³ per piano
Telaio controventato	riduzione del 10-15%
Tubo	riduzione del 15-25%
Tubo controventato	riduzione del 20-30%
Diagrid	riduzione del 20-30%

Tabella 2: Variazione di acciaio strutturale utilizzato in base al sistema strutturale

Considerando un edificio tipico di 100 piani con struttura in acciaio è possibile effettuare un confronto tra i diversi sistemi strutturali precedentemente citati per quanto riguarda l'uso di acciaio per la costruzione della struttura e notare, in tabella 2 come l'evoluzione dei sistemi strutturali ha portato ad una progressiva ottimizzazione dal punto di vista dell'utilizzo del materiale. La quantità totale di acciaio utilizzata nell'edificio potrebbe essere dell'ordine di decine di migliaia di tonnellate, tenendo conto dell'altezza e del numero dei piani, tuttavia questa è solo una stima approssimativa e la quantità effettiva di acciaio utilizzato potrebbe variare in base a fattori specifici del progetto e alle esigenze di progettazione strutturale. È comunque importante notare che questa riduzione di materiale contribuisce ad un risparmio significativo in termini di costi del materiale, peso della struttura oltre che ad un miglioramento della resistenza sismica e della stabilità complessiva dell'edificio.

2 I sistemi diagrid

2.1 Stato dell'arte

Le prime applicazioni note dei sistemi simili alla diagrid si possono datare al periodo gotico. Gli architetti, già in quei tempi, utilizzavano archi rampanti e contrafforti per distribuire il peso dei soffitti sulle pareti esterne, consentendo la costruzione di edifici molto più alti rispetto agli stili architettonici precedenti. Questi principi sono molto simili ai concetti di triangolazione e distribuzione delle forze tipici delle strutture diagrid moderne, tuttavia la forma odierna, con l'utilizzo di materiali quali acciaio, calcestruzzo e legno e un'accentuata estetica geometrica, si è sviluppata principalmente nel corso del XX secolo. Un importante esempio dell'utilizzo delle diagrid nelle strutture è rappresentato dalla Tour Eiffel (Fig. 14), costruita a Parigi nel 1889, pur non essendo una struttura diagrid nel senso moderno del termine, la sua composizione in ferro a traliccio si basava su principi simili di triangolazione e interconnessione diagonale.

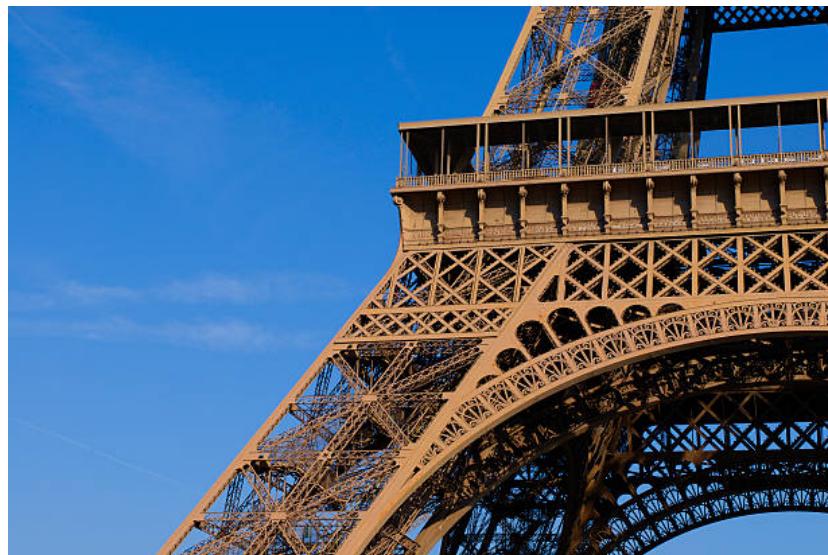


Figura 14: Torre Eiffel

Negli ultimi decenni, l'evoluzione delle tecnologie dei materiali e delle metodologie costruttive ha portato a una crescente diffusione delle strutture diagrid, apprezzate per la loro elevata efficienza strutturale, la versatilità progettuale e l'impatto visivo distintivo. Esempi emblematici di tale tendenza sono il "The Gherkin" a Londra (Fig. 15) e la "Hearst Tower" a New York (Fig. 16).



Figura 15: The Gherkin - Londra



Figura 16: Hearst Tower - New York

Le strutture diagrid sono emerse come risposta innovativa da parte di ingegneri e architetti moderni per affrontare le complesse sfide strutturali e architettoniche legate agli edifici di grandi dimensioni. Sebbene non esista un singolo inventore di questo sistema strutturale, diversi professionisti e aziende hanno giocato un ruolo chiave nel suo sviluppo e diffusione. Tra i precursori delle strutture diagrid, spicca Fazlur Rahman Khan, progettista del John Hancock Center a Chicago, che pur non essendo un esempio di vero e proprio diagrid, ha introdotto un sistema strutturale innovativo con colonne diagonali, anticipando i concetti utilizzati nelle diagrid moderne [9]. Un altro pioniere è Robert Maillart, noto per il suo lavoro rivoluzionario nel campo del calcestruzzo armato; sebbene le sue opere non siano diagrid in senso stretto, egli ha sviluppato concetti di design che incorporano la triangolazione e la distribuzione delle forze, fondamentali per la teoria delle diagrid. Negli ultimi decenni, molteplici ingegneri e architetti hanno ulteriormente sviluppato e raffinato queste strutture, tra cui Renzo Piano e Norman Foster. Quest'ultimo, attraverso il suo studio di architettura Foster+Partners, ha fatto ampio uso delle diagrid nei suoi progetti. Inoltre, aziende specializzate in ingegneria strutturale e design architettonico, come Arup e SOM (Skidmore, Owings & Merrill), hanno svolto un ruolo cruciale nell'applicazione e nella diffusione delle strutture diagrid in progetti globali.

2.2 Le proprietà strutturali

Il sistema diagrid negli edifici alti rappresenta l'ultima evoluzione nella ricerca dell'efficienza strutturale attraverso l'uso di una maglia triangolare che elimina la necessità di colonne portanti tradizionali, coniugando efficienza strutturale, risparmio di materiali ed estetica moderna. Questo sistema ha origine nei tubi intelaiati, dai quali si distingue per l'assenza di elementi verticali, affidando la resistenza alle forze verticali e orizzontali agli elementi diagonali della

griglia. L'efficienza del sistema è determinata dal raggiungimento dei target prestazionali con l'uso minimo di materiali da costruzione, grazie all'ottimizzazione del pattern strutturale adottato [7]. Conservando la configurazione spaziale del tubo e passando da un pattern rettangolare a uno triangolare, il comportamento strutturale si evolve da una risposta dominata dalla flessione a una dominata dal comportamento assiale. Questo cambiamento incrementa la rigidità e l'efficienza, eliminando la principale causa dell'effetto "shear leg". Le strutture diagrid sono generalmente caratterizzate da un nucleo centrale, spesso in calcestruzzo armato o acciaio, che ospita ascensori e scale. I solai sono collegati sia al nucleo centrale sia alla struttura esterna, ma è essenziale che l'ancoraggio all'esoscheletro consenta un limitato grado di movimento, per evitare tensioni di trazione che potrebbero compromettere l'integrità dei solai. I solai sono inoltre circondati da travi di bordo posizionate nei nodi di intersezione delle membrature e dei solai intermedi, per chiudere la griglia reticolare e prevenire deformazioni sotto carichi verticali, problematica accentuata nelle strutture con curvature in pianta o in altezza. La connessione tra l'esoscheletro e il nucleo è garantita da controventi metallici, dimensionati per trasferire le sollecitazioni di taglio indotte dalle azioni orizzontali, come vento o sisma. L'assenza di pilastri interni tra nucleo ed esoscheletro offre una maggiore flessibilità nell'uso dello spazio interno. Le aperture nella struttura, apparentemente casuali, seguono uno schema preciso che si adatta al disegno diagonale degli elementi strutturali e sono progettate e realizzate solo una volta definita la forma e il nucleo della struttura. Le caratteristiche distintive di questa tipologia di struttura possono essere riassunte come segue:

- Efficienza strutturale, dovuta ad una migliore distribuzione dei carichi, sia orizzontali che verticali, grazie alle travi diagonali, riducendo così la necessità di colonne interne e migliorando la resistenza sismica dell'edificio, e alla rigidezza torsionale conferita dalla griglia diagonale migliorando la resistenza alle azioni orizzontali;
- Risparmio di materiale, grazie alla struttura a griglia diagonale è possibile ridurre la quantità di acciaio necessaria per la costruzione dell'edificio rispetto agli edifici tradizionali in quanto è messa in opera una distribuzione ottimale dei carichi;
- Design ed estetica, il sistema diagrid permette di conferire alla struttura un aspetto moderno ed iconico spesso utilizzato per grattacieli e strutture rilevanti ed inoltre consente una maggiore flessibilità per la progettazione degli spazi interni in quanto si riduce la presenza di colonne interne;
- Sostenibilità, si riducono le emissioni in quanto si è portati ad ridurre il peso strutturale attraverso un uso più efficiente dei materiali, di conseguenza si ha una minore emissione di carbonio durante la costruzione della struttura.

2.3 Il comportamento strutturale

Le strutture diagrid si configurano come una facciata modulare composta da unità triangolari sovrapposte, le quali solitamente coprono più piani con una singola unità. La risposta strutturale di ciascun modulo dipende in maniera significativa dalla geometria, in particolare dall'angolo di inclinazione degli elementi diagonali. Per l'analisi manuale di un edificio alto, è opportuno procedere dall'alto verso il basso, calcolando la sollecitazione globale assorbita dal singolo triangolo. Questo processo comporta un regime di sforzi assiali di trazione-compressione e di deformazioni di allungamento-accerchiamento all'interno del triangolo. Per comprendere meglio il comportamento delle strutture diagrid, consideriamo un edificio con pianta rettangolare o quadrata, soggetto sia a carichi verticali che orizzontali. Supponendo che la trasmissione degli sforzi avvenga esclusivamente nei nodi principali, si instaura un regime di sforzi di tipo membranale, analogo a quello delle strutture reticolari come travi o capriate, in cui le aste che compongono il modulo triangolare sono sottoposte esclusivamente a sforzi assiali che si manifestano come sforzi di compressione. Quando l'edificio è sollecitato da forze orizzontali, si generano momenti flettenti e tagli, alterando la distribuzione degli sforzi all'interno del singolo modulo. A causa dei momenti flettenti, le aste del modulo sono soggette sia a trazione che a compressione, a seconda della loro posizione all'interno della struttura. Inoltre, i solai, ancorati ai lati dei moduli, introducono carichi aggiuntivi che possono modificare il regime di sforzi da membranali a flessionali. Per ristabilire un comportamento basato su sforzi assiali, vengono inserite travi di bordo che assorbono questi carichi, permettendo al sistema di operare secondo il principio degli sforzi assiali. In molti casi, questi edifici presentano curvature verticali e in pianta, generando sforzi ortogonali al piano del modulo, che possono causare l'espulsione dei nodi della struttura. La trasmissione degli sforzi tra le membrature diagonali richiede una progettazione meticolosa dei nodi, i quali devono essere assemblati con alta precisione in fabbrica per minimizzare le operazioni di saldatura in cantiere. Inoltre, i nodi devono essere rinforzati con fazzoletti di irrigidimento per mantenere la gerarchia delle resistenze all'interno della struttura.

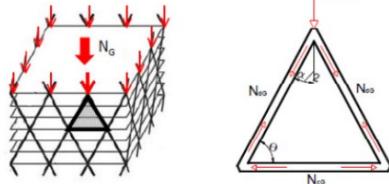


Figura 17: Sforzi dovuti ai carichi verticali
nella maglia triangolare

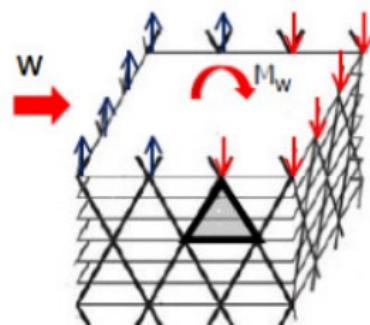


Figura 18: Momento flettente e taglio derivanti
dalle azioni orizzontali

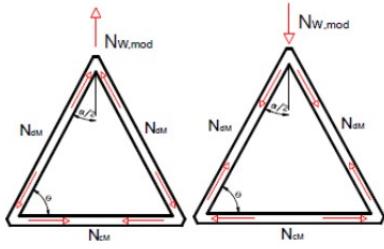


Figura 19: Sforzi dovuti al momento flettente nella maglia triangolare

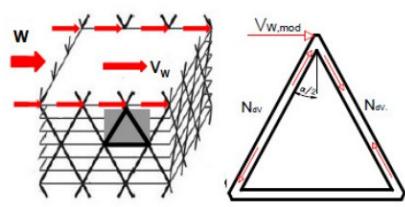


Figura 20: Sforzi dovuti al taglio nella maglia triangolare

Le morfologie degli esoscheletri diagrid utilizzano tipicamente elementi tubolari a sezione circolare o quadrata e profili di tipo HE per le membrature diagonali, mentre le travi di cerchiatura sono generalmente realizzate con profili tipo IPE o HE, al fine di agevolare la connessione con le lastre dell'impalcato. Confrontando il comportamento strutturale di un grattacielo con nucleo ed esoscheletro diagrid, un telaio spaziale con controventi esterni e una struttura a mensola, soggette ad azioni orizzontali, emerge che una forma torsionata in altezza può attenuare la risposta alle forze del vento, disturbando la formazione alternata di vortici sui lati dell'edificio. Tuttavia, ciò comporta una riduzione della rigidezza complessiva del sistema, fenomeno particolarmente evidente con l'aumento dell'angolo di rotazione delle piante. Nel caso di un telaio controventato, la rigidezza diminuisce linearmente con l'aumentare dell'angolo di rotazione delle piante, mostrando un comportamento simile a quello delle strutture con nucleo ed esoscheletro diagrid. Per le strutture a mensola, la riduzione della rigidezza è ancora più marcata rispetto agli altri sistemi, poiché le megacolonne collegate alle travi reticolari di bilanciamento possono spostarsi su diversi lati dell'edificio durante la torsione in altezza, a seconda dell'angolo di rotazione delle piante. Per mitigare questo problema, è necessario mantenere le megacolonne verticali e collegarle a diversi punti delle piante rialzate rispetto alla base di partenza, garantendo una maggiore stabilità strutturale.

2.4 Le problematiche progettuali

Nonostante i numerosi vantaggi delle strutture diagrid, esistono problematiche progettuali e costruttive che possono insorgere durante la realizzazione della struttura:

1. Complessità del design e dell'ingegneria, in quanto la configurazione della griglia diagonale richiede un'attenta pianificazione e analisi avanzata da parte degli ingegneri. È necessaria una modellazione sofisticata e un'analisi dettagliata delle prestazioni per garantire che la struttura sia sicura, stabile e funzionale.
2. Difficoltà di costruzione, più complessa rispetto a quella di strutture tradizionali, a causa della disposizione intricata degli elementi diagonali. La fabbricazione e l'installazione di questi elementi richiedono una pianificazione e un coordinamento meticolosi sul cantiere,

poiché errori durante il processo possono avere un impatto significativo sulle prestazioni e sulla sicurezza dell'edificio.

3. Connessioni strutturali, che devono essere progettate con estrema cura, in particolare quelle tra gli elementi diagonali e gli altri componenti strutturali, essendo soggette a sforzi di taglio, torsione e flessione. È fondamentale garantire la resistenza e la stabilità della struttura, assicurando un'efficace trasmissione dei carichi.
4. Qualità dei materiali, dei quali è essenziale considerare eventuali difetti durante la costruzione, per evitare degradi e malfunzionamenti indesiderati che potrebbero compromettere la longevità e la sicurezza della struttura.
5. Analisi del vento e delle vibrazioni, essendo i carichi laterali di entità significativa, influenzano in modo importante il comportamento dinamico dell'edificio. Di conseguenza, è necessaria un'analisi dettagliata per valutare e mitigare gli effetti di queste sollecitazioni.
6. Compatibilità con gli ambienti interni, che può presentare delle sfide progettuali per l'integrazione degli elementi strutturali all'interno con la disposizione della griglia diagonale, richiedendo soluzioni innovative per garantirne la funzionalità e la conformità agli standard estetici e pratici.
7. Manutenzione e accesso, per cui è indispensabile pianificare soluzioni sicure e pratiche in modo da assicurare che gli interventi regolari possano essere eseguiti senza compromettere l'integrità dell'edificio.

2.5 Le imperfezioni dell'acciaio da carpenteria metallica

Il materiale comunemente impiegato nelle strutture diagrid è l'acciaio strutturale ad alta resistenza, classificato come ASTM A992 negli Stati Uniti, mentre come S355 in Europa. Questo tipo di acciaio si distingue per le sue eccellenti proprietà meccaniche, tra cui l'elevata resistenza a trazione, la duttilità e la resistenza a fatica, che sono essenziali per garantire la sicurezza e l'efficienza strutturale delle diagrid. A seconda delle specifiche progettuali e dei requisiti di carico, possono essere impiegate anche leghe speciali o acciai progettati su misura. La scelta dipende da diversi fattori, tra cui la capacità portante richiesta, l'ambiente esterno in cui la struttura verrà esposta e le normative di progettazione locali. Per questo motivo è fondamentale considerare i difetti intrinseci del materiale, come le tensioni residue, le imperfezioni geometriche, la sensibilità alla corrosione, la fatica e l'influenza della temperatura [3] [6]. Le "tensioni residue" o "autotensioni" sono stati tensionali interni autoequilibrati presenti negli elementi metallici, generati durante i processi tecnologici di produzione industriale, come il raffreddamento, la saldatura, il taglio alla fiamma, la laminazione a freddo e il raddrizzamento. Queste tensioni si originano quando un corpo subisce deformazioni plastiche non uniformi in

assenza di forze esterne contrastanti, e sono di natura elastica. La distribuzione disomogenea delle caratteristiche meccaniche lungo la sezione trasversale degli elementi metallici è strettamente legata a tali processi, con la tensione di snervamento che ha un impatto significativo sul comportamento strutturale. Le attuali metodologie di valutazione della capacità portante delle membrature di acciaio tengono conto di queste imperfezioni, abbandonando l'idea di "aste ideali" perfettamente rettilinee e isotrope, sostituendole con una più realistica interpretazione di "aste industriali" affette da inevitabili imperfezioni meccaniche e geometriche legate alla produzione. Tali le tensioni residue, quelle longitudinali sono particolarmente critiche poiché influenzano gli stati tensionali indotti dai carichi esterni e possono compromettere la capacità portante delle membrature soggette a fenomeni di instabilità dell'equilibrio [13].

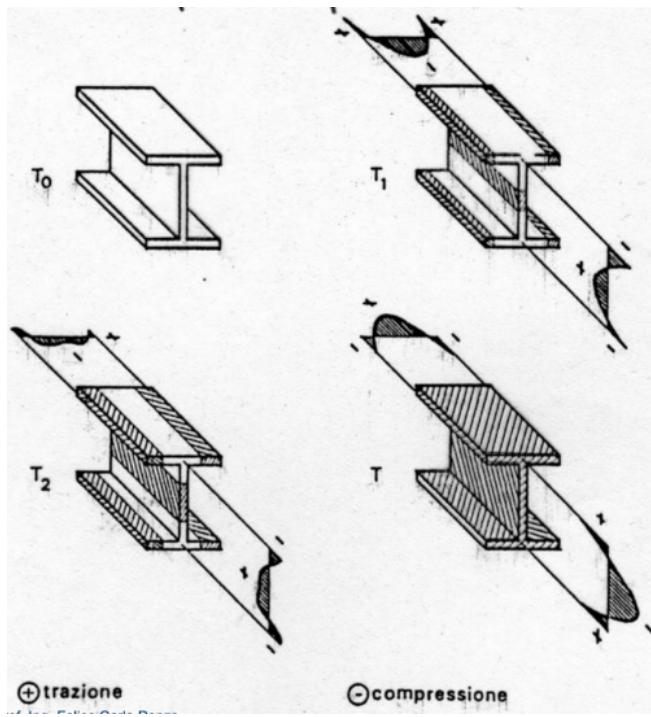


Figura 21: Andamento delle tensioni residue in un profilo laminato a caldo

Le "imperfezioni geometriche" comprendono tutte le deviazioni rispetto alla geometria ideale delle membrature. Possono essere trasversali, ossia relative alla sezione retta, oppure longitudinali, coinvolgendo l'asse della membratura stessa. Ad esempio, l'usura progressiva dei rulli sbozzatori di un treno di laminazione può determinare variazioni di spessore nella sezione trasversale del profilo laminato. Altre imperfezioni trasversali includono la mancanza di ortogonalità degli elementi che compongono la sezione trasversale. Le imperfezioni longitudinali, invece, si manifestano principalmente come deviazioni dell'asse della membratura dalla sua posizione ideale, che dovrebbe essere perfettamente rettilinea, e sono spesso dovute ai processi di lavorazione e montaggio. Gli effetti di queste imperfezioni sulla capacità portante delle membrature possono essere quantificati attraverso parametri come l'eccentricità e la freccia v_0 . L'eccentricità del

carico alle estremità delle membrature può essere causata dalle variazioni nella geometria della sezione trasversale, che provocano uno spostamento del baricentro. La freccia v_0 rappresenta lo spostamento trasversale al centro della membratura dovuto ad una curva iniziale, che può essere approssimata con una sinusode senza introdurre errori significativi nella valutazione della capacità portante a compressione della membratura.

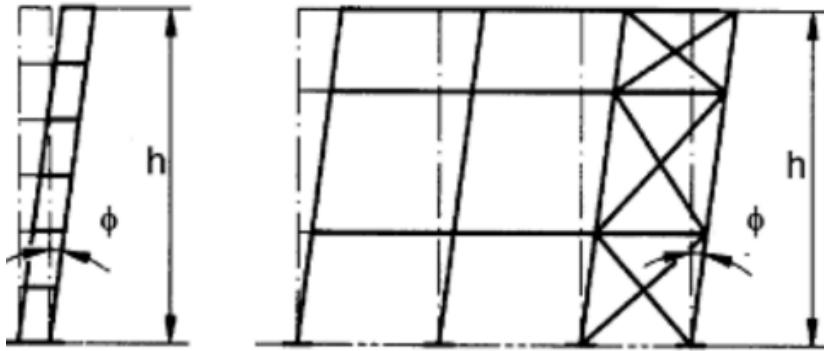


Figura 22: Difetti di verticalità

Curva d'instabilità (v. Tabella 4.2.VI NTC)	e_0/L (analisi globale elastica)	e_0/L (analisi globale plastica)
a ₀	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

Figura 23: Difetti di curvatura

La corrosione atmosferica è uno dei principali fattori che compromettono la durabilità delle strutture in acciaio, provocando una progressiva erosione del materiale che riduce l'area resistente, incidendo negativamente sulle prestazioni strutturali in termini di resistenza, rigidezza e duttilità. Sebbene l'acciaio sia comunemente considerato un materiale di lunga durata, è suscettibile a un processo di degrado indotto dalla corrosione, un fenomeno spontaneo e irreversibile causato dall'interazione chimico-fisica con l'ambiente circostante. La corrosione, alimentata principalmente dall'ossigeno e dall'umidità, si manifesta tipicamente attraverso la formazione di ruggine che penetra gradualmente nell'acciaio, compromettendo le sue capacità strutturali fino a causare potenzialmente la perdita totale di integrità. Anche la corrosione localizzata può causare danni significativi, come la perforazione di un tubo o il degrado delle capacità portanti di elementi specifici, riducendo drasticamente l'efficienza strutturale complessiva. Per contrastare efficacemente la corrosione, si adottano due principali strategie di protezione: la

protezione passiva e la protezione attiva. La protezione passiva consiste nell'applicazione di rivestimenti di vernice sulla superficie metallica, non solo per preservarne l'estetica, ma soprattutto per creare una barriera protettiva contro gli agenti corrosivi. Questi rivestimenti vengono applicati seguendo un ciclo di Pitturazione che include uno strato di fondo (primer) applicato dopo un adeguato trattamento delle superfici mediante abrasivi, fiamma o soluzioni acide, per garantire la pulizia e la rugosità ottimali, seguito da uno o più strati intermedi e da due o più strati di finitura protettivi. La protezione arriva, invece prevede l'utilizzo di rivestimenti metallici, come quelli a base di zinco, tramite processi come l'immersione a caldo o mediante elettrodepositazione. In particolare, la zincatura si dimostra estremamente efficace nel proteggere l'acciaio dalla corrosione, sebbene possa limitare la possibilità di effettuare saldature sulle superfici trattate.



Figura 24: Corrosione su acciaio da carpenteria

La fatica è la causa principale di cedimento nelle parti strutturali e non strutturali utilizzate in edilizia civile. Questo tipo di danneggiamento si verifica in elementi sottoposti a carichi ciclici e/o oscillatori ripetuti nel tempo, che sono generalmente inferiori ai carichi necessari per causare una deformazione plastica evidente dell'elemento. Anche se gli sforzi complessivi rimangono al di sotto del limite di snervamento del materiale, le sollecitazioni locali possono superare il limite di snervamento locale, inducendo deformazioni plastiche cicliche a causa di irregolarità superficiali o microstrutturali. Il cedimento per fatica inizia con sforzi ripetuti che causano deformazioni plastiche locali, le quali favoriscono la formazione di cricche di fatica. La propagazione di queste cricche è poi accelerata dalle tensioni di trazione a cui è sottoposto l'elemento.

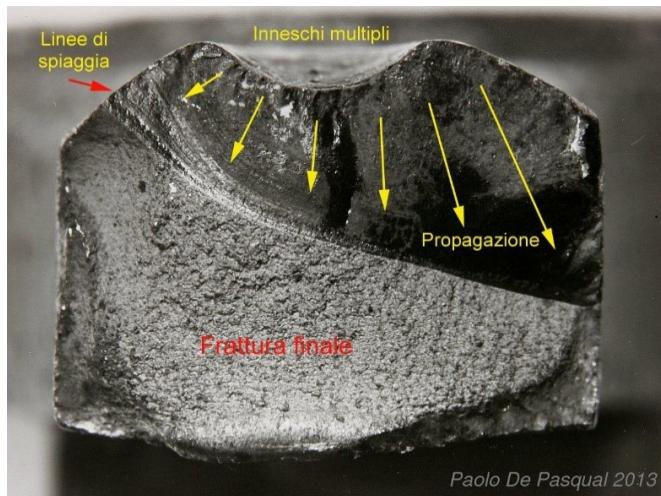


Figura 25: Rottura per fatica dell'acciaio

La temperatura può influenzare gli acciai da carpenteria in vari modi attraverso trasformazioni strutturali, alterando la resistenza e la duttilità del materiale. Gli acciai subiscono diverse trasformazioni a seconda della temperatura: ad esempio, riscaldando l'acciaio ad alte temperature, si facilita la trasformazione della struttura cristallina nella fase austenitica, caratterizzata da una maggiore duttilità e una migliore lavorabilità tramite processi come la forgiatura e la laminazione. Al contrario, raffreddando l'acciaio a temperature più basse, si formano fasi strutturali come la perlite e la ferrite, che influenzano significativamente le proprietà meccaniche del materiale. A basse temperature, l'acciaio tende a presentare una maggiore resistenza meccanica, poiché le deformazioni plastiche diventano più difficili da realizzare; ciò riduce la duttilità, ovvero la capacità del materiale di deformarsi plasticamente prima della rottura, aumentando la fragilità, un aspetto critico in presenza di carichi dinamici o impatti che possono causare fratture fragili anziché deformazioni plastiche. Al contrario, a temperature elevate, l'acciaio mostra una maggiore duttilità.

In sintesi, la temperatura può avere un impatto rilevante sul comportamento degli acciai da carpenteria metallica, influenzando la struttura, la resistenza, la duttilità e la stabilità delle proprietà meccaniche. Pertanto, è fondamentale considerare sia la temperatura ambientale che di esercizio in fase di progettazione.

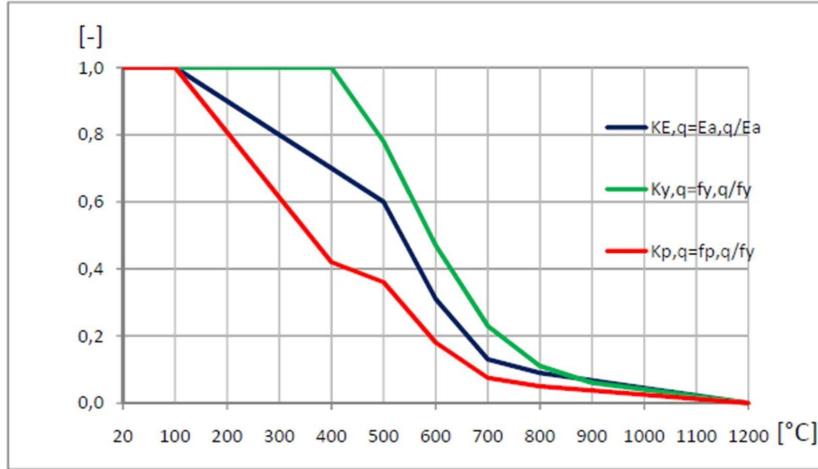


Figura 26: Fattori di riduzione del modulo elastico e della tensione di snervamento al variare della temperatura

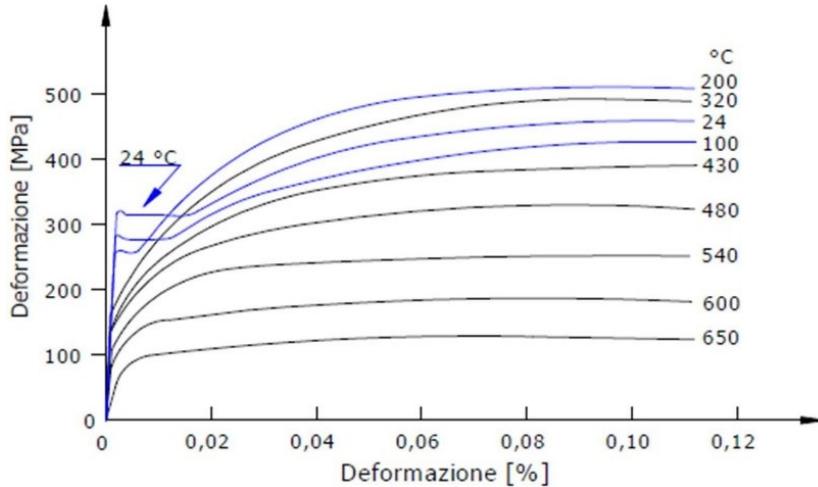


Figura 27: Andamento curva sforzo-deformazione al variare della temperatura

2.6 Evoluzioni e altre applicazioni

Attualmente, le strutture di tipo diagrid sono impiegate anche per scopi diversi dalla costruzione di nuovi edifici, come la riqualificazione olistica. Queste strutture consentono di integrare gli elementi portanti con i componenti dei sistemi progettati per l'efficientamento energetico e il rinnovamento architettonico degli edifici preesistenti ([4]). Tali interventi possono essere progettati per superare le problematiche tipiche delle operazioni di riabilitazione, quali la necessità di trasferire gli abitanti, gli elevati costi e la lunga durata dei lavori che comporta un periodo di inattività dell'immobile. Le strutture diagrid possono essere realizzate dall'esterno, fungendo da esoscheletro, riducendo così l'impatto delle criticità e permettendo anche l'impiego di soluzioni prefabbricate per accelerare i tempi di costruzione. Per affrontare gli elevati costi, gli

interventi di costruzione dell'esoscheletro diagrid possono essere programmati in concomitanza con gli interventi di manutenzione ordinaria. Dal punto di vista della sostenibilità ambientale, l'esoscheletro diagrid può essere concepito secondo i principi del Life Cycle Thinking, considerando tutti i costi lungo il ciclo di vita dell'opera. Ciò include l'uso di elementi riparabili, facilmente mantenibili, adattabili, smontabili e riciclabili. La progettazione strutturale degli esoscheletri diagrid per il recupero di edifici esistenti richiede un'accurata definizione della geometria del modulo e della rigidezza minima, con una verifica approfondita delle sollecitazioni sugli elementi diagonali. La configurazione ottimale dell'esoscheletro deve adattarsi alla esigenze architettoniche dell'edificio, rispettando la disposizione delle aperture e le altezze interpiano, oltre a ottimizzare le prestazioni strutturali degli elementi della maglia.

Ulteriori evoluzioni degli esoscheletri diagrid, sviluppate nel corso degli anni, prevedono l'utilizzo di maglie diverse da quelle tradizionali triangolari, come ad esempio le esagonali o le irregolari, che sfruttano pattern capaci di ottimizzare le prestazioni strutturali (8). Tra gli edifici che si rifanno a questa tipologia di maglie si annoverano: lo stadio nazionale di Pechino, anche detto Bird's Nest (Fig. 28) in quanto si rifà alla forma di un nido d'uccello;



Figura 28: Bird's Nest, Pechino

il centro aquatics nazionale, sempre a Pechino, conosciuto anche come Water Cube (Fig. 29), la cui maglia diagrid è stata modellata sulla base del modello di schiuma di Weaire e Phelan;



Figura 29: Water Cube, Pechino

un ultimo esempio può essere rappresentato dalla maglia con pattern Voronoi, un'evoluzione delle maglie esagonali, di cui sono riportati alcuni esempi di progetti in Fig. 30.



Figura 30: Progetti di strutture con maglia con pattern Voronoi

3 La variazione di temperatura

3.1 Classificazione delle variazioni di temperatura

Le variazioni giornaliere e stagionali della temperatura esterna, l'irraggiamento solare e i fenomeni convettivi determinano variazioni nella distribuzione termica degli elementi strutturali. L'entità e la natura di queste variazioni di temperatura dipendono da più fattori, tra cui le condizioni climatiche, l'esposizione, la massa complessiva della struttura e l'eventuale presenza di elementi non strutturali isolanti. Tali variazioni possono manifestarsi principalmente in due modi: lineari o differenziali, entrambe influenzano il comportamento strutturale, ma in modo diverso.

La variazione di temperatura lineare si verifica quando l'intera struttura, o una parte significativa di questa, subisce un cambiamento uniforme di temperatura, con un incremento o una riduzione omogenea in ogni punto. Gli effetti principali di questa variazione includono dilatazione e contrazione uniformi, generazione di tensioni termiche uniformi e movimenti delle giunture. Questi effetti possono essere mitigati attraverso l'uso di giunti di dilatazione e dettagli costruttivi adeguati.

La variazione di temperatura differenziale si presenta quando diverse parti della struttura subiscono cambiamenti di temperatura non uniformi, spesso dovuti a esposizioni parziali al sole, ombreggiature irregolari o diverse condizioni termiche interne ed esterne. Gli effetti di questa variazione sono più critici, poiché possono generare stress termici localizzati, deformazioni differenziali e carichi complessi sulle connessioni strutturali. Per mitigare questi effetti, è utile adottare una progettazione flessibile dei collegamenti, prevedere monitoraggio e manutenzione regolari delle variazioni di temperatura e utilizzare materiali con proprietà isolanti termiche adeguate.

3.2 Cause ed effetti

Le strutture diagrid sono comunemente realizzate in acciaio, materiale che le rende particolarmente sensibili alle variazioni di temperatura, con potenziali implicazioni sulla stabilità strutturale se non adeguatamente considerate in fase progettuale. Le principali cause delle variazioni di temperatura includono:

1. Cambiamenti climatici stagionali;
2. Esposizione solare, poiché l'irraggiamento può riscaldare significativamente le superfici in acciaio, soprattutto in climi caldi e per strutture con ampie superfici esposte, come i grattacieli;
3. Riscaldamento interno, derivante dai sistemi di condizionamento che possono aumentare la temperatura degli elementi interni;

4. Eventi eccezionali, come incendi, che determinano un rapido incremento della temperatura degli elementi strutturali, con conseguente perdita delle prestazioni meccaniche dell'acciaio.

Queste variazioni possono generare una serie di effetti:

1. Dilatazione e contrazione termica, l'acciaio si espande o si contrae con l'aumento o la diminuzione della temperatura, provocando tensioni e deformazioni che possono compromettere la stabilità e l'integrità strutturale se non opportunamente gestite;
2. Effetti su giunti e connessioni, in quanto le variazioni di temperatura possono indurre movimenti differenziali tra le varie parti della struttura, sottoponendo i giunti e le connessioni a carichi complessi che influenzano la stabilità e possono causare danni a lungo termine;
3. Stress termici, che possono indurre deformazioni indesiderate, crepe o rotture, e possono essere distribuiti uniformemente o localizzati;
4. Cicli di fatica, ovvero cicli di carico ripetuti che col tempo possono portare a fenomeni di fatica del materiale riducendo la vita utile dell'elemento;
5. Variazioni di comportamento dinamico, poiché le variazioni di temperatura possono alterare le proprietà dinamiche della struttura, influenzando la risposta ai carichi dinamici come vento e sisma.

Per mitigare gli effetti delle variazioni di temperatura sugli elementi in acciaio, si possono adottare diverse strategie:

- Progettazione flessibile, utilizzando giunti di dilatazione per consentire l'espansione e la contrazione degli elementi senza generare stress eccessivi, e progettare connessioni capaci di assorbire i movimenti termici;
- Uso di materiali isolanti termici, da applicare sugli elementi in acciaio, per ridurre l'impatto delle variazioni termiche;
- Manutenzione regolare e monitoraggio, effettuando cicli di manutenzione per rilevare e gestire le problematiche legate agli stress termici, implementando dispositivi di monitoraggio per misurare in tempo reale le variazioni di temperatura e i movimenti strutturali;
- Analisi termiche avanzate e dettagliate, per prevedere le conseguenze delle variazioni di temperatura, progettando interventi mirati in modo da prevenire effetti dannosi.

Nel presente lavoro di tesi, l'attenzione è stata focalizzata sulle problematiche legate alle variazioni di temperatura causate dall'irraggiamento solare nelle strutture diagrid.

3.3 L'irraggiamento solare

L'irraggiamento solare rappresenta la quantità di energia solare che raggiunge la superficie terrestre sotto forma di radiazione elettromagnetica, comprendendo la luce visibile, l'ultravioletto e l'infrarosso. Questa radiazione può essere suddivisa in tre componenti principali:

1. Radiazione diretta, ovvero la radiazione solare che arriva direttamente dal sole senza subire diffusione o riflessione, predominante nelle giornate limpide e prive di nuvole;
2. Radiazione diffusa, la radiazione solare che ha subito diffusione atmosferica a causa di molecole d'aria, polveri e altre particelle atmosferiche, presente in quantità significativa anche nelle giornate nuvolose;
3. Radiazione riflessa, è la componente che, dopo aver raggiunto la superficie terrestre, viene riflessa nuovamente verso l'alto, influenzata dalle caratteristiche della superficie riflettente.

L'irraggiamento solare si misura in W/m^2 e i principali gli strumenti di misurazione includono:

- Piranometri, utilizzati per misurare la radiazione solare globale su una superficie piana;
- Pireliometri, specifici per la misurazione della radiazione solare diretta;
- Radiometri, strumenti che misurano diverse componenti della radiazione solare, comprese la radiazione globale e la diffusa.

La quantità di energia solare ricevuta varia in base a diversi fattori come la latitudine (con maggiore irraggiamento nelle regioni equatoriali rispetto a quelle polari), le stagioni, l'ora del giorno e le condizioni atmosferiche. La conoscenza di questi valori è cruciale in numerose applicazioni, tra cui l'energia solare rinnovabile, l'agricoltura, la climatologia e l'ingegneria e l'architettura urbanistica. In questi campi, la progettazione degli edifici e degli spazi urbani deve tenere conto dell'irraggiamento solare per ottimizzare l'efficienza energetica e garantire il comfort degli abitanti.

Nel capitolo 3.5 delle Norme Tecniche per le Costruzione (NTC18) [12], si considerano le variazioni di distribuzione della temperatura negli elementi strutturali in relazione alla variazione giornaliera e stagionale della temperatura esterna, valutando la severità delle azioni termiche in base a svariati fattori come le condizioni climatiche del sito l'esposizione, la massa complessiva della struttura e l'eventuale presenza di elementi non strutturali isolanti. La temperatura esterna è distinta tra temperatura massima estiva (T_{max}) e temperatura minima invernale (T_{min}), riferite ad un periodo di ritorno di 50 anni e calcolate tramite le espressioni riportate in Fig. 31 relative a quattro zone differenziate in base a specificità locali, come l'altitudine di riferimento a_s (espressa in metri).

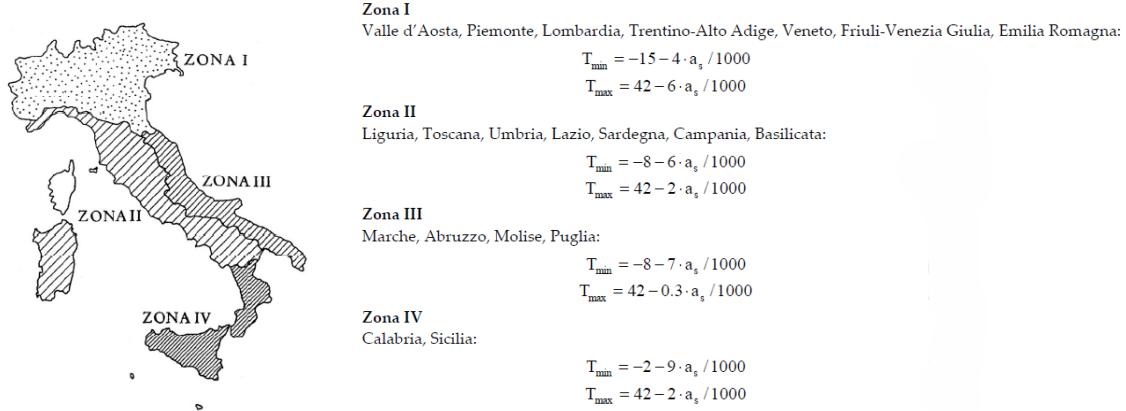


Figura 31: Formule della temperatura dell'aria esterna

Per la valutazione della temperatura interna alla struttura, in assenza di dati specifici relativi al tipo di costruzione e alla sua destinazione d'uso, la normativa definisce un valore standard di 20 °C.

La distribuzione della temperatura negli elementi strutturali è valutata mediante due componenti:

- La componente uniforme $\Delta T_u = T - T_0$: definita dalla differenza tra la temperatura media attuale (T) e quella iniziale alla data di costruzione T_0 ;
- Le componenti variabili con legge lineare secondo gli assi principali y e z della sezione, ΔT_{My} e ΔT_{Mz} .

La temperatura media attuale (T) può essere calcolata come la media tra la temperatura della superficie esterna, $T_{sup,est}$, e quella della superficie interna, $T_{sup,int}$, dell'elemento considerato, le quali a loro volta sono calcolate considerando le temperature dell'aria esterna T_{est} e interna T_{int} , includendo il trasferimento di calore per irraggiamento e per convezione all'interfaccia aria-costruzione e dell'eventuale presenza di isolante. In mancanza di dati più precisi, la temperatura iniziale dell'elemento alla data di costruzione (T_0) può essere assunta pari a 15 °C. Il contributo dell'irraggiamento solare viene valutato considerando diverse condizioni, quali la stagione, la natura della superficie e la sua esposizione, che determinano differenti incrementi di temperatura, come riportato nella tabella 3.

Stagione	Natura della superficie	Incremento di temperatura	
		Superfici esposte a Nord-Est	Superfici esposte a Sud-Ovest od orizzontali
Estate	Superficie riflettente	0 °C	18 °C
	Superficie chiara	2 °C	30°C
	Superficie scura	4 °C	42 °C
Inverno		0 °C	0 °C

Tabella 3: Contributo dell'irraggiamento solare

3.4 Le dilatazioni termiche

Tra gli effetti principali causati dalla variazione termica dovuta dall'irraggiamento solare, uno dei più rilevanti da considerare durante la fase di progettazione e costruzione delle strutture è la deformazione termica degli elementi. Il riscaldamento e il raffreddamento dell'acciaio provocano espansione e contrazione, generando tensioni di trazione e compressione che possono compromettere la stabilità della struttura. Per affrontare la dilatazione termica dell'acciaio, è essenziale definire il coefficiente di dilatazione termica, un parametro che quantifica l'espansione o la contrazione dell'acciaio per ogni grado di variazione di temperatura. Il valore tipico di dilatazione termica lineare per l'acciaio è circa $11\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$. La dilatazione termica (ΔL) di un elemento in acciaio può essere calcolata mediante la formula $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$, dove α è il coefficiente di dilatazione lineare, L_0 è la lunghezza iniziale dell'elemento e ΔT è la variazione di temperatura.

Le dilatazioni termiche nelle strutture causano deformazioni negli elementi, e in presenza di vincoli possono generare anche stress termici significativi, portando a problemi strutturali come crepe e instabilità. Per mitigare questi effetti, è fondamentale l'impiego di giunti di dilatazione, che consentono all'acciaio di espandersi e contrarsi senza arrecare danni strutturali. Durante la progettazione, è cruciale considerare le dilatazioni termiche per selezionare materiali e tecnologie adeguate.

I giunti di dilatazione sono disponibili in diversi materiali, tra cui gomma, acciaio o elastomeri, e in varie tipologie:

- Lineari, utilizzati principalmente in strutture rettilinee come ponti, pavimentazioni e facciate di edifici, consentono il movimento lungo una singola direzione;
- Angolari, impiegati nelle strutture che cambiano direzione, come negli angoli degli edifici;
- Verticali, progettati per assorbire i movimenti verticali, comunemente utilizzati in graticci e strutture a più piani;

- A scorrimento, permettono movimenti in più direzioni, utili per assorbire non solo le dilatazioni termiche ma anche altri tipi di movimenti strutturali.

Nei grandi edifici i giunti di dilatazione sono posizionati in punti strategici per permettere il movimento tra diverse sezioni dell'edificio, svolgendo un ruolo cruciale, soprattutto negli edifici alti e in zone caratterizzate da significative escursioni termiche.

4 Caso di studio

4.1 Descrizione del *software* RFEM6

RFEM (Rhinoceros Finite Element Method") è un *software* avanzato di analisi strutturale sviluppato da Dlubal Software GmbH, utilizzato principalmente per il calcolo e la verifica delle strutture tridimensionali in una vasta gamma di progetti ingegneristici tra cui edifici, ponti, torri, gallerie, stadi. Il *software* consente la creazione di modelli 3D complessi grazie a strumenti di modellazione intuitivi e un'ampia libreria di materiali e sezioni. RFEM supporta l'integrazione con altri *software* CAD/BIM attraverso l'importazione e l'esportazione di dati, facilitando la collaborazione interdisciplinare. Basato sulla metodologia degli elementi finiti, RFEM consente l'analisi del comportamento strutturale sotto varie condizioni di carico, includendo analisi lineari, non lineari e dinamiche, per valutare sollecitazioni e deformazioni. La versione RFEM6 offre la possibilità di ampliare le funzionalità del *software* mediante dei moduli aggiuntivi specifici per diverse tipologie di analisi, quelle su strutture in acciaio, calcestruzzo e legno, e strumenti per l'analisi di carichi ambientali come vento e neve. Il *software* considera inoltre l'ubicazione della struttura modellata, adattandosi alle normative internazionali per garantire la conformità ai requisiti legali e tecnici dei vari paesi.

4.2 Descrizione del modello di calcolo

Il modello computazionale è stato realizzato adottando il *software* RFEM6, basandosi sul lavoro presentato all'interno degli articoli [10] e [11]. Il modello rappresenta un grattacielo di 90 piani con un'altezza di 351m, caratterizzato da un nucleo centrale formato da 16 pilastri in acciaio di sezione tubolare rettangolare cava, la cui dimensione varia ogni 10 piani lungo l'altezza, come indicato nella tabella 4. Gli impalcati di piano sono formati da travi di varie sezioni, dettagliate in Fig. 32. La maglia diagonale esterna, il cui modulo standard è illustrato in Fig. 33, è composta da 15 moduli realizzati con sezioni tubolari quadrate cave a sezione variabile ogni 6 piani, come riportato nella tabella 5, con un'inclinazione di circa 60° lungo l'intera l'altezza del grattacielo. Gli elementi strutturali sono realizzati in acciaio S275, avente una tensione di snervamento caratteristica di $f_{yk} = 275N/mm^2$. Per quanto riguarda i carichi statici applicati, oltre il peso proprio degli elementi, è stata considerata l'azione variabile di categoria B (uffici), che definisce normativa ([12]) un valore di sovraccarico di $q_k = 3kN/m^2$.

Pilastrata	Sezione [mm]
1	500x1000x80,4
2	500x1000x70,4
3	400x800x80,6
4	400x800x67,4
5	400x800x54,9
6	400x800x43,0
7	300x600x44,2
8	300x600x28,4
9	300x600x13,7

Tabella 4: Sezioni dei pilastri

Modulo	Sezione [mm]
1	51200x115
2	1100x110
3	1100x95
4	1000x90
5	1000x75
6	800x80
7	800x65
8	800x50
9	600x55
10	600x50
11	600x40
12	600x30
13	600x25
14	400x20
15	300x10

Tabella 5: Sezioni moduli maglia

diagonale

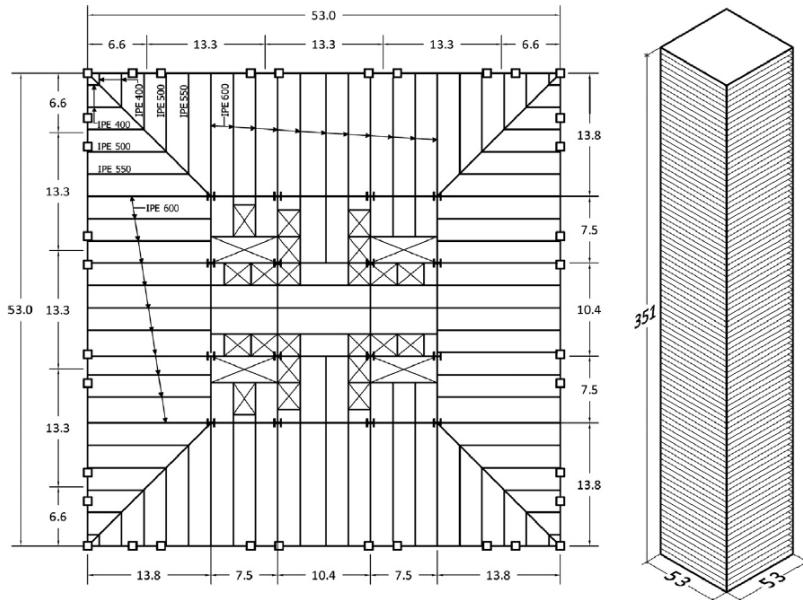


Figura 32: Pianta tipo dell'impalcato

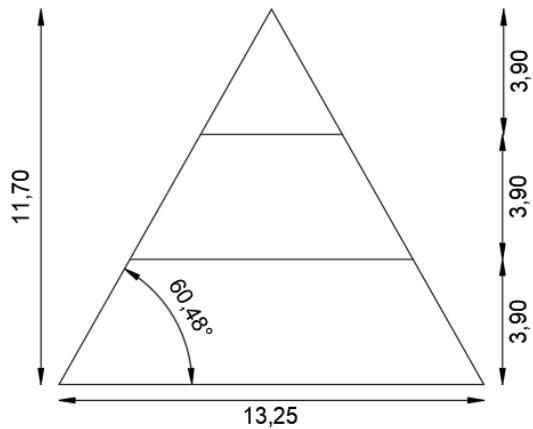


Figura 33: Dimensioni maglia diagrid

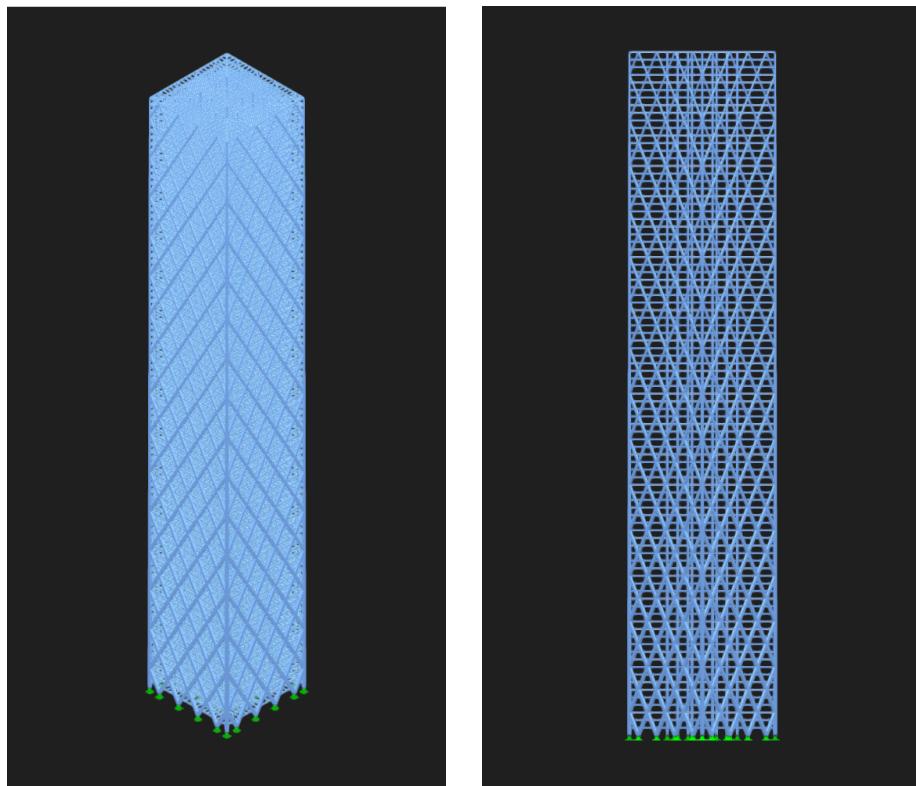


Figura 34: Modello in vista 3D

4.3 Analisi modale

L'analisi modale è una tecnica avanzata utilizzata nell'ambito dell'ingegneria strutturale e meccanica per analizzare il comportamento dinamico di un sistema fisico. Un sistema dinamico, in generale, è caratterizzato da movimenti oscillatori o vibratori, i quali possono essere indotti da varie sorgenti, come forze esterne, oscillazione di base o interazioni interne tra i componenti.

ti strutturali. L'obiettivo principale dell'analisi modale è quello di determinare le proprietà dinamiche fondamentali di un sistema, che includono:

- Frequenze naturali di vibrazione, ovvero le frequenze alle quali il sistema oscillerebbe liberamente in assenza di forze esterne applicate. Ogni frequenza naturale è associata a un particolare modo di vibrazione, che rappresenta il comportamento del sistema a quella specifica frequenza;
- Modi di vibrazione, ogni modo è una configurazione specifica di deformazione e movimento del sistema durante l'oscillazione alla sua frequenza natural. Questi modi sono caratterizzati da forme di deformazione (o forme di deflessione), che descrivono come le diverse parti del sistema si muovono e si deformano durante la vibrazione;
- Smorzamento, che definisce come e quanto rapidamente l'energia vibratoria viene dissipata nel tempo.

L'uso dell'analisi modale è cruciale per vari aspetti dell'ingegneria e del design strutturale, tra cui:

- Identificazione delle frequenze critiche, che consente di determinare le frequenze naturali del sistema per evitare coincidenze con le frequenze di eccitazione esterne (causate, ad esempio, da terremoti, vento o macchinari), che potrebbero indurre fenomeni di risonanza e amplificazione delle vibrazioni;
- Progettazione e ottimizzazione strutturale, infatti grazie alle informazioni ottenute dall'analisi modale è possibile progettare strutture più resistenti alle vibrazioni e implementare sistemi di smorzamento adeguati per mitigare gli effetti delle oscillazioni;
- Analisi della sicurezza strutturale, identificando i modi di vibrazione e le frequenze naturali è possibile valutare la capacità della struttura di resistere ad eventi dinamici, individuando eventuali punti deboli e potenziali meccanismi di collasso del sistema;
- Manutenzione e monitoraggio, utilizzata per valutare lo stato di salute di una struttura nel tempo, rilevando variazioni nelle proprietà dinamiche che possono indicare la presenza di danni o degrado.

In sintesi, l'analisi modale è essenziale per comprendere e migliorare il comportamento dinamico delle strutture e dei sistemi meccanici, garantendo sicurezza, affidabilità e prestazioni ottimali.

Dopo aver creato il modello 3D nel *software*, definendo con precisione i materiali, le sezioni trasversali degli elementi strutturali, i vincoli, le condizioni al contorno e i carichi applicati (Cap. 4.2), è stato necessario procedere con l'analisi modale per effettuare una calibrazione iniziale del sistema. L'analisi è stata configurata selezionando il metodo di calcolo appropriato (in questo caso, il metodo Lanczos). In questa fase, è stato specificato il numero di modi propri da calcolare,

in funzione dei requisiti di progetto. Il calcolo delle frequenze naturali e delle forme modali richiede la risoluzione dell'equazione degli autovalori del sistema dinamico, determinando così gli autovalori (le frequenze naturali) e gli autovettori (i modi di vibrazione). I risultati vengono sono stati infine rappresentati sia graficamente che numericamente, permettendo un'analisi del comportamento dinamico della struttura. Di seguito vengono riportati i risultati dell'analisi modale eseguita sul modello di calcolo, da cui si evidenzia che la struttura ha un periodo proprio di 2.857 secondi per i modi prevalentemente traslazionali (Fig. 35 e Fig. 36) e di 0.802 secondi per il modo prevalentemente rotazionale (Fig. 37).

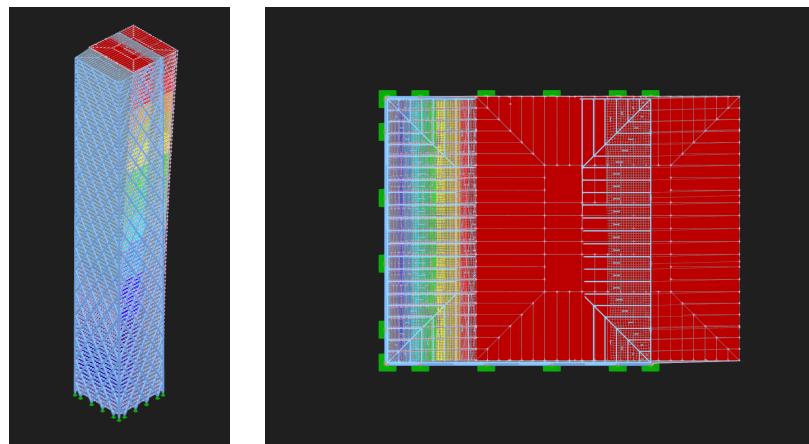


Figura 35: Primo modo di vibrare

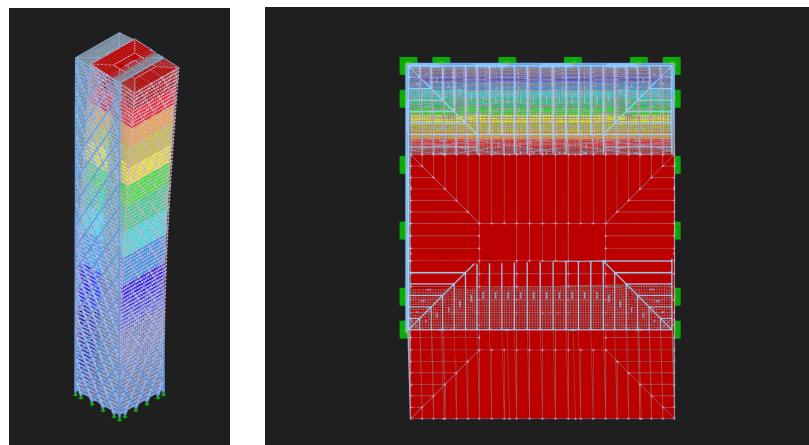


Figura 36: Secondo modo di vibrare

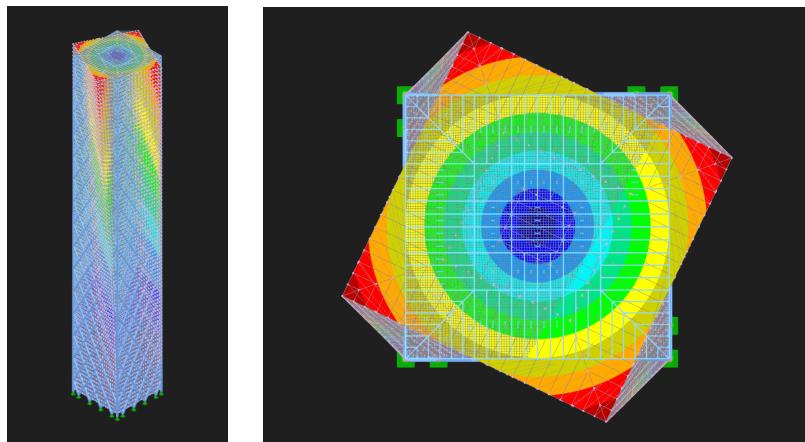


Figura 37: Terzo modo di vibrare

4.4 Analisi del vento

L’analisi del vento è un aspetto cruciale per la progettazione degli edifici alti, incluse le strutture diagrid, poiché queste sono particolarmente soggette a carichi del vento significativi. Gli obiettivi principali di tale analisi sono:

- Determinazione dei carichi del vento, identificando intensità, direzione e distribuzione dei carichi che agiscono sulla struttura;
- Comportamento dinamico, per valutare la risposta dinamica della struttura, inclusi gli effetti di risonanza e oscillazione;
- Stabilità e rigidezza, per garantire che la struttura abbia adeguata rigidezza laterale tale da resistere ai carichi del vento senza eccessive deformazioni o instabilità.

I passaggi da eseguire per poter effettuare un’accurata analisi del vento sono i seguenti:

1. Raccolta dei dati relativi al vento, utilizzando dati meteorologici storici e studi specifici del sito per determinare la velocità e le pressioni del vento, considerando anche la possibilità di raffiche estreme, le direzioni prevalenti e le variazioni stagionali;
2. Modellazione della struttura, creando un modello tridimensionale della struttura diagrid con l’ausilio di *software* di analisi strutturali e rappresentando accuratamente la geometria, le proprietà dei materiali e le connessioni tra gli elementi strutturali;
3. Applicazione al modello dei carichi derivanti dal vento, seguendo le normative e i codici di costruzione, come l’eurocodice 1 (EN 1991-1-4) [2] o le Asce 7 (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures) [1]. I carichi possono essere rappresentati come pressioni superficiali distribuite sulle facciate oppure come forze concentrate su nodi specifici dell’edificio;

4. Analisi della struttura, che può essere un'analisi statica, per valutare la risposta strutturale ai carichi di vento statici, verificando tensioni, deformazioni e stabilità, o un'analisi dinamica, per esaminare la risposta dinamica della struttura, considerando le frequenze naturali, i modi di vibrazione e gli effetti di risonanza. Per edifici molto alti, è consigliabile eseguire anche un'analisi in galleria del vento per ottenere risultati più accurati;
5. Valutazione dei risultati, attraverso i quali ci si assicura che le sollecitazioni e le deformazioni sono contenute entro i limiti considerati accettabili. In seguito, se necessario, si provvederà a effettuare delle modifiche al *design*, come l'aumento di rigidezza laterale, l'aggiunta di sistemi di smorzamento o l'ottimizzazione della forma della struttura per ridurre i carichi.

Per quanto riguarda le strutture diagrid, queste risultano particolarmente efficienti nel redistribuire i carichi derivanti dal vento grazie alla loro configurazione diagonale, che aumenta la rigidezza torsionale e riduce le oscillazioni laterali. Le connessioni tra gli elementi diagonali e orizzontali devono essere progettate in modo da trasferire efficacemente i carichi garantendo sempre la continuità strutturale. La forma dell'edificio può essere ottimizzata per ridurre l'effetto dei carichi del vento, utilizzando configurazioni più aerodinamiche. L'analisi da effettuare richiede sicuramente un approccio integrato che combina i dati meteorologici, una modellazione avanzata e delle analisi dettagliate.

Nella simulazione effettuata si è considerato un carico orizzontale dovuto alla pressione del vento, calcolato secondo le indicazioni delle norme ASCE 7 [1], considerando una velocità del vento di a 50 m/s (110 mph) e considerando uno spostamento massimo ammissibile dell'edificio di $H/500$ sotto tale carico. I risultati della simulazione mostrano uno spostamento lungo l'asse X e lungo l'asse Y di 37.2 cm, in due combinazioni separate che massimizzano i carichi lungo le rispettive direzioni. Nella combinazione che considera il carico del vento agente in entrambe le direzioni contemporaneamente si ha uno spostamento pari a 41.7 cm.

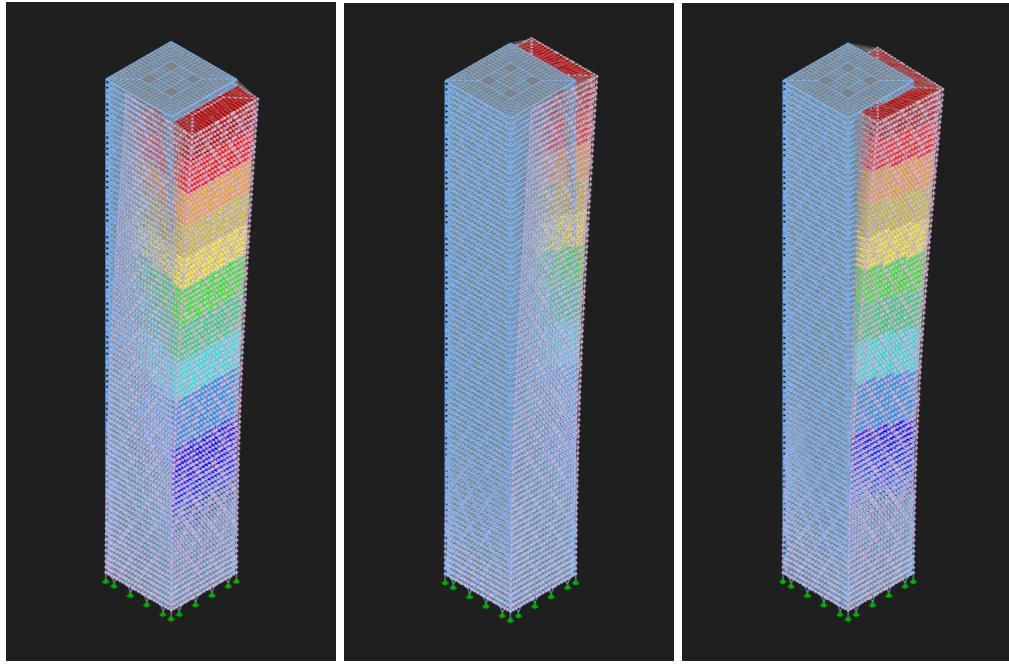


Figura 38: Spostamento
max lungo x

Figura 39: Spostamento
max lungo y

Figura 40: Spostamento
max vettoriale

4.5 Valutazione dell'irraggiamento solare

Utilizzando RFEM6 è possibile eseguire l'analisi degli effetti dell'irraggiamento solare applicando agli elementi desiderati un tipo di carico "variazione di temperatura", che viene assegnato al corrispondente caso di carico di riferimento [5]. Seguendo il procedimento descritto nel capitolo 3.5 della NTC18 [12], riportato nel capitolo 3.3 dell'elaborato, il primo passo è stato quello di selezionare una città rappresentativa per ciascuna zona climatica in cui è stato suddiviso il territorio italiano. Nello specifico sono state scelte le seguenti città: Milano per la Zona I, con altitudine di riferimento $a_s = 120m$, Potenza per la Zona II, $a_s = 819m$, Bari per la Zona III, $a_s = 5m$, e Palermo per la Zona IV, $a_s = 14m$. Successivamente, sono state calcolate le temperature esterne massime e minime per ciascuna località, utilizzate poi per determinare i parametri termici relativi alle condizioni estive ed invernali da inserire nel *software* di analisi strutturale.

Zona	$a_s(m)$	T_{est}		Estate		Inverno	
		T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_C (°C)	ΔT (°C)	T_C (°C)	ΔT (°C)
1 Milano	120	59.280	-15.480	24.640	39.280	-12.740	-35.480
2 Potenza	819	58.362	-12.914	24.181	38.362	-11.457	-32.914
3 Bari	5	59.999	-8.035	24.999	39.999	-9.018	-28.035
4 Palermo	14	59.972	-2.126	24.986	39.972	-6.063	-22.126

Tabella 6: Parametri dei carichi termici relativi alle Zone

Successivamente, sono stati creati due casi di carico separati per le condizioni di temperatura estiva e invernale, assegnando la categoria di azione "Temperatura (non da incendio)". È stato impostato che questi due tipi di carico agiscano alternativamente, in modo tale da non essere considerati simultaneamente nelle combinazioni di carico. Considerando la verifica allo Stato Limite Ultimo (SLU), sono state definite le seguenti otto combinazioni di carico:

- CO1 = 1.3 * CC1;
- CO2 = 1.3 * CC1 + 1.5 * CC2;
- CO3 = 1.3 * CC1 + 1.5 * CC2 + 0.90 * CC3;
- CO4 = 1.3 * CC1 + 1.5 * CC2 + 0.90 * CC4;
- CO5 = 1.3 * CC1 + 1.5 * CC3;
- CO6 = 1.3 * CC1 + 1.5 * CC4;
- CO7 = 1.3 * CC1 + 1.05 * CC2 + 1.5 * CC3;
- CO8 = 1.3 * CC1 + 1.05 * CC2 + 1.5 * CC4;

In seguito, i carichi termici sono stati creati inserendo i parametri ΔT e T_C riportati in tabella 6, riferendoli ai rispettivi casi di carico, per poi assegnarli agli elementi delle facciate esposte.

Il calcolo è stato poi eseguito utilizzando due tipi di analisi statica:

- Geometricamente lineare, in cui l'equilibrio viene analizzato su un sistema strutturale indeformato;
- Grandi spostamenti, che considera le forze longitudinali e trasversali nel calcolo, per cui dopo ogni fase di iterazione, viene creata la matrice di rigidezza del sistema deformato e i carichi sono movimentati in modo differenziato.

Questo approccio è stato adottato per analizzare il comportamento del sistema strutturale, includendo anche un'analisi che tenga conto degli spostamenti che la struttura subisce a seguito

dell'applicazione del carico, trattandosi di una struttura di notevoli dimensioni che può subire degli spostamenti significativi.

4.6 Esiti dell'analisi numerica

I risultati dall'analisi numerica sono stati ottenuti sotto forma di sollecitazioni. La distribuzione dello sforzo normale (positivo se di trazione e negativo se di compressione) è stato estrapolata sotto forma di diagrammi a bande di colori. Di seguito sono riportati, con vista esterna ed interna alla struttura, i diagrammi relativi alla combinazione con i carichi statici e alle combinazioni della Zona 1 (dalla Fig. 41 alla Fig. 47), in cui le aste tese sono evidenziate in rosso, mentre le aste compresse sono evidenziate con la scala di colori che va dall'arancione al blu a seconda dell'intensità. I diagrammi relativi alle zone rimanenti sono inseriti all'interno dell'Allegato A.

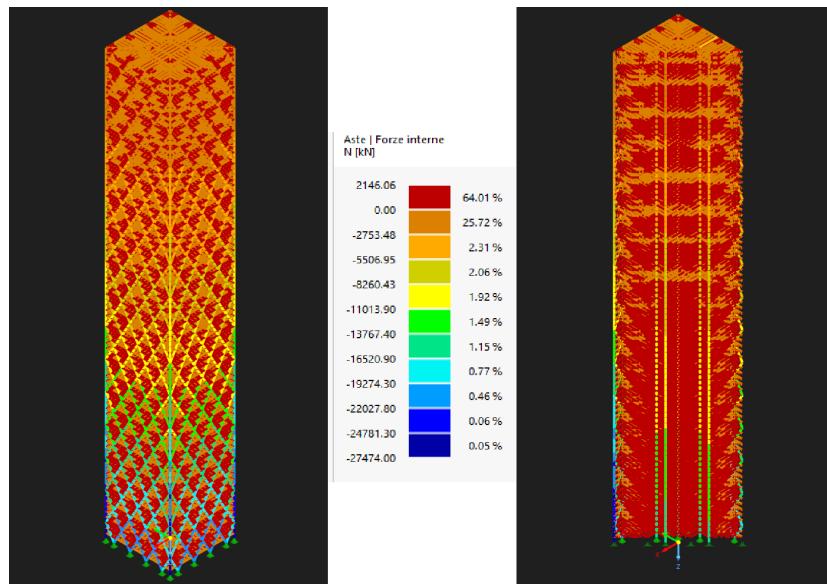


Figura 41: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO2

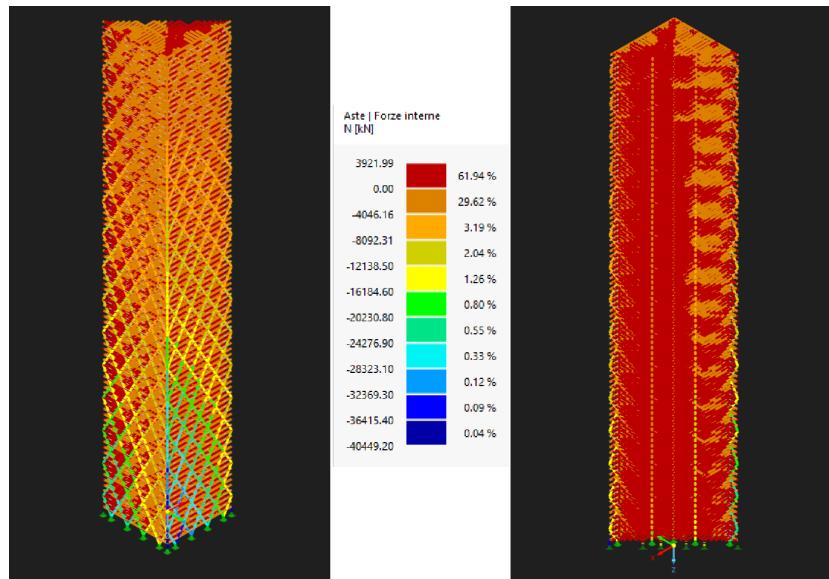


Figura 42: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 1

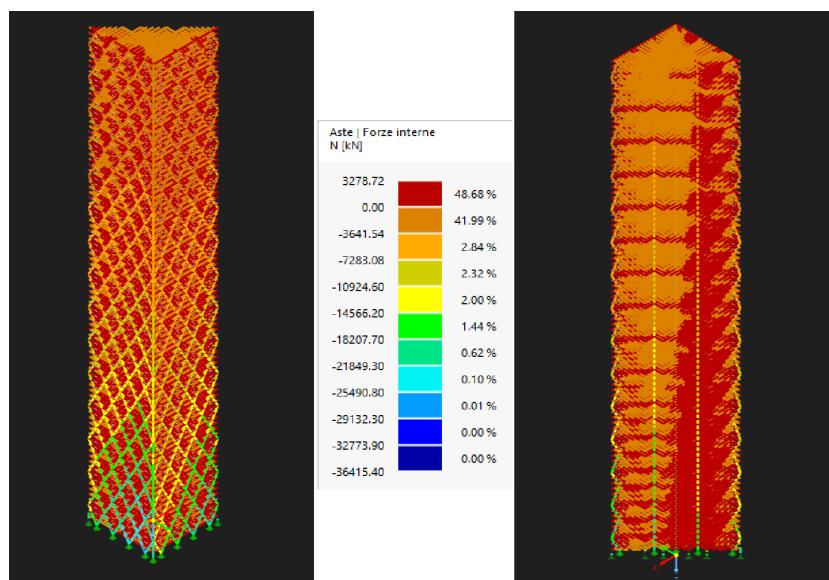


Figura 43: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 1

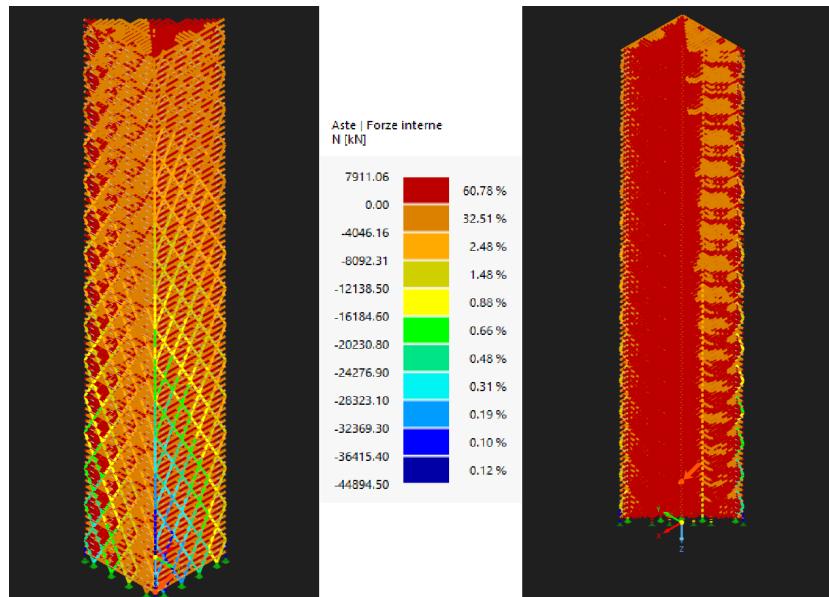


Figura 44: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 1

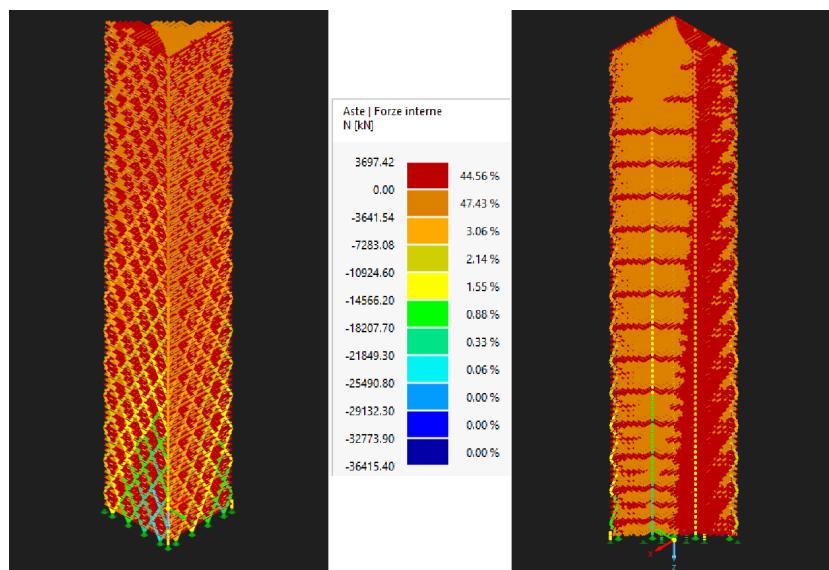


Figura 45: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 1

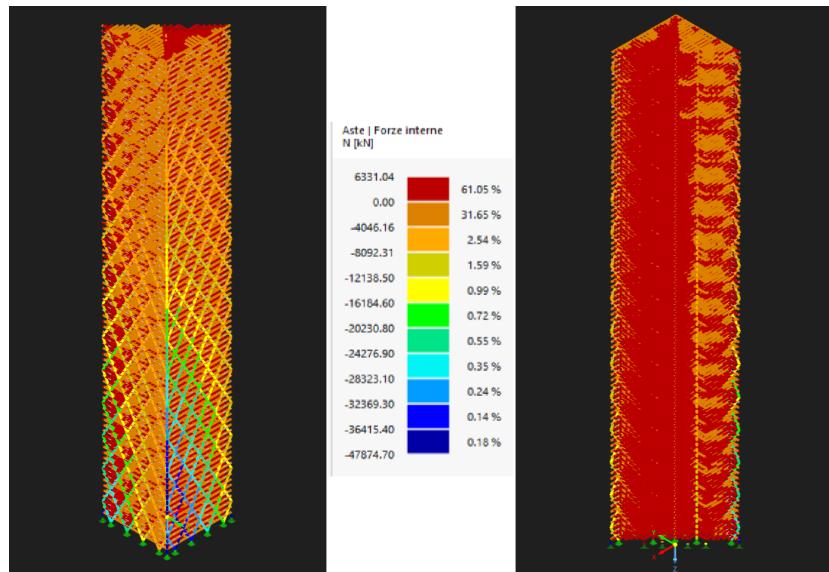


Figura 46: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 1

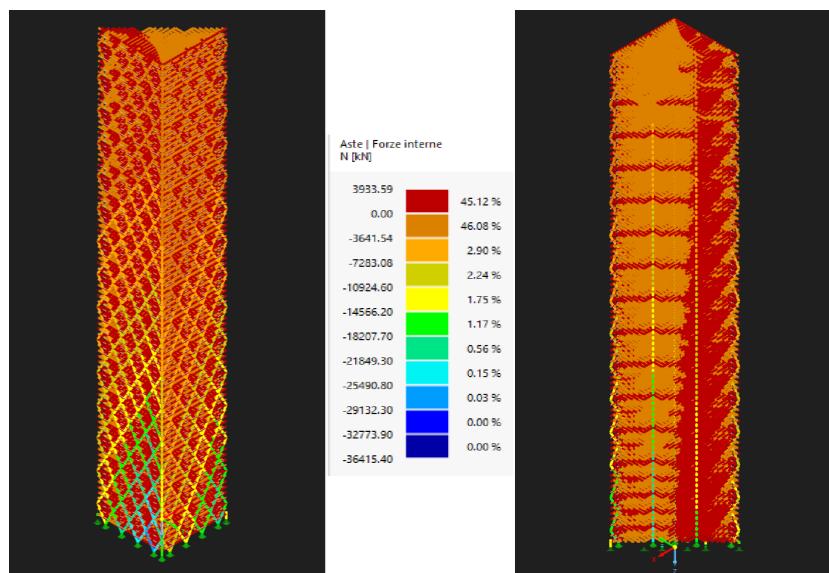


Figura 47: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 1

Com'è possibile notare, nel diagramma relativo alla combinazione con soli carichi verticali (Fig. 41), la distribuzione di sforzo normale è simmetrica rispetto al centro della struttura. Nelle combinazioni con i carichi termici, invece, si evidenzia come gli effetti della variazione di temperatura provocano, a seconda che ci si trovi nella stagione estiva o invernale, una variazione della distribuzione della compressione e della trazioni sia negli elementi esterni che interni alla struttura (da Fig. 42 a Fig. 47).

Successivamente sono esportati dal *software* di calcolo in file di testo e suddivisi per zone, combinazioni di carico comprendenti il carico termico e la tipologia di analisi condotta. In

seguito, i risultati sono post-processati in fogli di calcolo Excel in base alla suddivisione assiale della struttura in 15 moduli. La media delle sollecitazioni per ogni modulo è stata quindi confrontata con la media delle sollecitazioni ottenuta dalla combinazione dei carichi statici. Il calcolo della variazione percentuale tra le combinazioni permette dunque di valutare l'impatto dei carichi termici sullo stato di sforzo dell'edificio. Considerando che i risultati ottenuti per le diverse zone dell'Italia mostrano un comportamento similare per le varie combinazioni di sforzo, sono stati riportati di seguito dalla Fig. 48 alla Fig. 51, rispettivamente, i grafici illustranti la variazione percentuale delle sollecitazioni di trazione (rispetto al valore medio di 18.469 kN per il modulo 1 e 2.269 kN per il modulo 15 dei carichi statici) e compressione (rispetto al valore medio di -6765.65 kN per il modulo 1 e -119.021 kN per il modulo 15 dei carichi statici) per ogni combinazione delle azioni, relativi al primo e all'ultimo modulo dell'edificio nella Zona 1. Questi grafici forniscono una chiara interpretazione della variazione dello stato di stress lungo l'altezza dell'edificio. Grafici aggiuntivi, relativi ai moduli restanti e alle altre zone climatiche, sono forniti nell'Allegato A, situato alla fine della tesi.

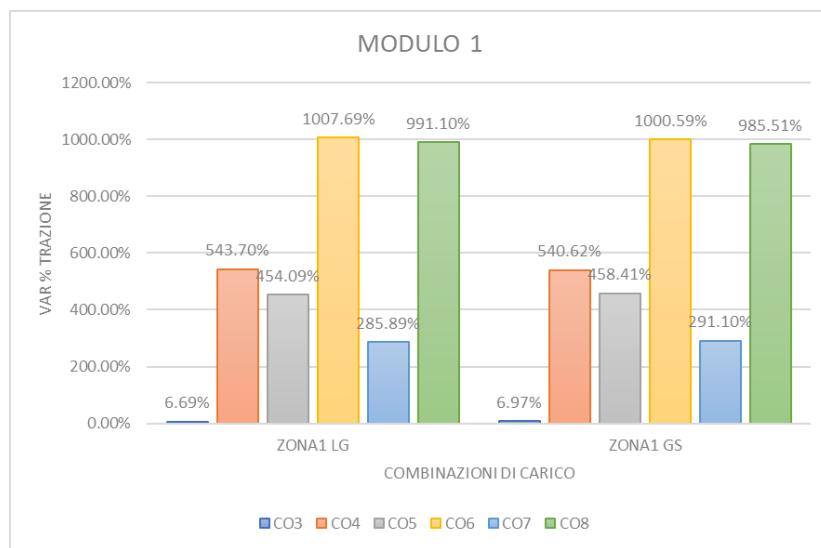


Figura 48: Variazione % trazione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 1

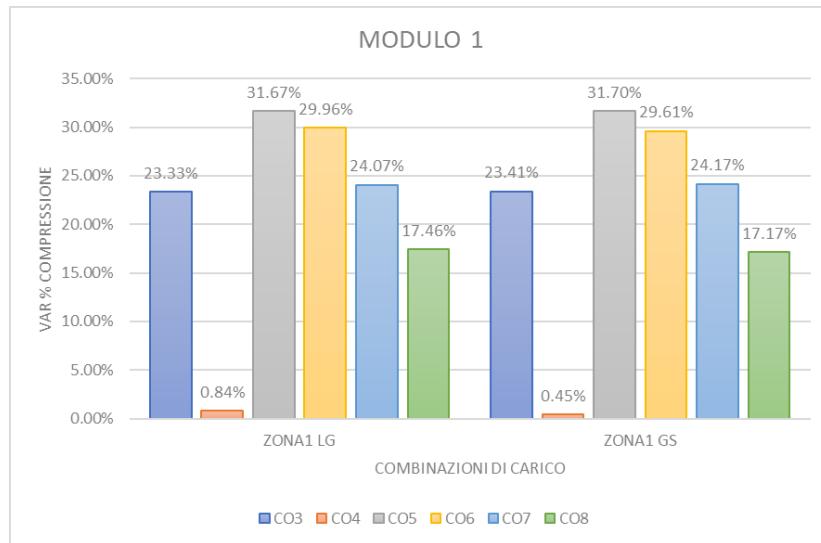


Figura 49: Variazione % compressione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici,
-6765.65 kN; Zona 1

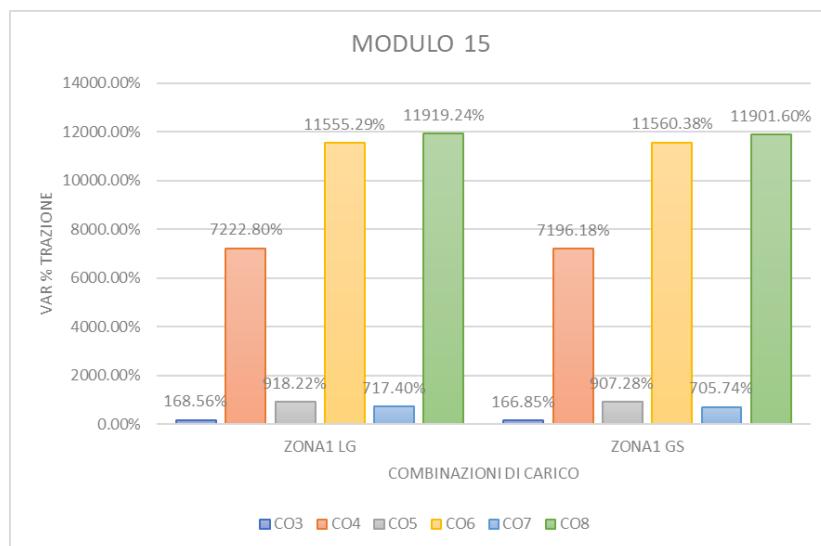


Figura 50: Variazione % trazione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, 2.269
kN; Zona 1

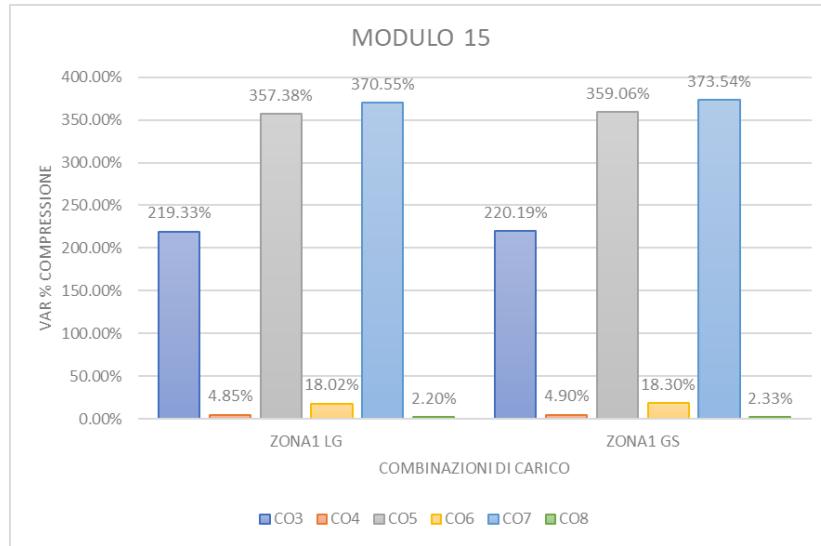


Figura 51: Variazione % compressione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici,
-119.021 kN; Zona 1

Come possiamo notare da questa prima tipologia di grafico (Fig. 49 e Fig. 51), nelle combinazioni CO3, CO5 e CO7, ovvero le combinazioni in cui è presente il carico temperatura relativo alla stagione estiva, la variazione maggiore si ha nella compressione, con un valore trascurabile nei moduli inferiori ma crescente con l'altezza, fino al 370%; mentre per le combinazioni CO4, CO6 e CO8 (Fig. 48, Fig. 50), quindi le combinazioni in cui è presente il carico termico relativo alla stagione invernale, l'incremento maggiore si ha nella trazione, con un aumento che varia da 10 a 100 volte il valore relativo alla combinazione con soli carichi verticali. Ciò perché nella combinazione con solo carichi permanenti e variabili la trazione negli elementi è decisamente bassa. Inoltre, si può notare come l'andamento della variazione percentuale delle sollecitazioni è pressoché identico tra i due tipi di analisi. Ciò fa dedurre che gli spostamenti subiti dalla struttura a causa dei carichi termici non sono tali da determinare delle azioni del secondo ordine significative. Per questo motivo, i grafici relativi all'andamento della variazione percentuale in relazione all'altezza dell'edificio per ogni combinazione sono stati effettuati solo per una delle due analisi, di cui sono qui riportati i grafici relativi alla Zona 1. I grafici relativi alle zone rimanenti sono contenuti nell'Allegato A.

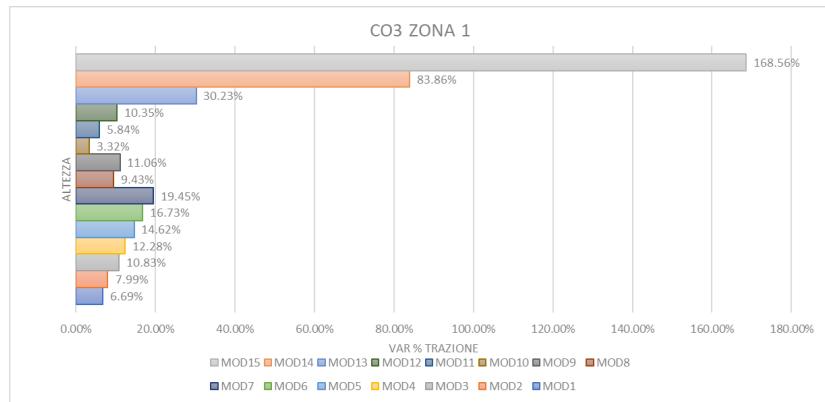


Figura 52: Variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 1

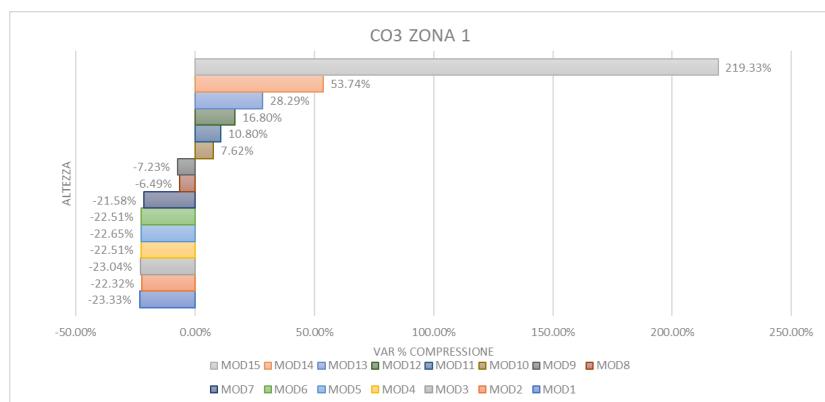


Figura 53: Variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 1

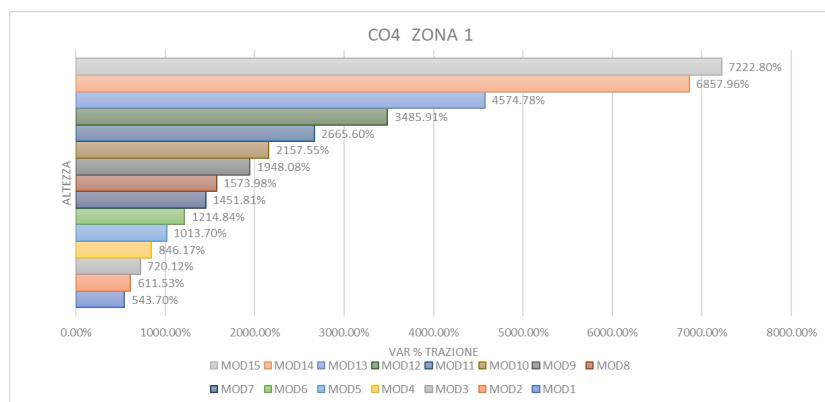


Figura 54: Variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 1

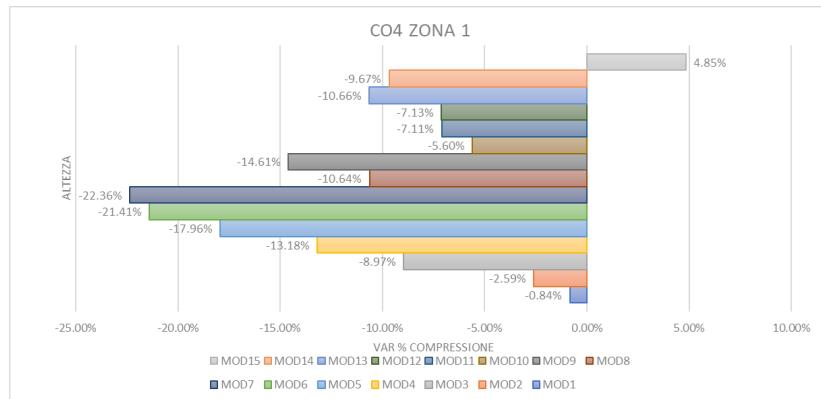


Figura 55: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 1

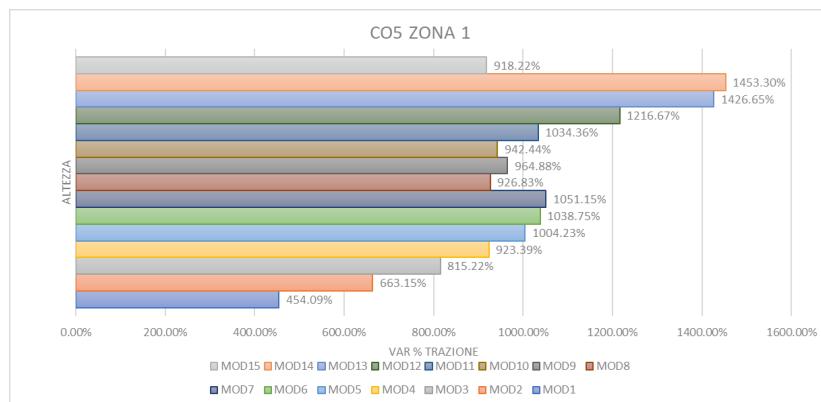


Figura 56: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 1

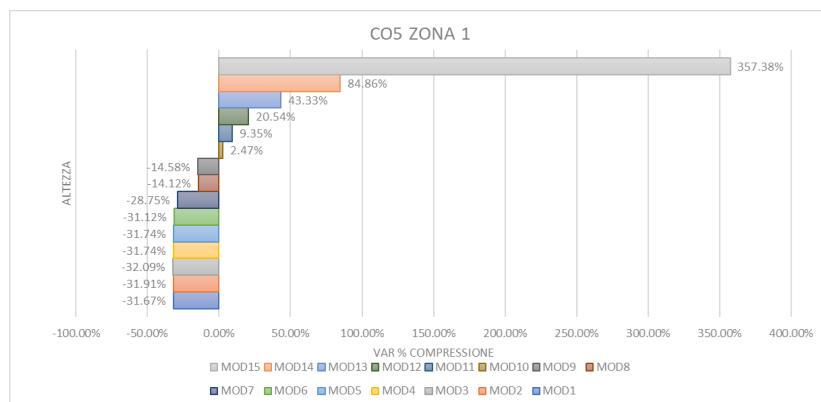


Figura 57: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 1

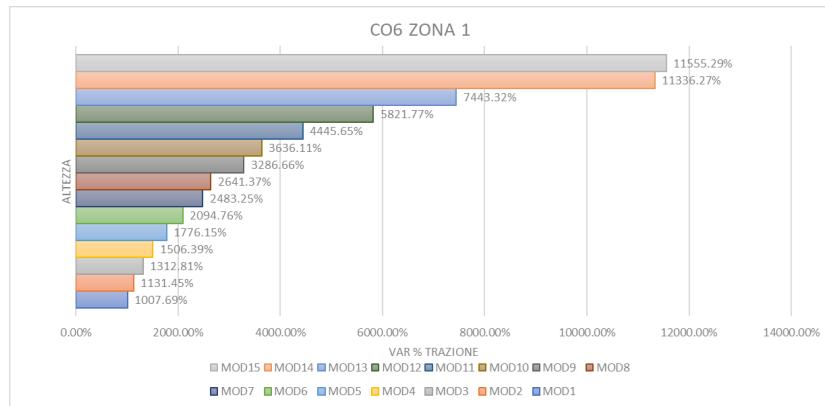


Figura 58: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 1

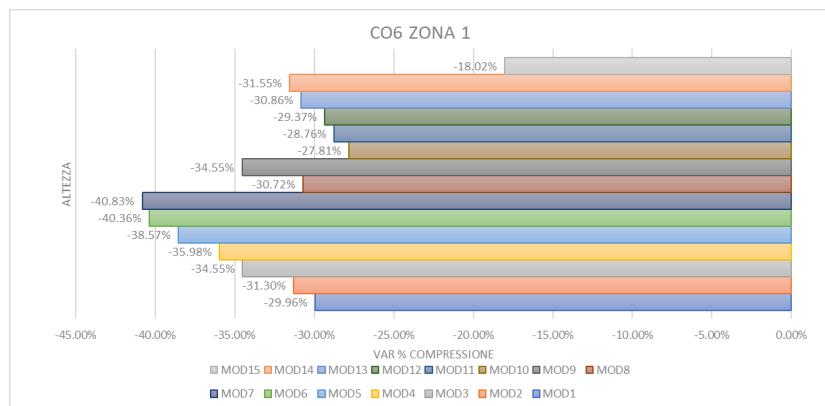


Figura 59: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 1

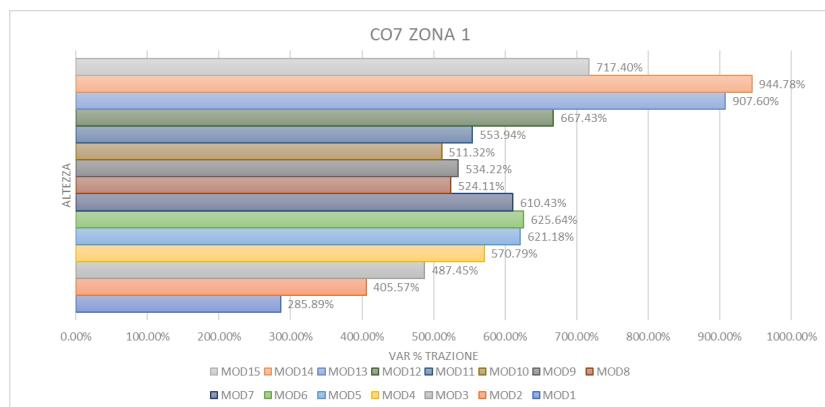


Figura 60: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 1

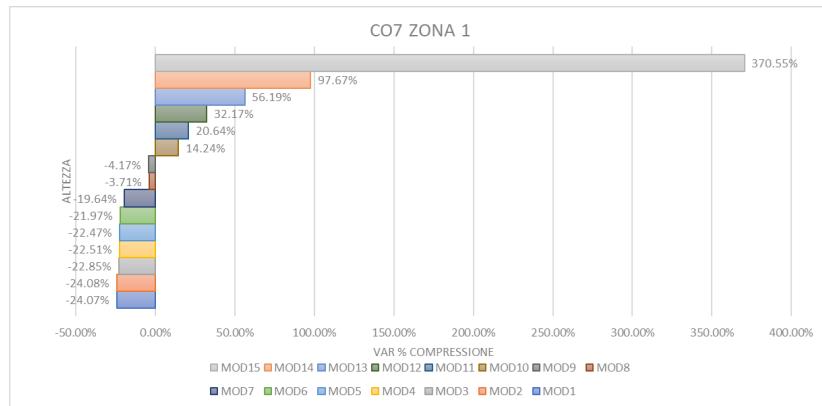


Figura 61: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 1

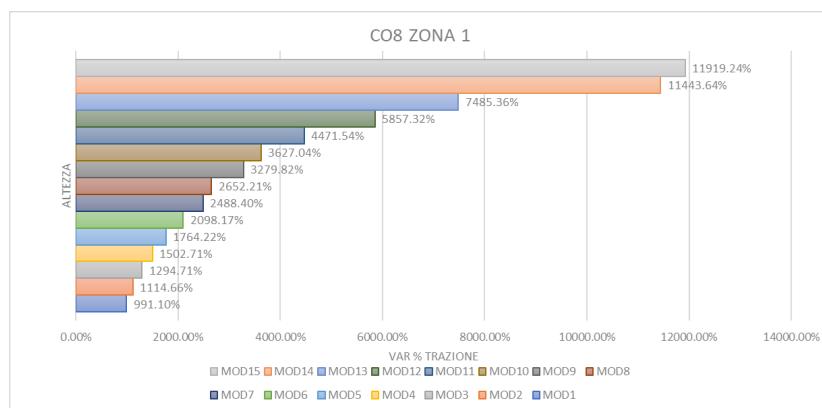


Figura 62: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 1

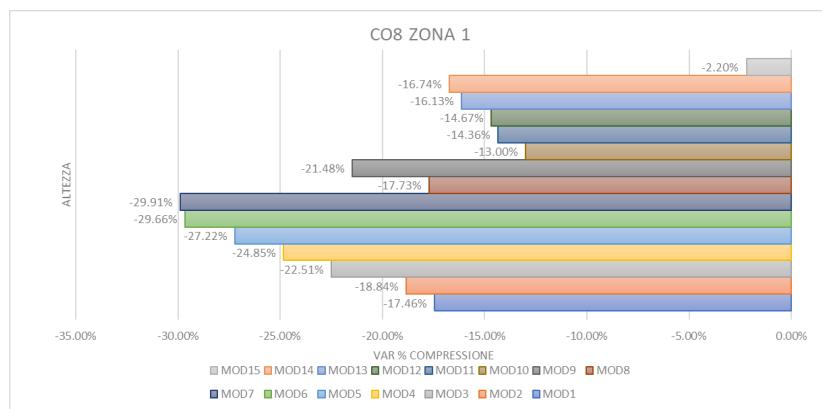


Figura 63: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 1

Come si può osservare dai grafici precedenti, le combinazioni di carico relative al carico termico estivo mostrano una variazione percentuale della compressione che segue un andamento parabolico crescente dalla base fino alla sommità della struttura (Fig. 53, Fig. 57, Fig. 61). Al contrario, la trazione presenta un andamento non uniforme lungo l'altezza dell'edificio. Questo

comportamento indica che il riscaldamento di due facciate della struttura induce una ridistribuzione della compressione lungo l'altezza, restituendo un andamento parabolico nel grafico. In particolare, i piani inferiori risultano meno compressi rispetto alla combinazione con soli carichi verticali; mentre i piani superiori, inizialmente poco compressi, subiscono un aumento significativo della compressione a seguito dell'applicazione del carico termico, soprattutto nei casi in cui l'azione termica prevale sui carichi variabili (CO5 e CO7). Per quanto riguarda la trazione, la cui intensità diminuisce con l'aumentare dell'altezza, la variazione percentuale rispetto alla combinazione con soli carichi verticali non risulta costante. I grafici mostrano come, nei casi in cui l'azione termica è predominante (Fig. 56 e Fig. 60), vi è una maggiore variazione nei moduli della zona centro-alta della struttura.

Per le combinazioni di carico termico invernale, si osserva invece un comportamento speculare rispetto a quello estivo. In particolare, la trazione mostra un incremento della variazione percentuale lungo l'altezza dell'edificio, con un andamento parabolico crescente dal basso verso l'alto (Fig. 54, Fig. 58, Fig. 62). La compressione, invece, presenta un andamento non costante, con una diminuzione della variazione percentuale maggiormente accentuata nei moduli della zona centro-bassa della struttura (Fig. 59, Fig. 63).

Dato l'andamento non lineare delle variazioni percentuali di trazione e compressione lungo l'altezza, come si può notare dalla Fig. 64 alla Fig. 77, è stato effettuato un confronto con i grafici relativi all'andamento delle sollecitazioni nelle singole combinazioni da cui è possibile notare una tendenza, crescente o decrescente, lineare. I restanti grafici relativi alle combinazioni di carico delle altre zone sono inseriti nell'Allegato A.

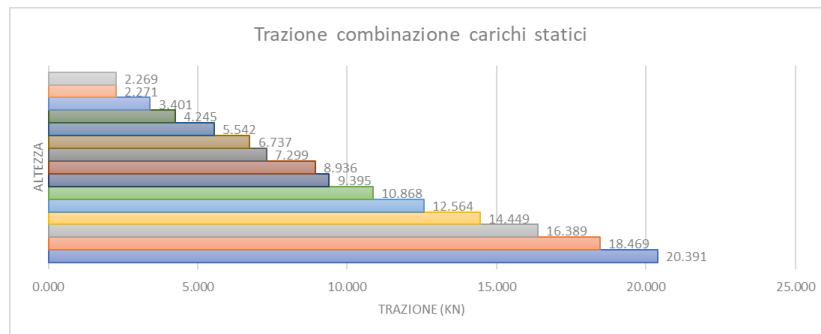


Figura 64: Andamento della trazione nella combinazione di carico con carichi statici CO2

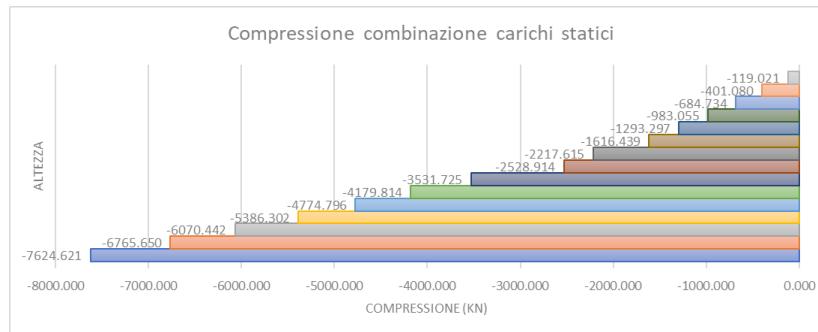


Figura 65: Andamento della compressione nella combinazione di carico con carichi statici CO2

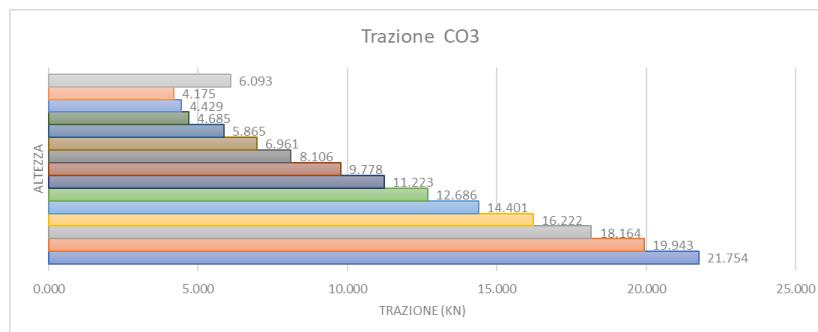


Figura 66: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 1

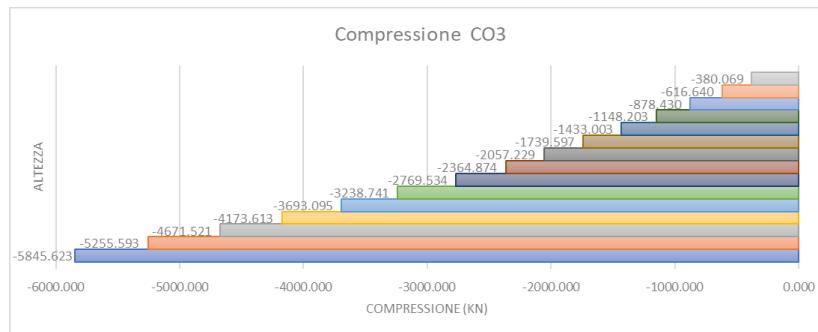


Figura 67: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 1

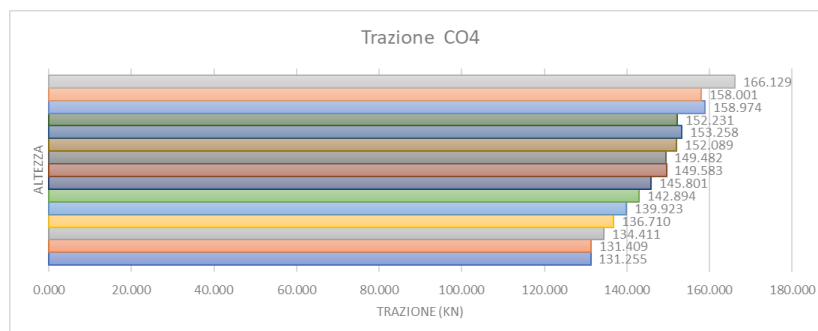


Figura 68: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 1

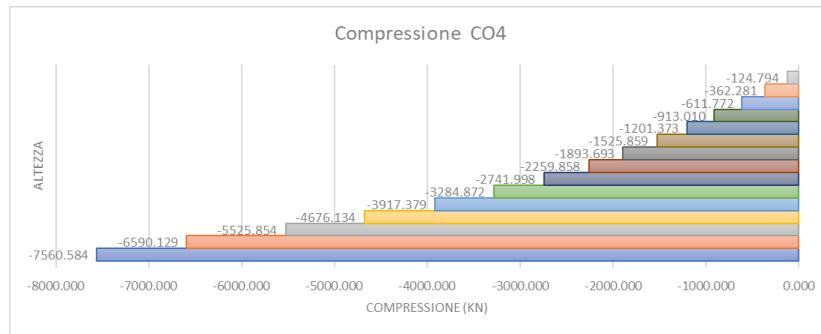


Figura 69: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 1

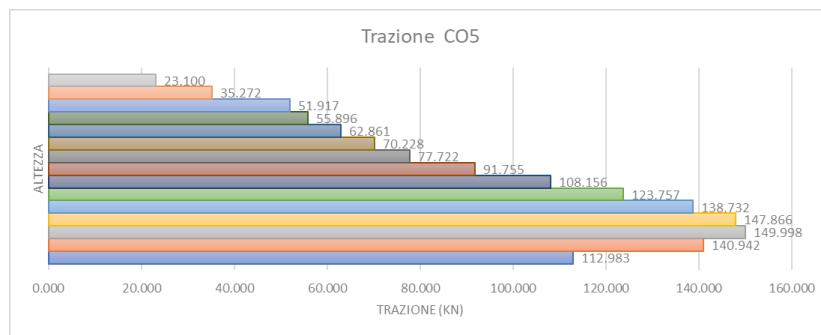


Figura 70: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 1

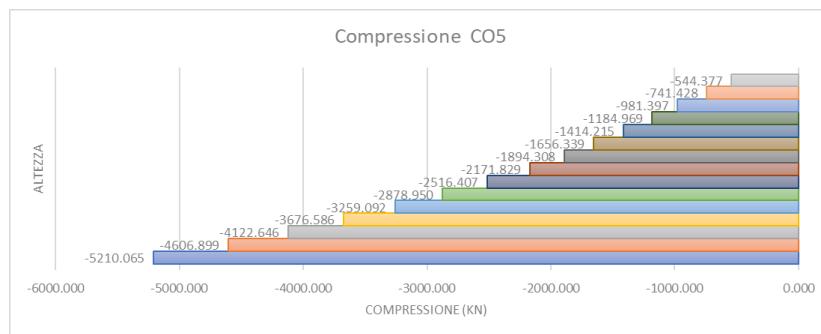


Figura 71: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 1

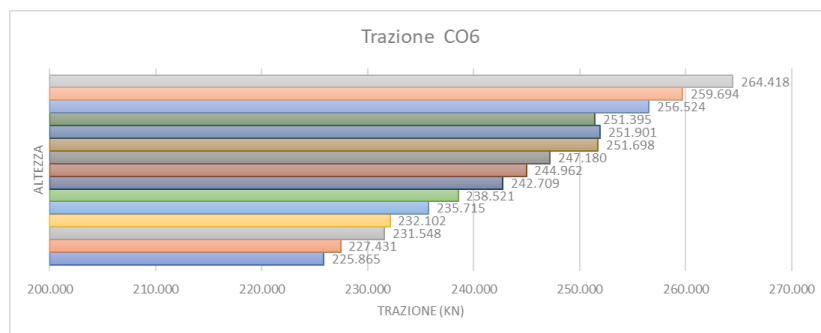


Figura 72: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 1

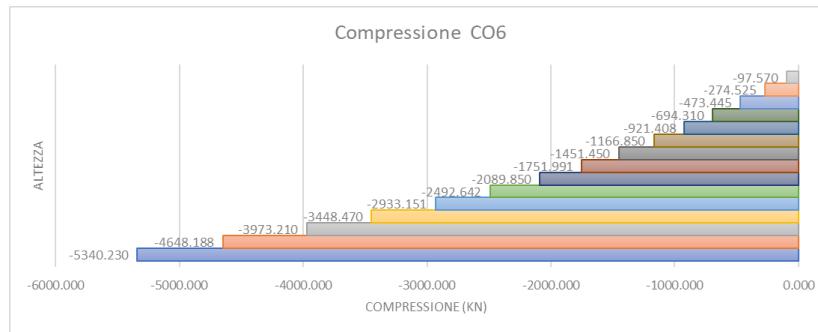


Figura 73: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 1

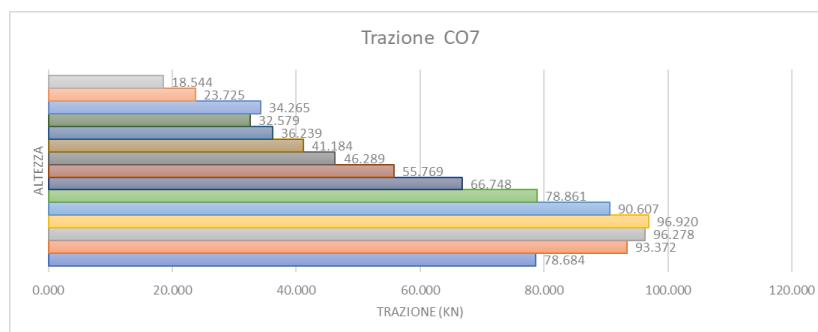


Figura 74: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 1

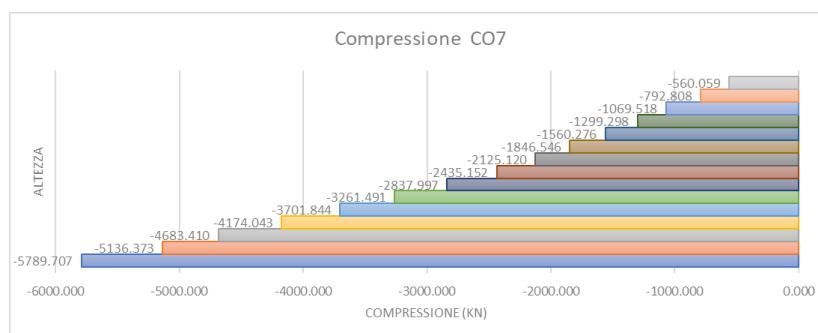


Figura 75: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 1

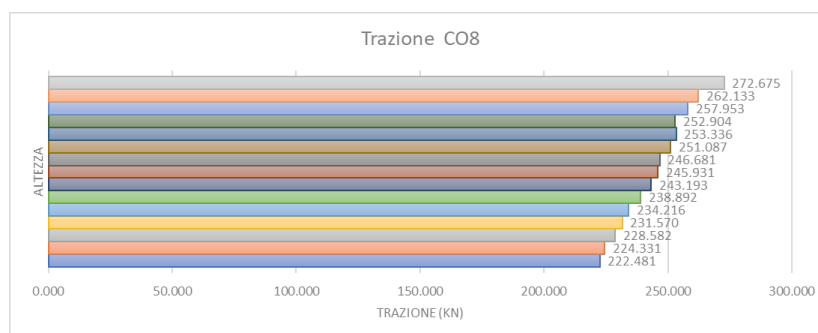


Figura 76: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 1

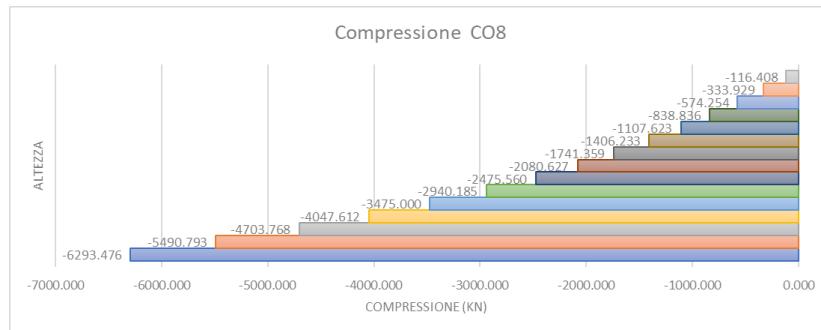


Figura 77: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 1

Un ulteriore risultato ottenuto è la verifica di resistenza degli elementi, la quale ha evidenziato la presenza di alcune travi, posizionate nella zona inferiore dell'edificio e collegate ai pilastri esterni, con un tasso di lavoro superiore ad 1 (Fig. 78).

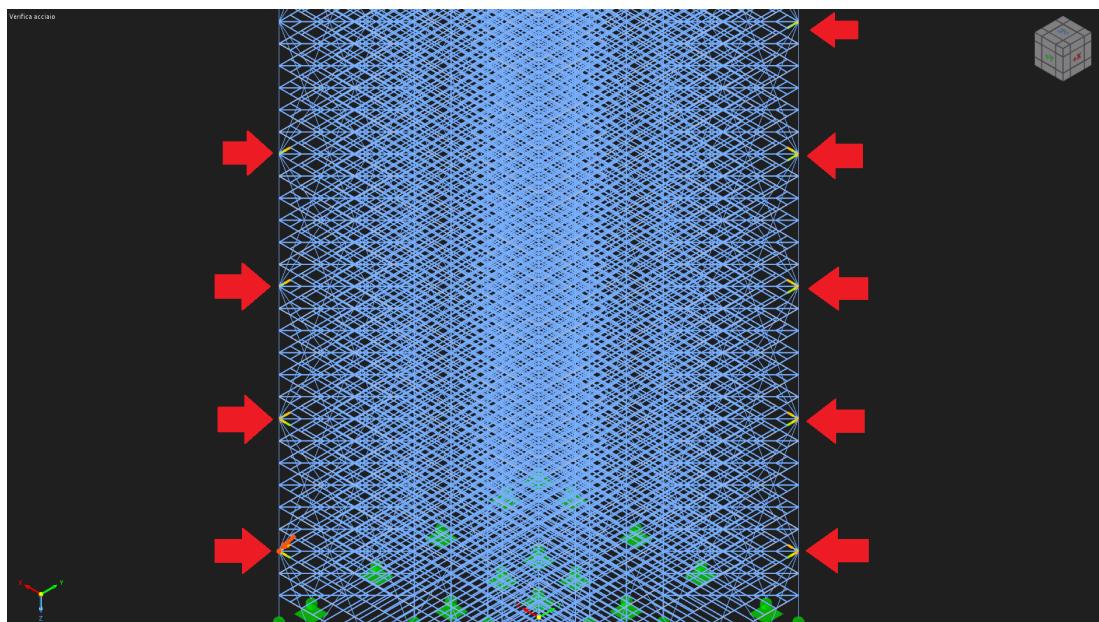


Figura 78: Aste con verifica di resistenza non soddisfatta

Le verifiche di resistenza non soddisfatte sono nello specifico: verifica a flessione biassiale, sforzo normale e taglio; verifica a flessione, forza assiale e taglio; verifica a trazione. Queste verifiche risultano insoddisfatte, con tassi di lavoro differenti, in quanto le travi presentano degli sforzi normali di trazione elevati nella maggior parte delle combinazioni di carico con presenza di carichi termici.

5 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo principale l'analisi delle conseguenze delle variazioni di temperatura su un grattacielo in acciaio con struttura diagrid. A tale scopo è stato utilizzato il software di calcolo strutturale RFEM6, con il quale sono state eseguite, in ordine, un'analisi modale del modello strutturale, per stimare i periodi propri di vibrazione, e una valutazione degli spostamenti massimi in testa dovuti all'azione del vento agente sulla struttura da confrontare con i valori riportati in letteratura. Successivamente è stato possibile modellare il comportamento termico del grattacielo e valutare l'impatto della variazione di temperatura sugli elementi in acciaio della struttura, considerando l'irraggiamento solare relativo al periodo estivo e al periodo invernale.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere una serie di risultati in termini di sollecitazioni sugli elementi significativi che sono stati confrontati con i valori ottenuti dalla combinazione con soli carichi statici tradizionalmente considerati in fase di progettazione. In particolare, i risultati ottenuti hanno evidenziato come il carico termico, relativo sia alla stagione estiva che a quella invernale, provochi sugli elementi in acciaio una notevole variazione di sollecitazioni di trazione e compressione, tale da determinare il superamento delle resistenze in alcuni elementi nella zona inferiore della struttura.

Alla luce degli incrementi tensionali evidenziati dalle analisi numeriche, si evince che gli effetti delle variazioni termiche sulle strutture in acciaio non possono essere sottovalutati nella progettazione. Successivi approfondimenti potrebbero focalizzarsi sull'analisi strutturale in condizioni di carico meno comuni, ma potenzialmente rilevanti alla luce dei cambiamenti climatici in atto, come ad esempio la combinazione di azioni termiche e vento.

Riferimenti bibliografici

- [1] *ASCE 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, 2017.
- [2] *Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture - Parte 1-4: Azioni generali - Azioni del vento*. UNI EN 1991-1-4, 2004.
- [3] F.M. Mazzolani G. Ballio. *Strutture in acciaio*. Hoepli, 2020.
- [4] S. Labò et al. “Esoscheletri tipo diagrid per la riqualificazione degli edifici esistenti in ottica ciclo di vita”. In: *Costruzioni metalliche* (sett.-ott. 2019).
- [5] *Manuali online RFEM 6*. 2024. URL: <https://www.dlubal.com/it/download-e-info/documentazione/manuali-online/rfem-6>.
- [6] E. Mele. “Ruolo dell'acciaio ed esigenze di ricerca nelle grandi architetture”. In: *Costruzioni metalliche* (sett.-ott. 2010).
- [7] E. Mele et al. “An overview on diagrid structures for tall buildings”. In: (2014).
- [8] E. Mele et al. “Hexagrid-Voronoi transition in structural patterns for tall buildings”. In: (2019).
- [9] Elena Mele. *Efficienza e ottimizzazione nella progettazione strutturale di edifici alti*. Seminario. Presentato presso Università degli studi della Basilicata, Potenza, 28 gennaio. 2022.
- [10] G.M. Montuori et al. “Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view”. In: (2014).
- [11] G.M. Montuori et al. “Secondary bracing systems for diagrid structures in tall buildings”. In: (2014).
- [12] *Norme Tecniche per le costruzioni*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018.
- [13] Felice Carlo Ponzo. *Il Materiale Acciaio*. Slide del Corso di Costruzioni in Acciaio e Legno, Università degli Studi della Basilicata. 2022.

Allegato A

Si riportano di seguito i risultati numerici e i grafici relativi alle zone di irraggiamento e alle combinazioni di carico.

Zona 1

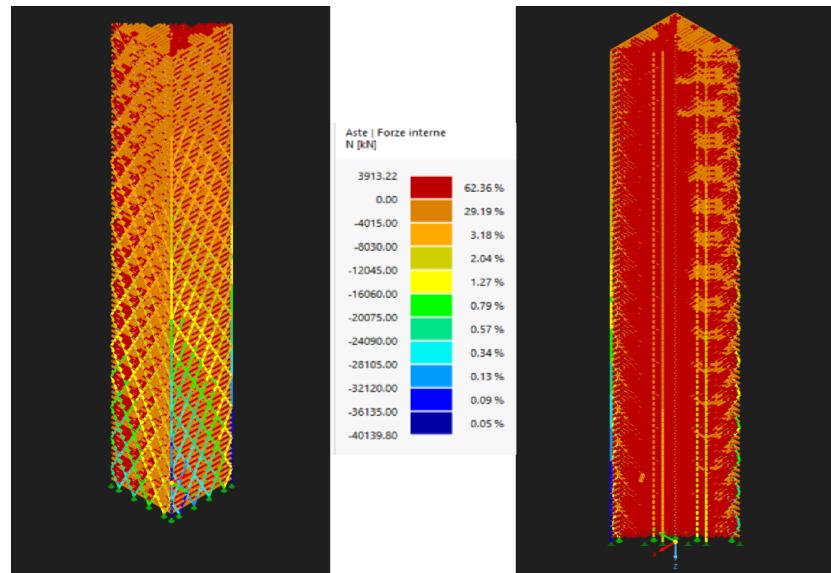


Figura 79: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 1 Grandi Spostamenti

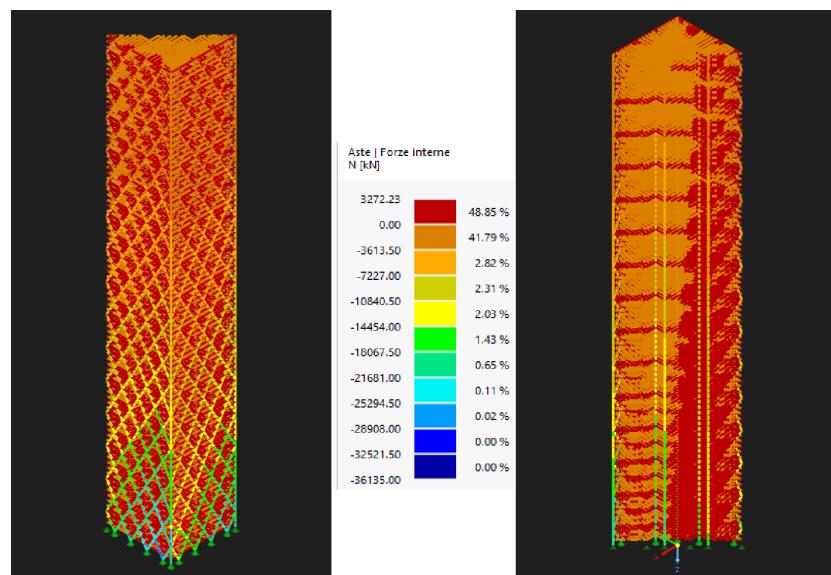


Figura 80: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 1 Grandi Spostamenti

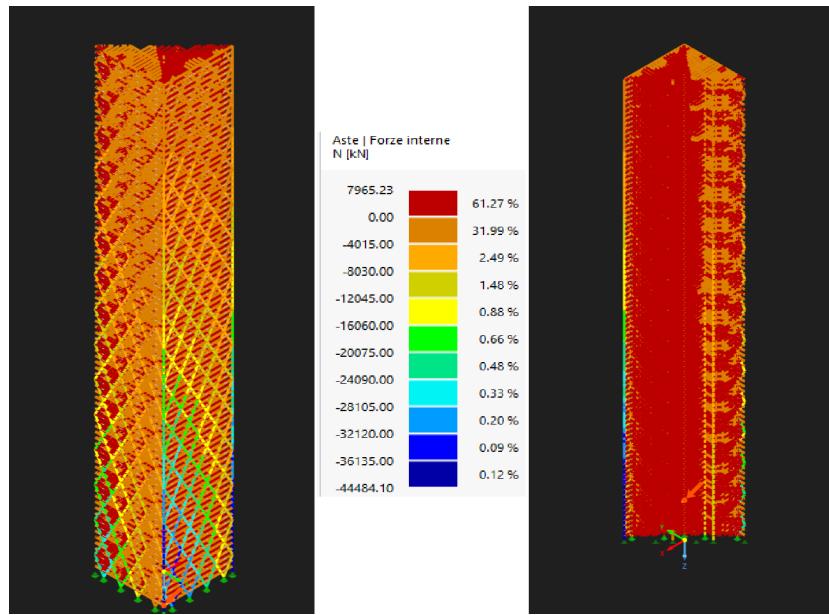


Figura 81: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 1 Grandi Spostamenti

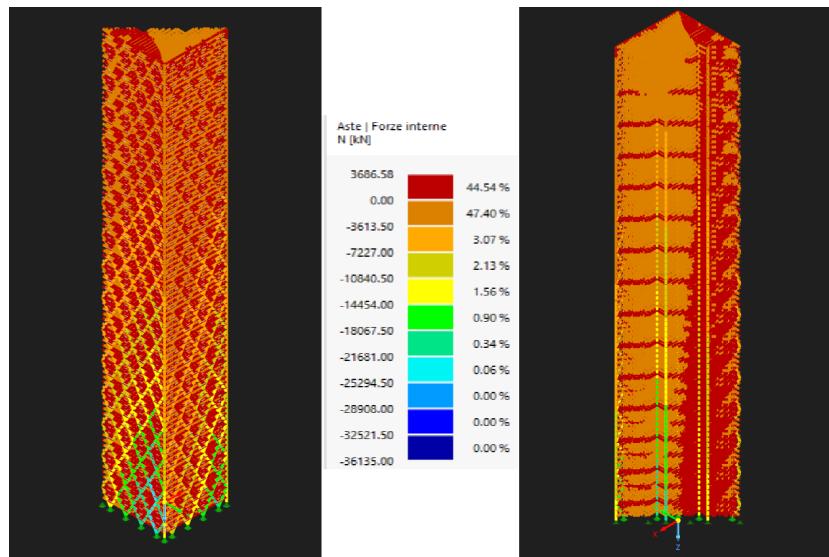


Figura 82: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 1 Grandi Spostamenti

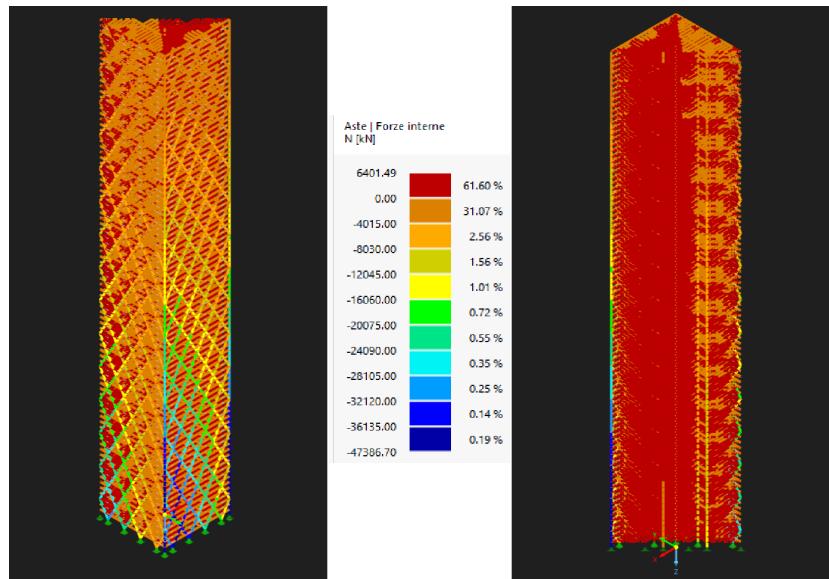


Figura 83: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 1 Grandi Spostamenti

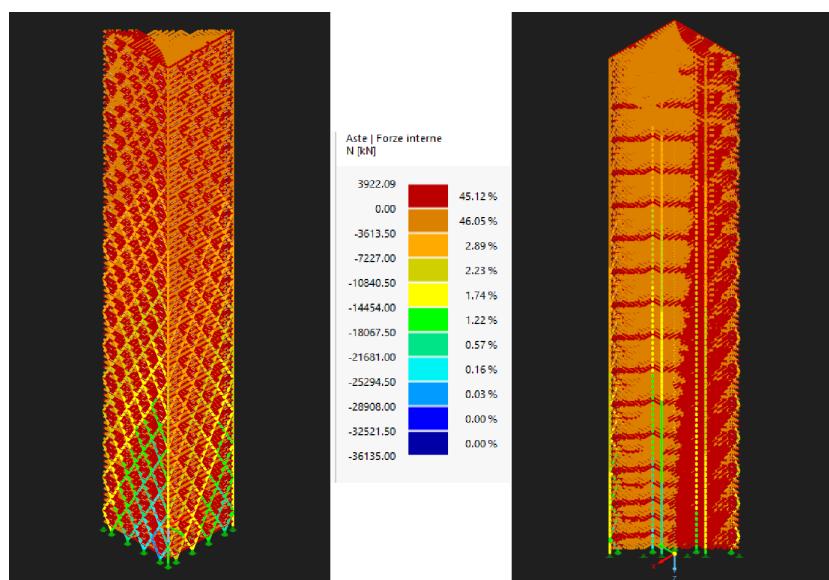


Figura 84: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 1 Grandi Spostamenti

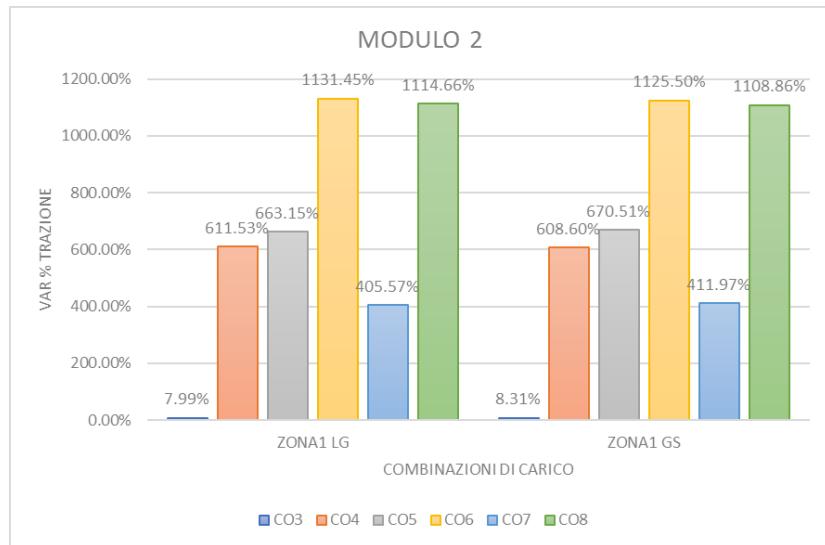


Figura 85: Variazione % trazione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 1

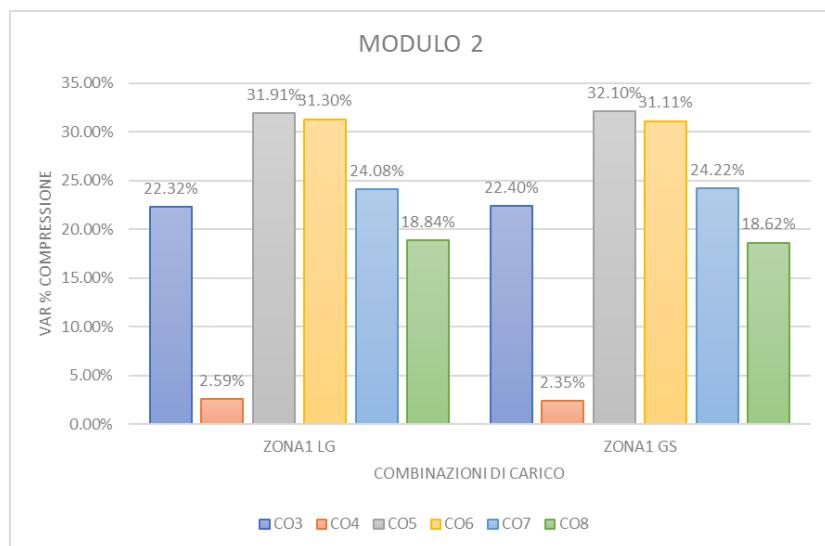


Figura 86: Variazione % compressione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 1

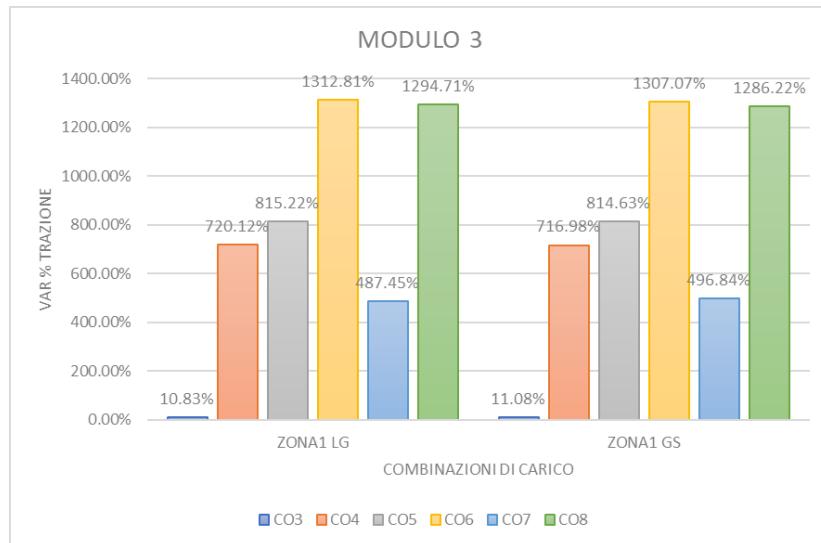


Figura 87: Variazione % trazione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, 16.389 kN; Zona 1

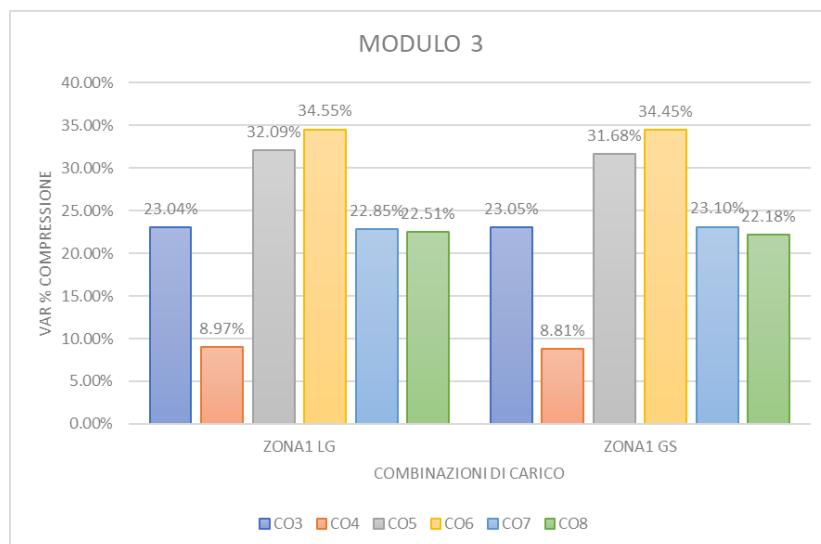


Figura 88: Variazione % compressione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, -6070.442 kN; Zona 1

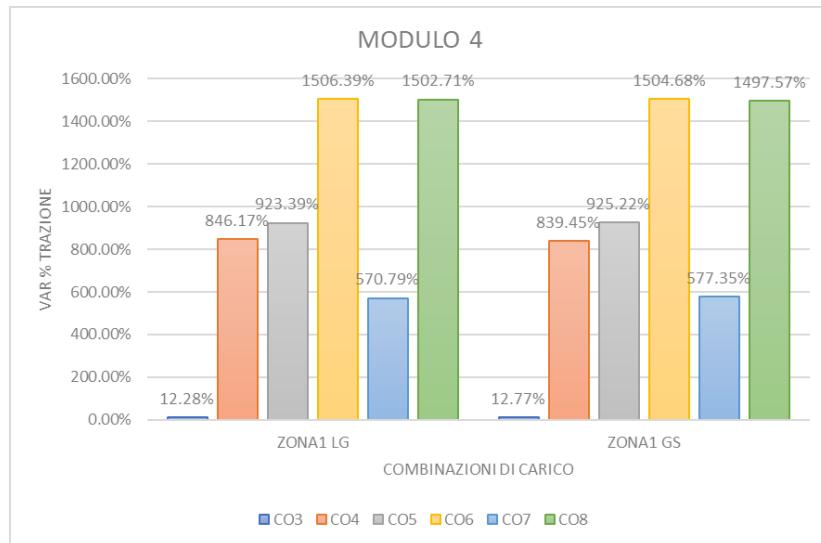


Figura 89: Variazione % trazione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, 14.449 kN; Zona 1

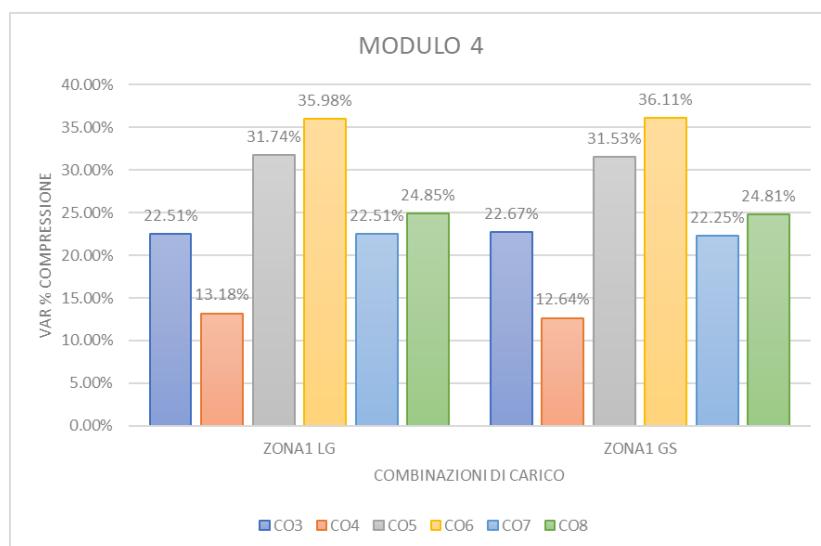


Figura 90: Variazione % compressione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, -5386.302 kN; Zona 1

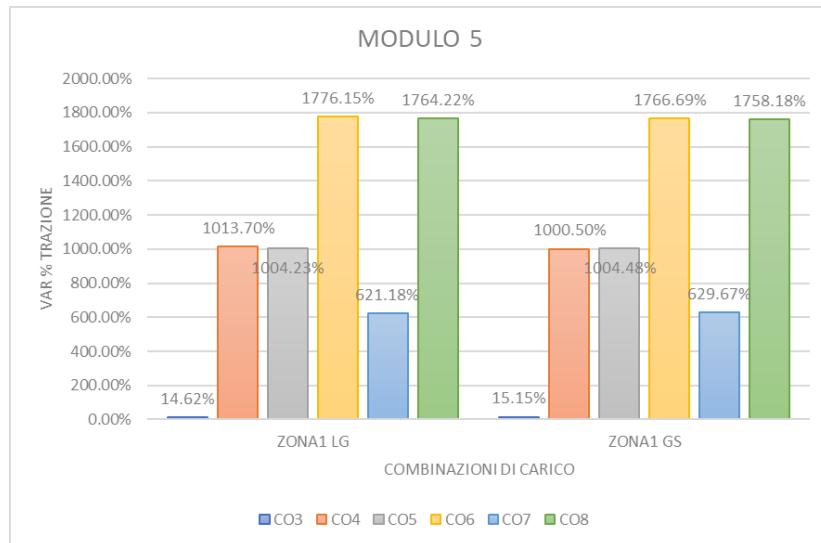


Figura 91: Variazione % trazione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, 12.564 kN; Zona 1

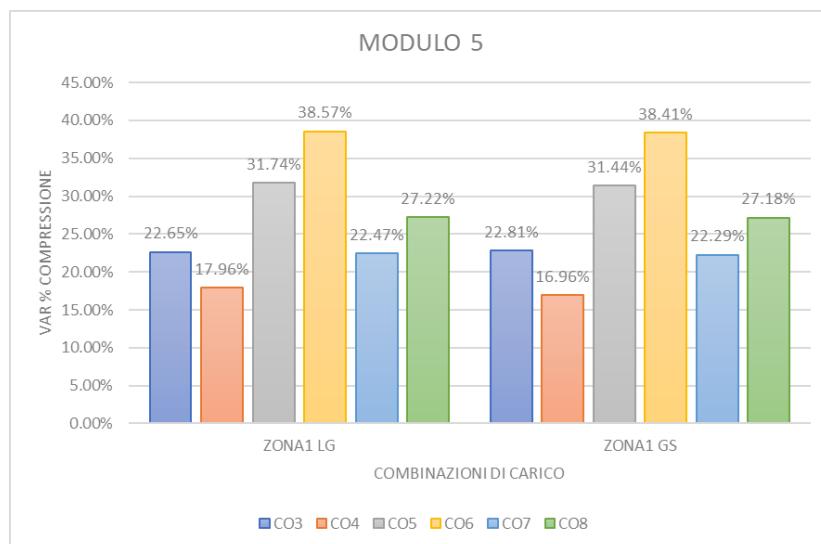


Figura 92: Variazione % compressione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, -4774.796 kN; Zona 1

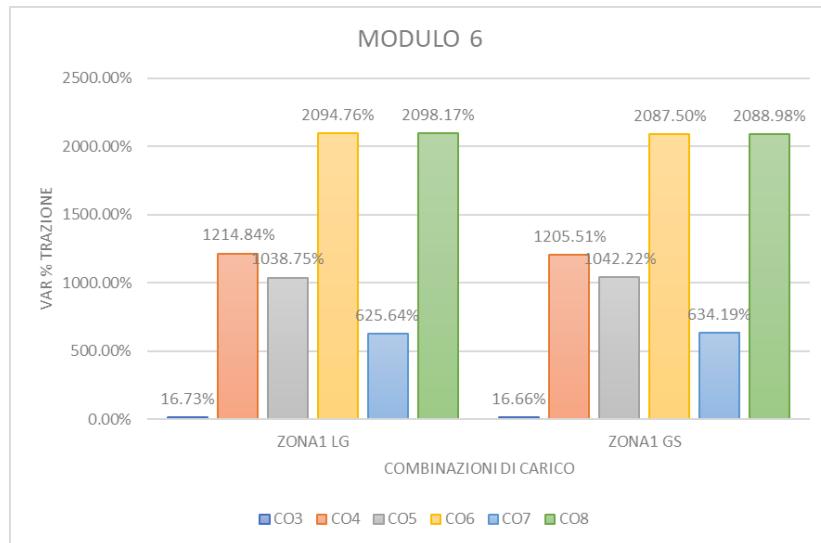


Figura 93: Variazione % trazione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, 10.868 kN; Zona 1

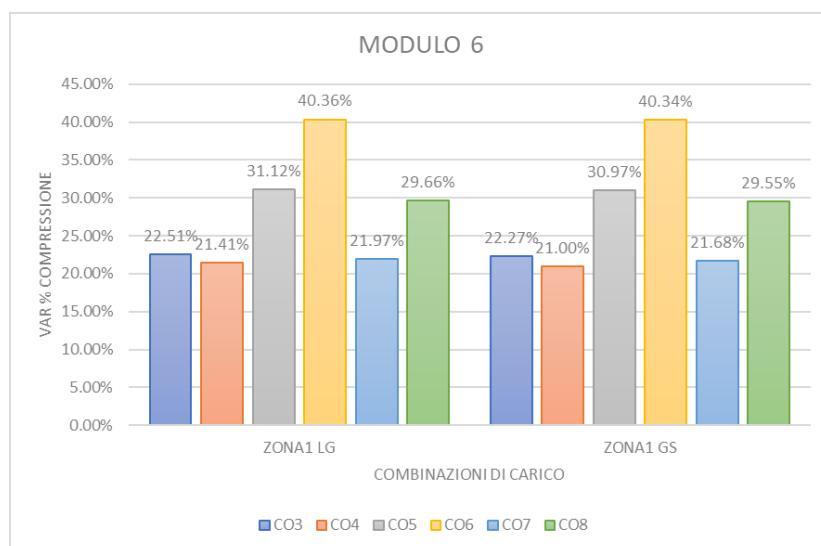


Figura 94: Variazione % compressione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, -4179.814 kN; Zona 1

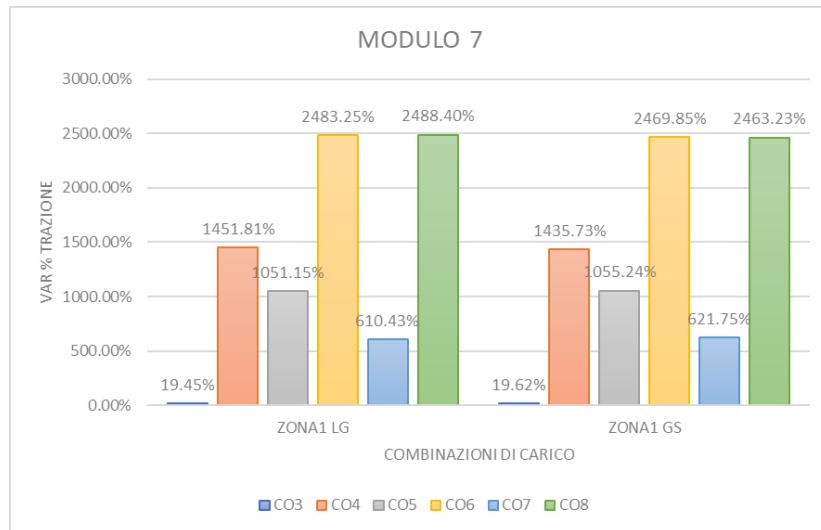


Figura 95: Variazione % trazione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, 9.395 kN; Zona 1

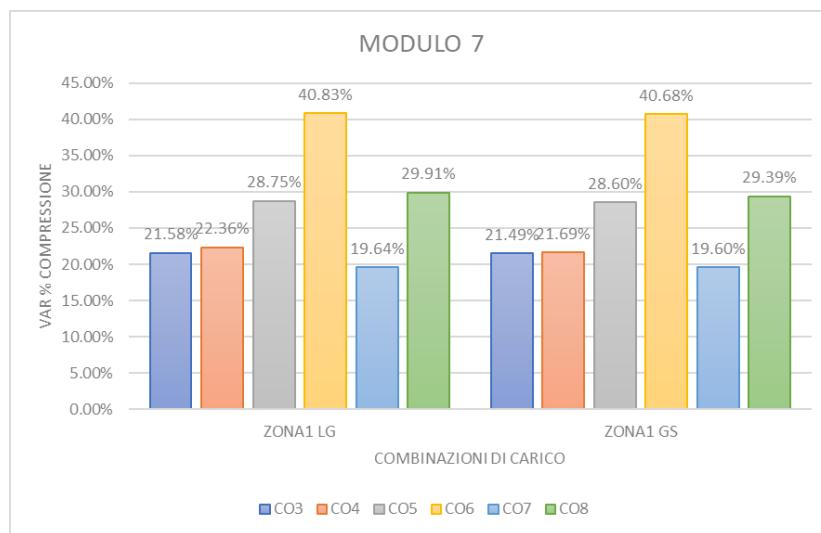


Figura 96: Variazione % compressione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, -3531.725 kN; Zona 1

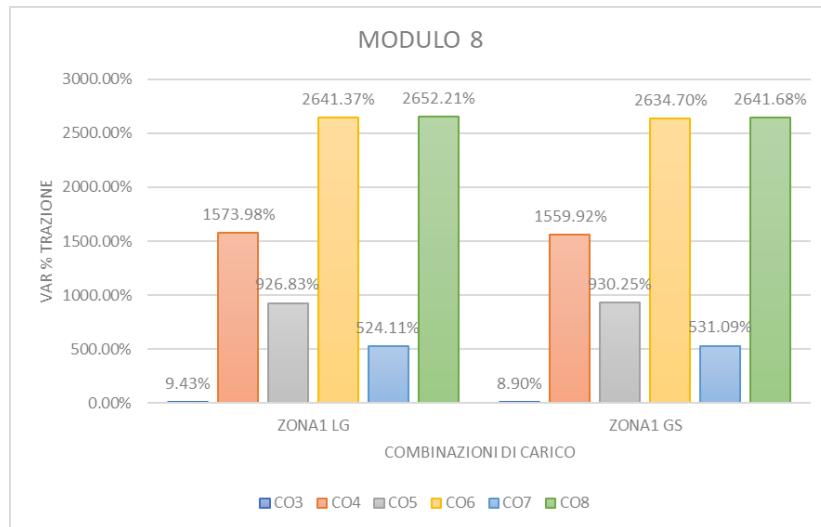


Figura 97: Variazione % trazione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, 8.936 kN; Zona 1

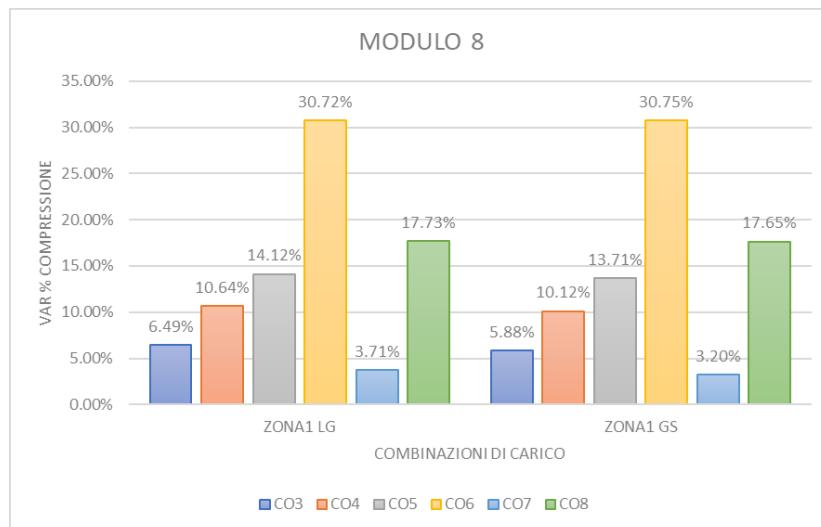


Figura 98: Variazione % compressione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, -2528.914 kN; Zona 1

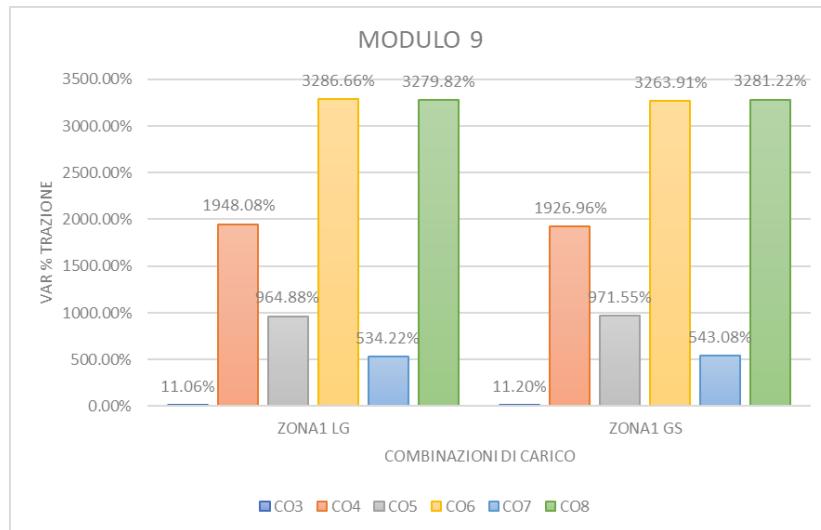


Figura 99: Variazione % trazione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, 7.299 kN; Zona 1

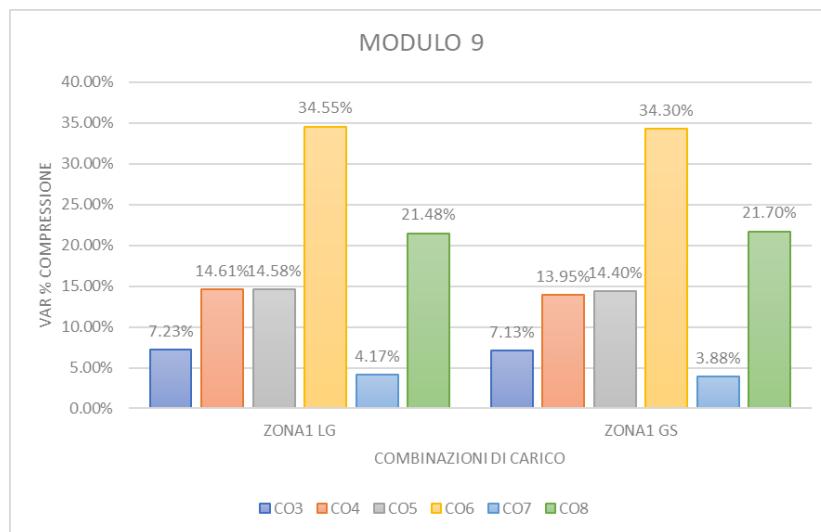


Figura 100: Variazione % compressione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, -2217.615 kN; Zona 1

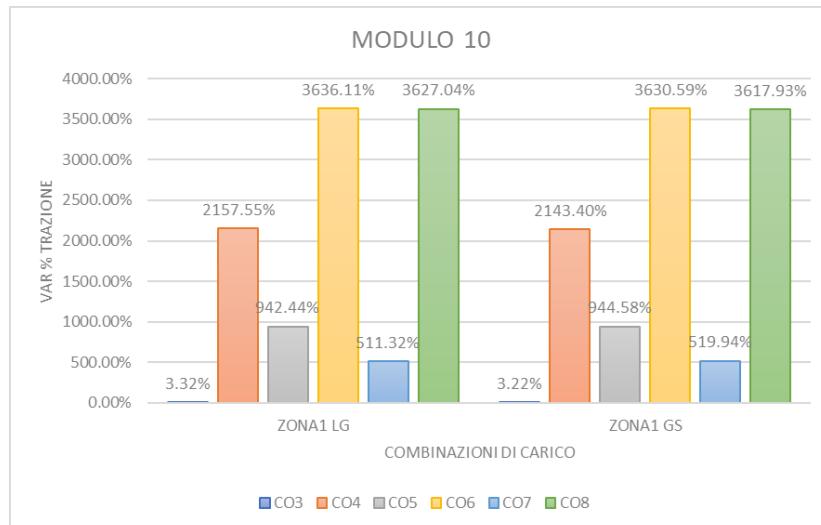


Figura 101: Variazione % trazione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, 6.737 kN; Zona 1

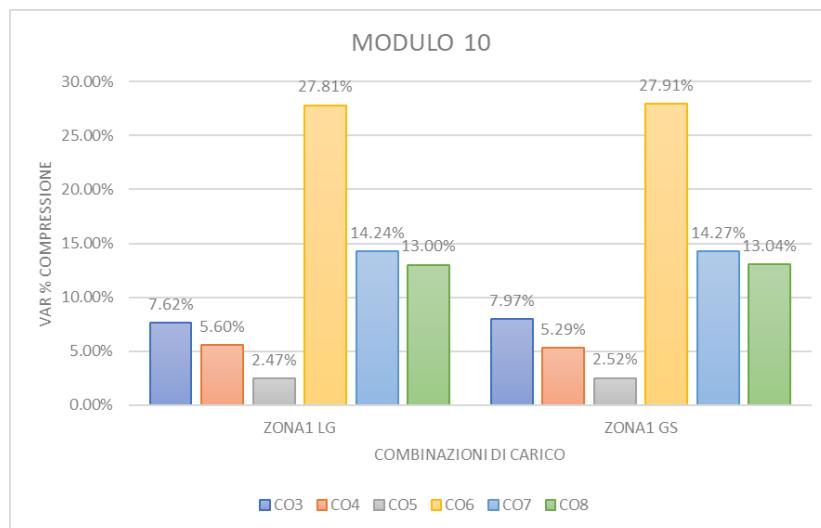


Figura 102: Variazione % compressione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, -1616.439 kN; Zona 1

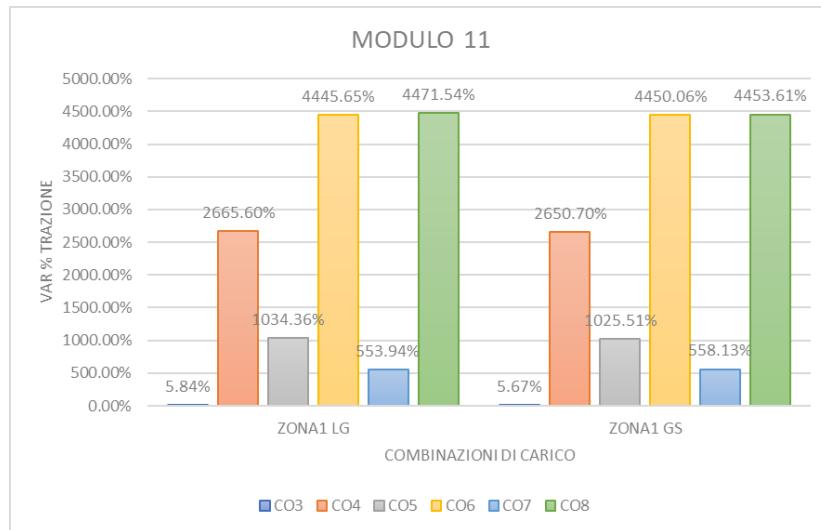


Figura 103: Variazione % trazione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, 5.542 kN; Zona 1

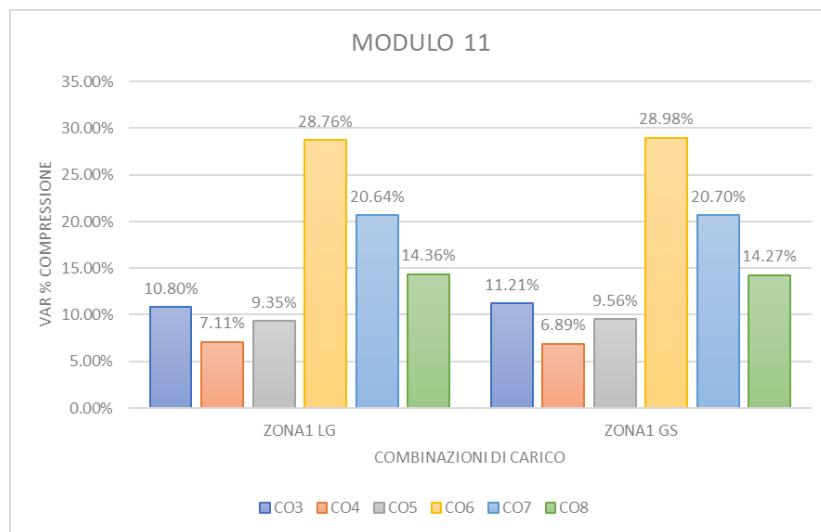


Figura 104: Variazione % compressione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, -1293.297 kN; Zona 1

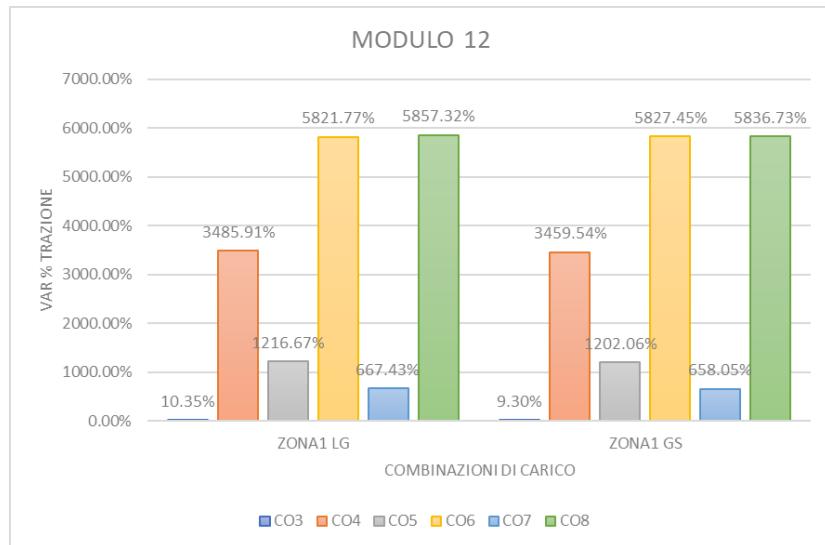


Figura 105: Variazione % trazione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, 4.245 kN; Zona 1

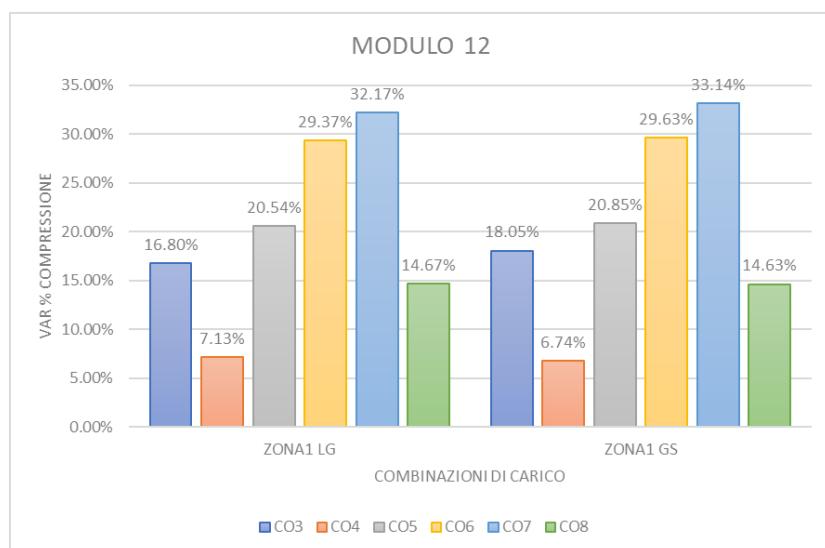


Figura 106: Variazione % compressione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, -983.055 kN; Zona 1

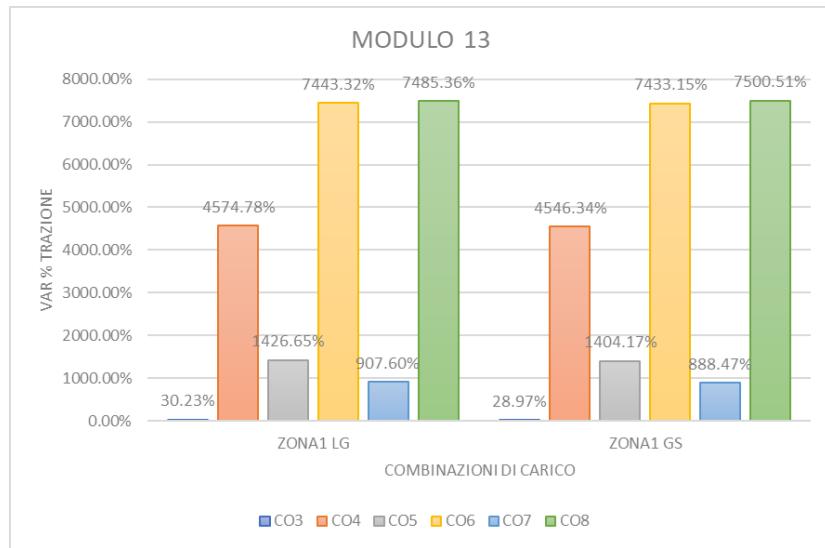


Figura 107: Variazione % trazione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, 3.401 kN; Zona 1

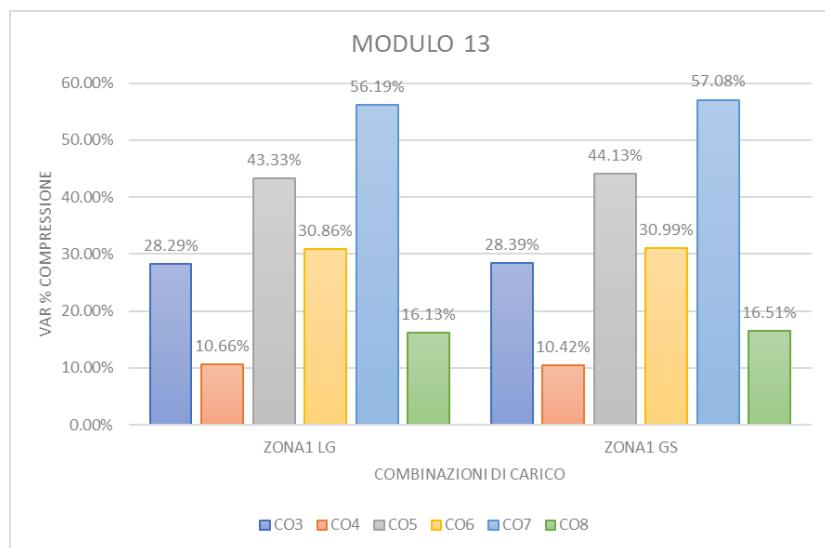


Figura 108: Variazione % compressione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, -684.734 kN; Zona 1

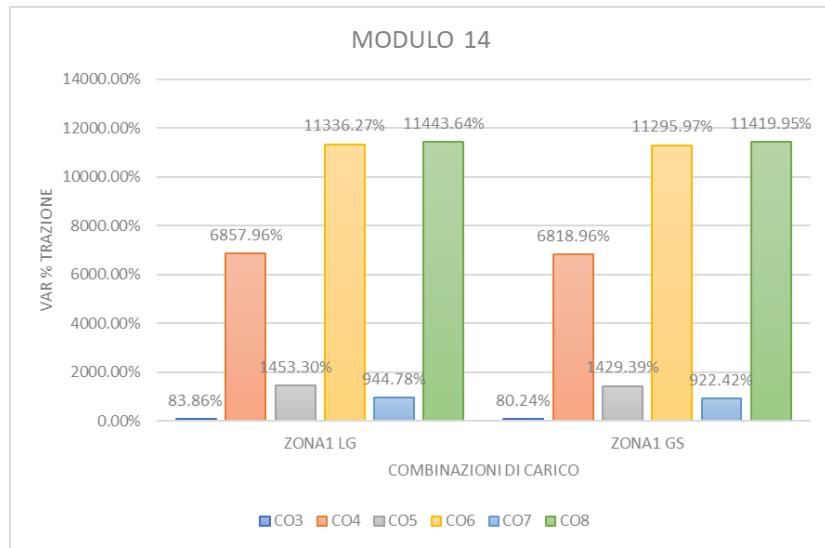


Figura 109: Variazione % trazione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, 2.271 kN; Zona 1

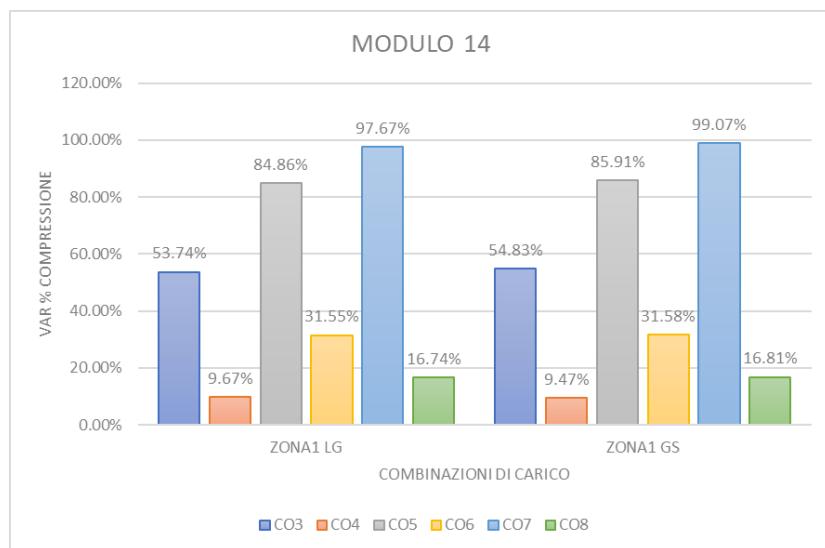


Figura 110: Variazione % compressione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, -401.080 kN; Zona 1

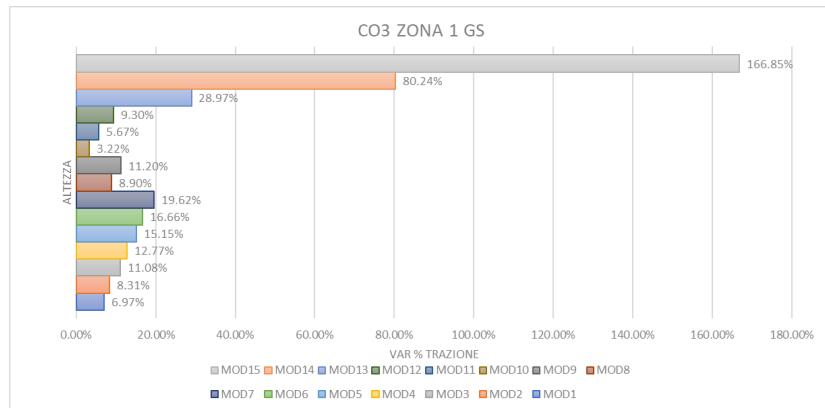


Figura 111: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 1 grandi spostamenti

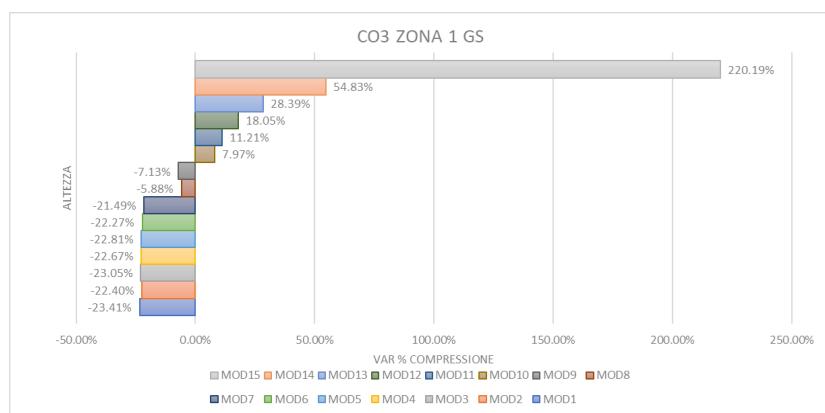


Figura 112: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 1 grandi spostamenti

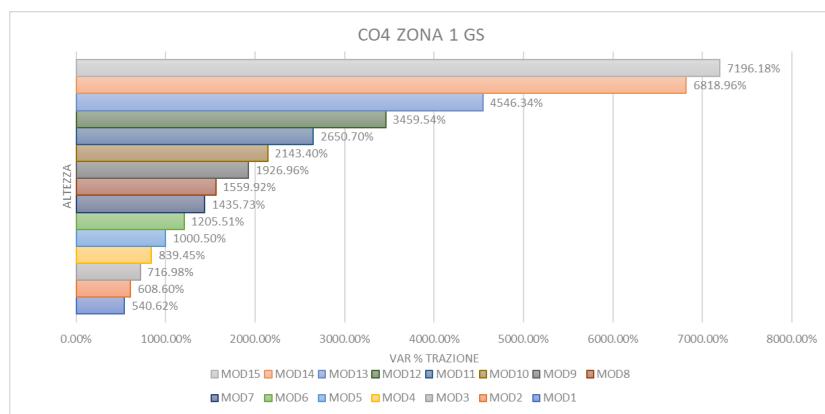


Figura 113: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 1 grandi spostamenti

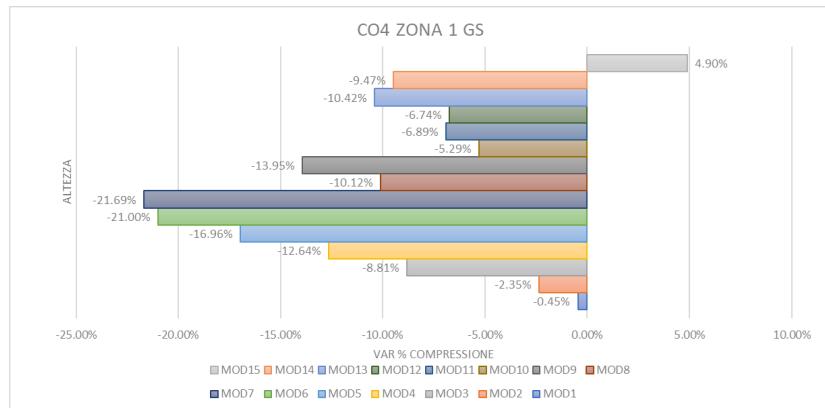


Figura 114: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 1 grandi spostamenti

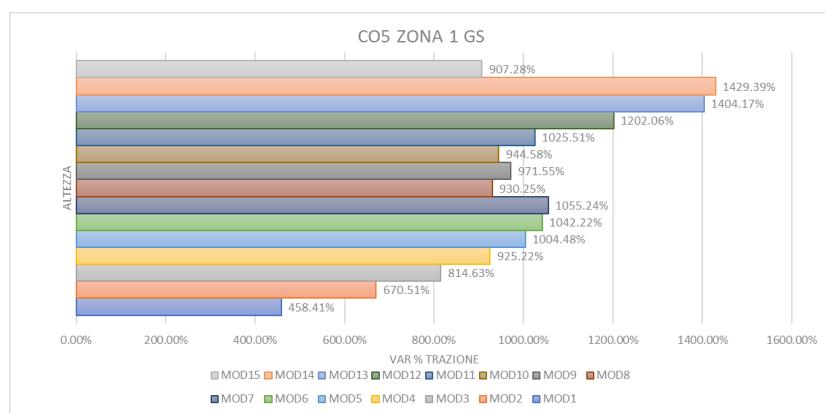


Figura 115: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 1 grandi spostamenti

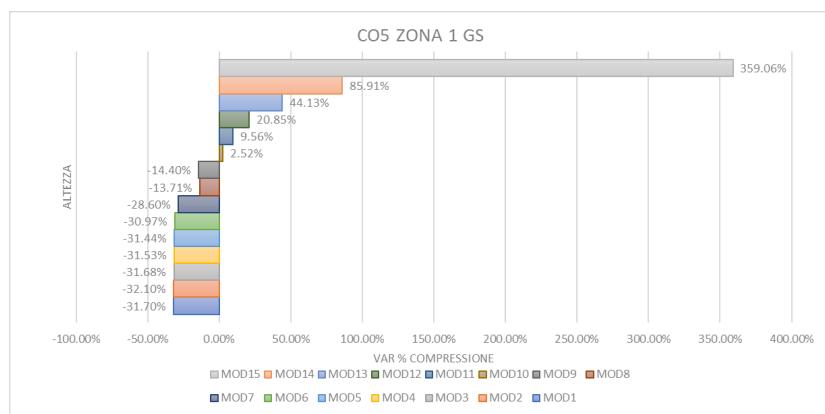


Figura 116: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 1 grandi spostamenti

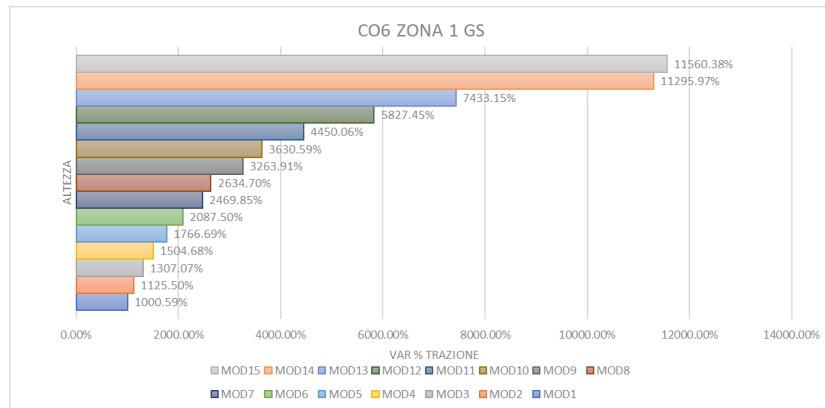


Figura 117: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 1 grandi spostamenti

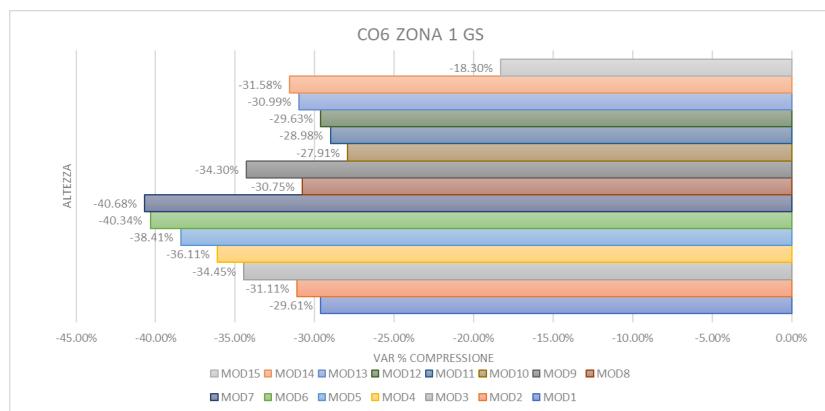


Figura 118: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 1 grandi spostamenti

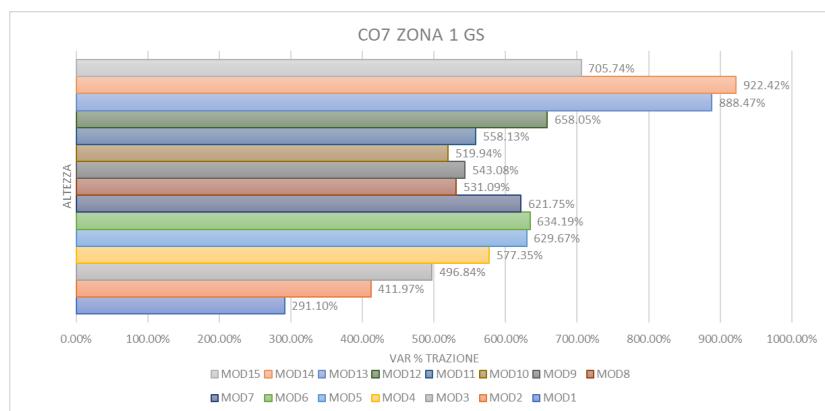


Figura 119: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 1 grandi spostamenti

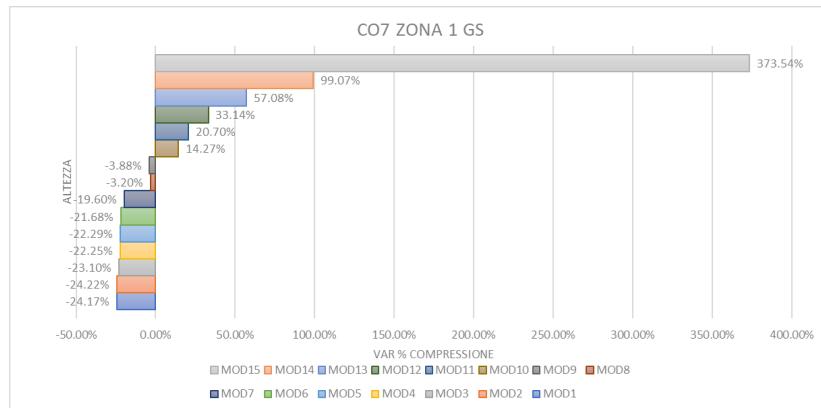


Figura 120: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 1 grandi spostamenti

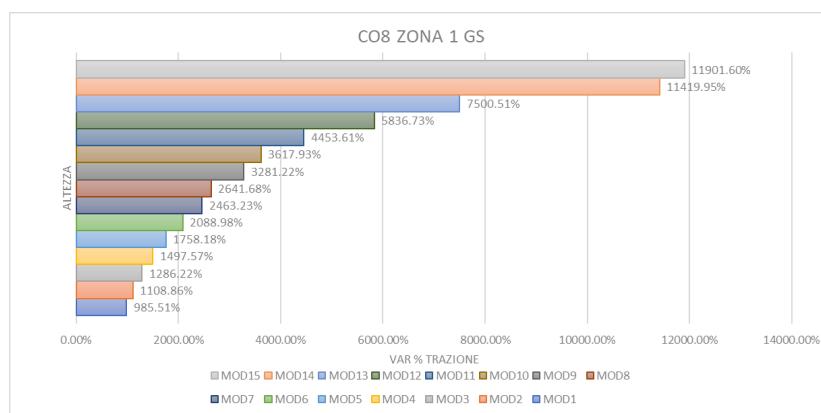


Figura 121: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 1 grandi spostamenti

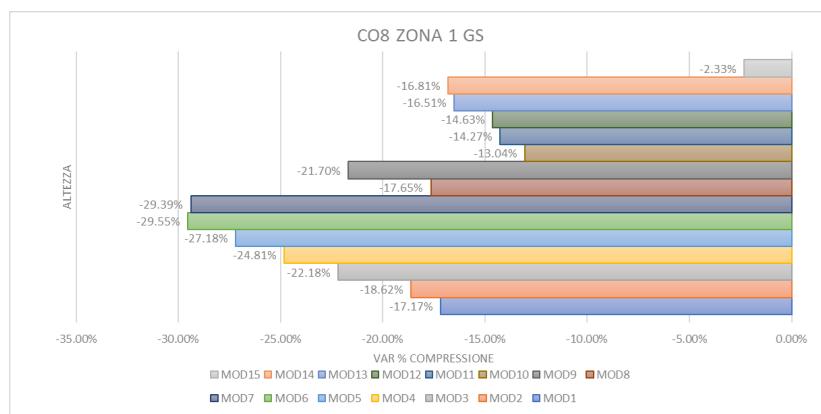


Figura 122: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 1 grandi spostamenti

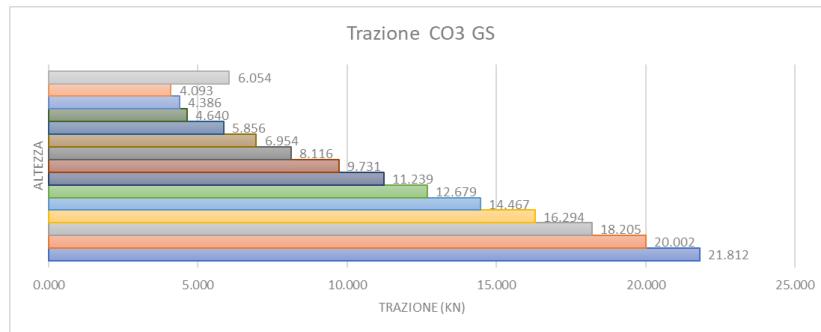


Figura 123: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 1 grandi spostamenti

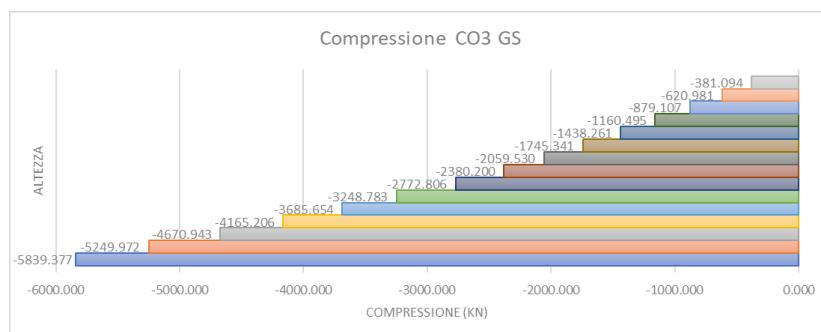


Figura 124: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 1 grandi spostamenti

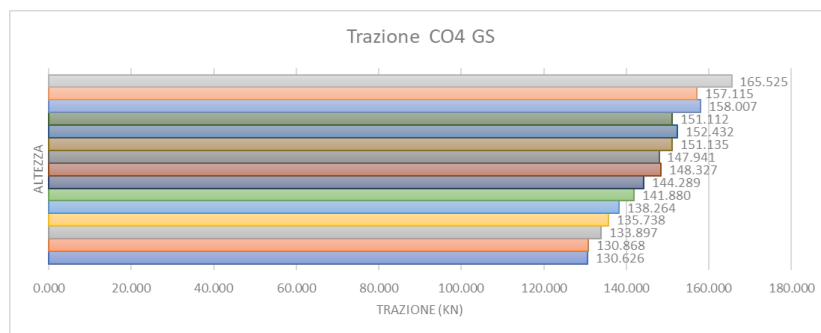


Figura 125: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 1 grandi spostamenti

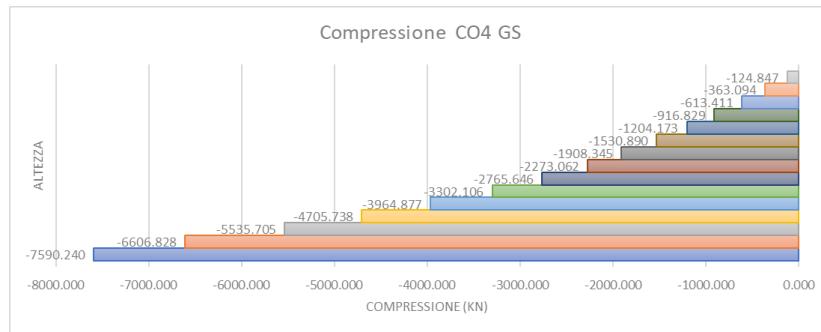


Figura 126: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 1 grandi spostamenti

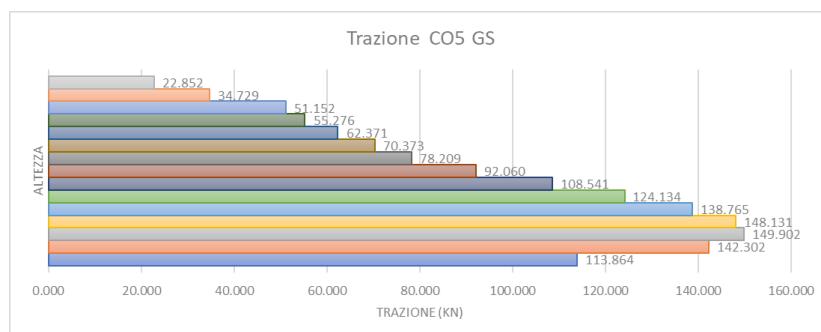


Figura 127: Andamento della trazione nella combinazione di carico C05, Zona 1 grandi spostamenti

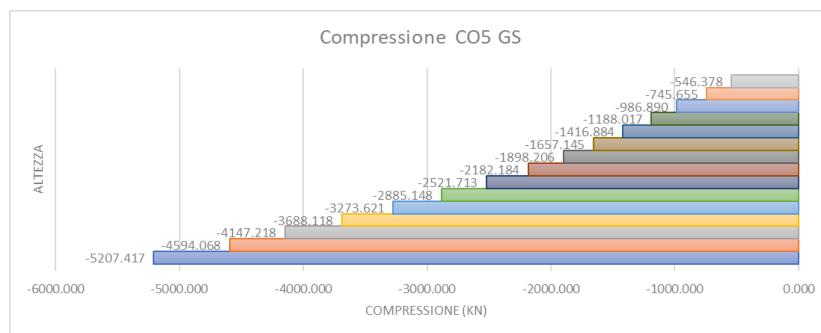


Figura 128: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 1 grandi spostamenti

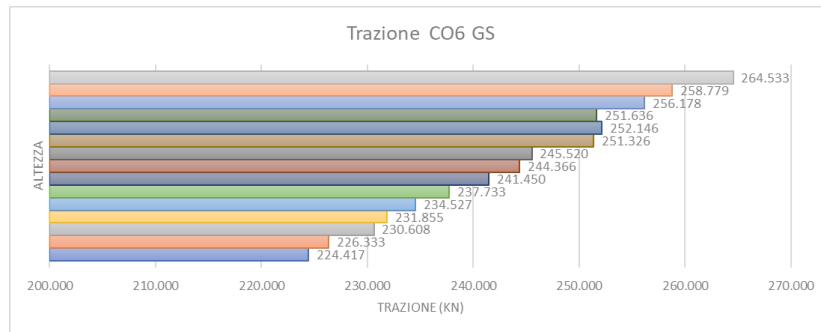


Figura 129: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 1 grandi spostamenti

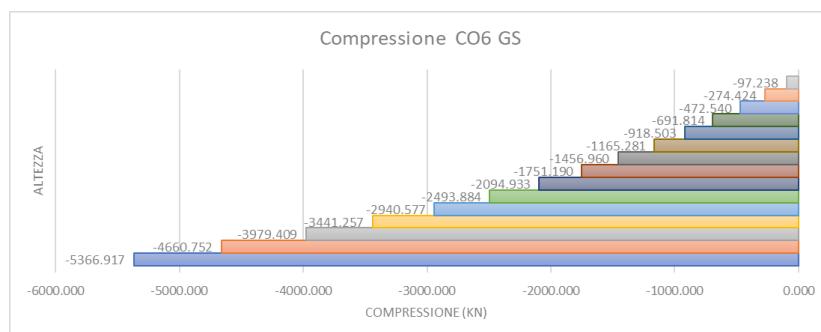


Figura 130: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 1 grandi spostamenti

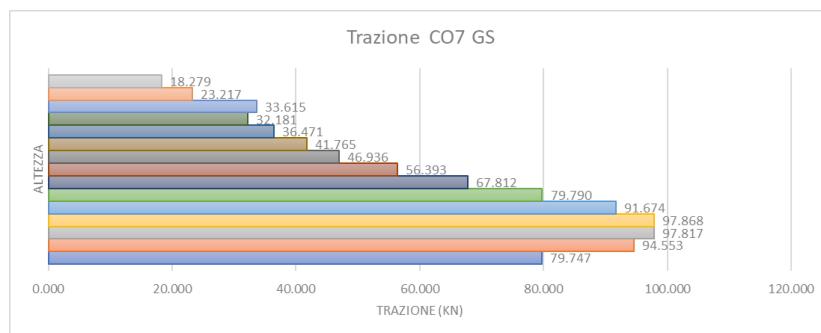


Figura 131: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 1 grandi spostamenti

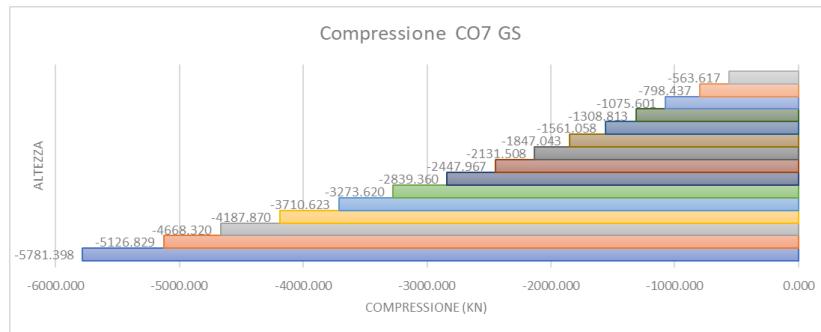


Figura 132: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 1 grandi spostamenti

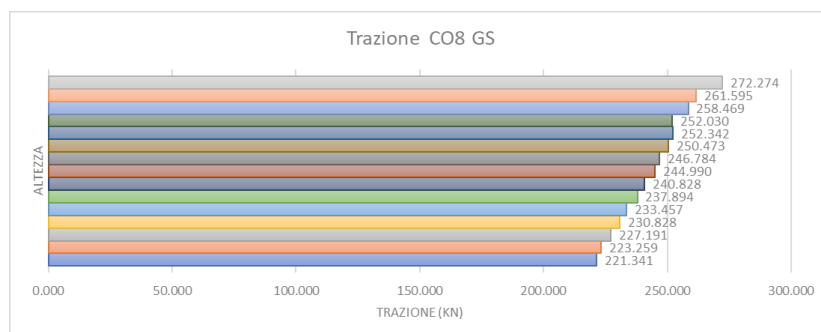


Figura 133: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 1 grandi spostamenti

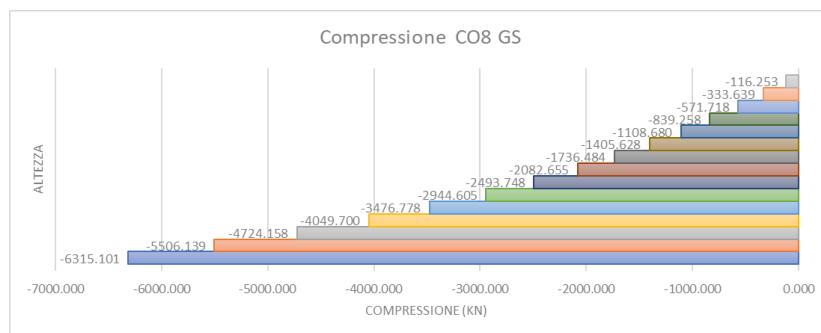


Figura 134: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 1 grandi spostamenti

Zona 2

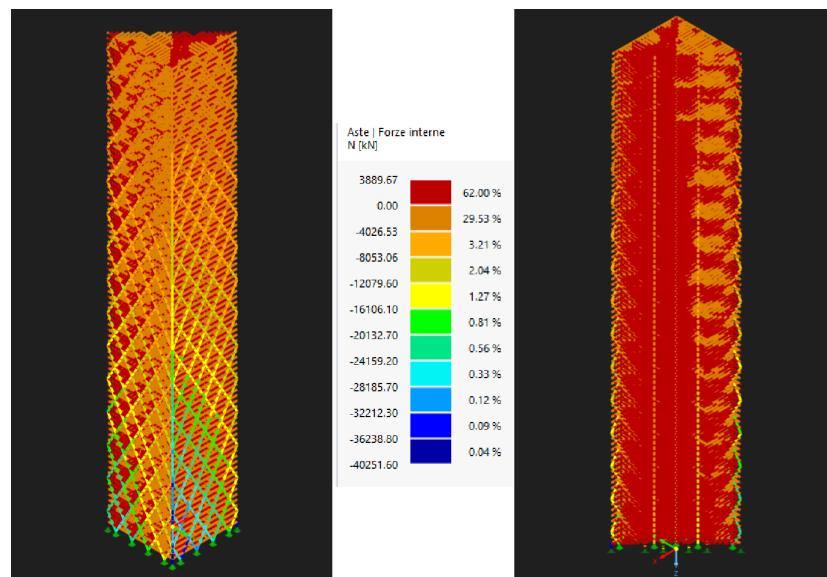


Figura 135: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 2

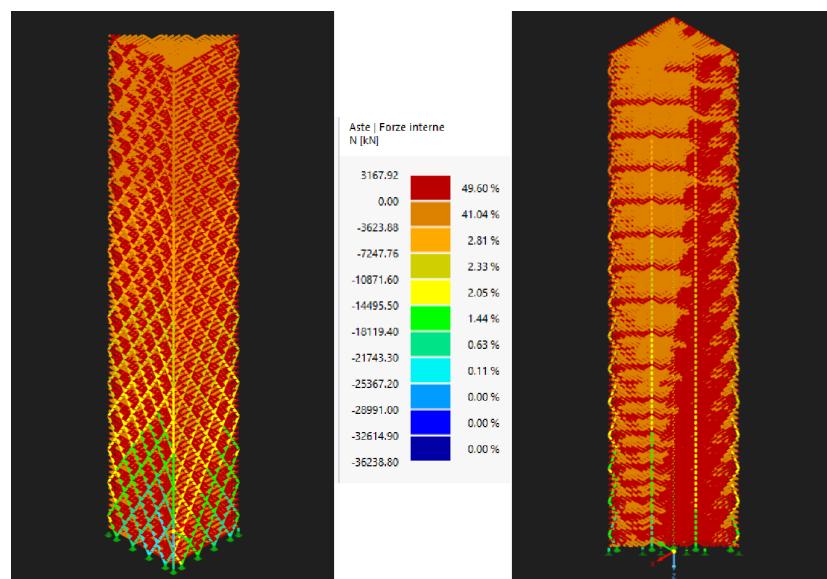


Figura 136: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 2

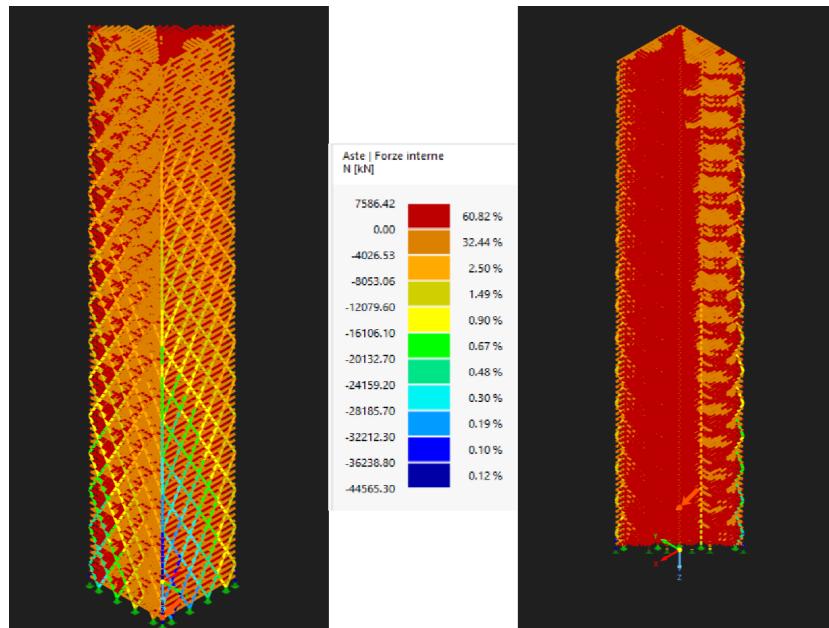


Figura 137: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 2

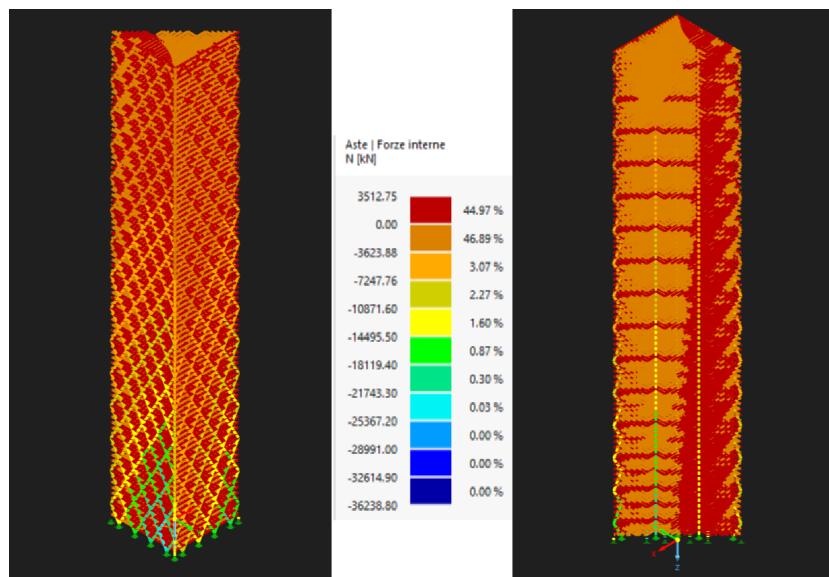


Figura 138: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 2

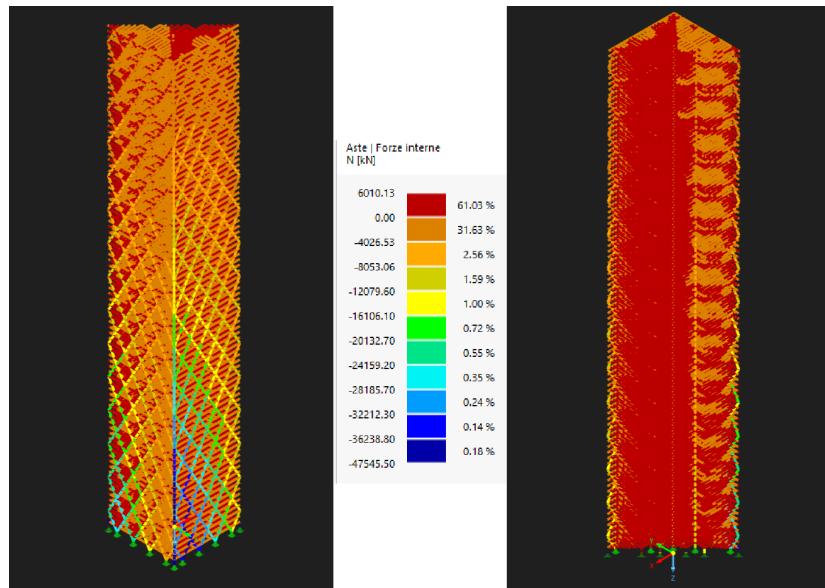


Figura 139: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 2

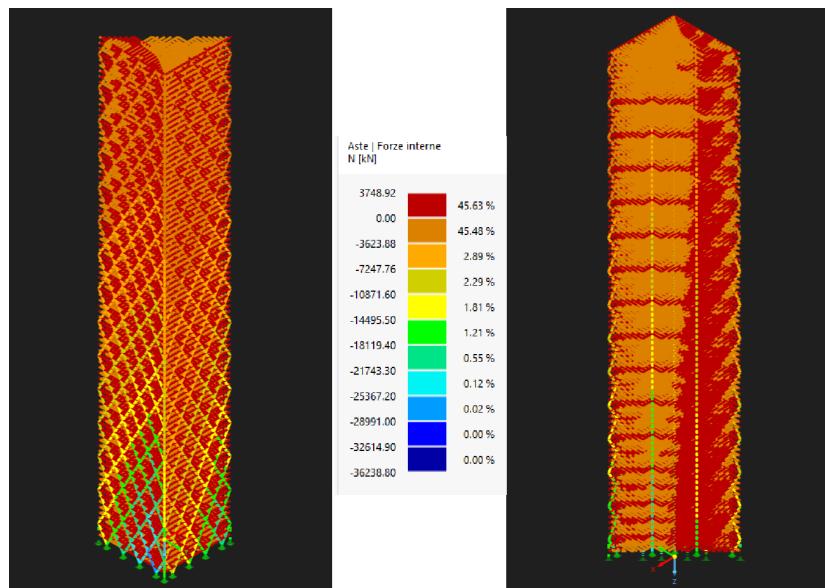


Figura 140: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 2

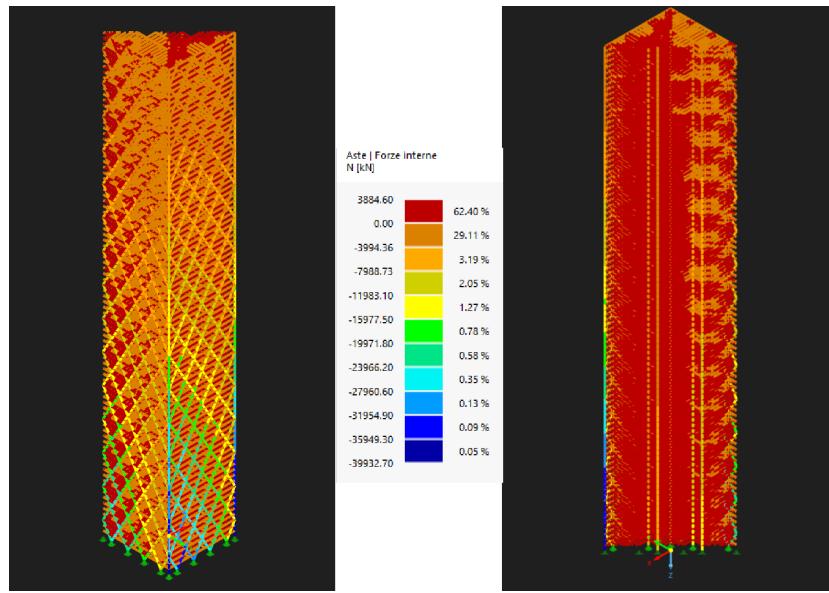


Figura 141: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti

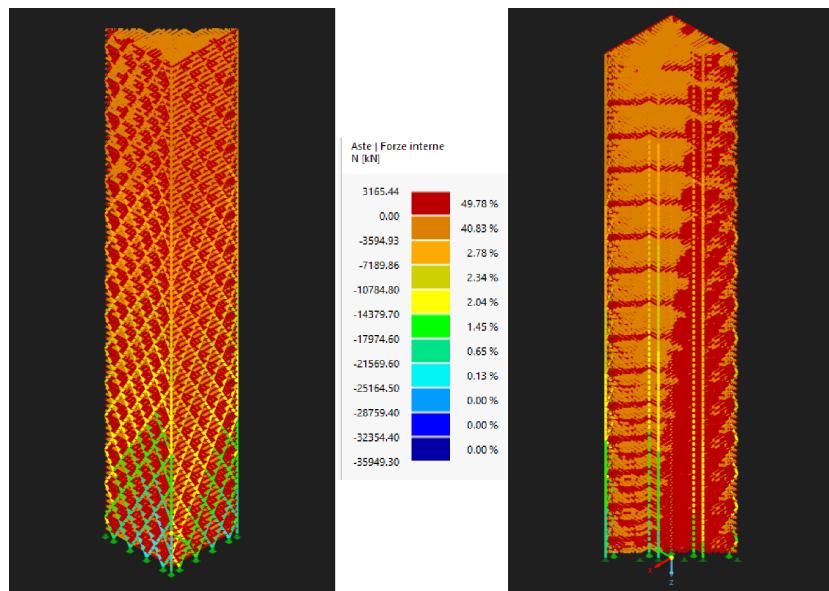


Figura 142: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti

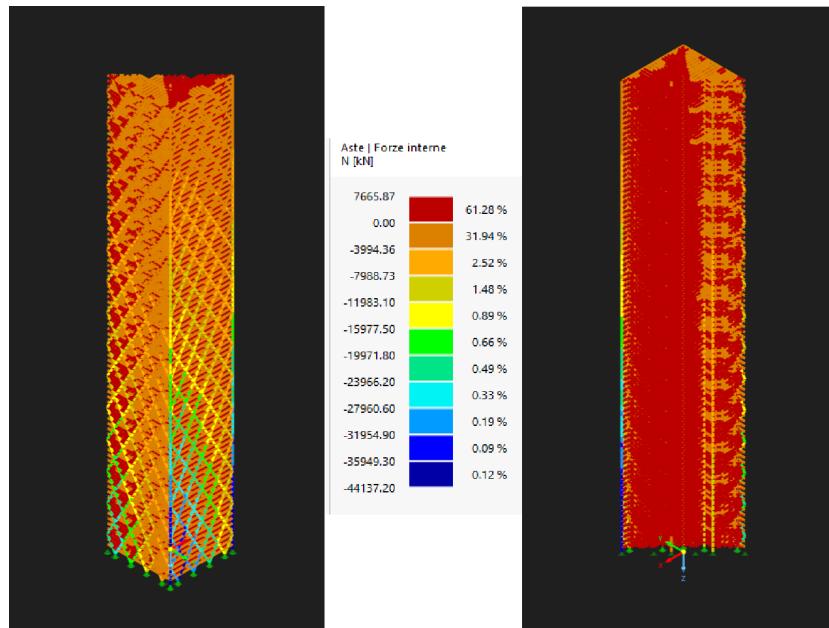


Figura 143: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti

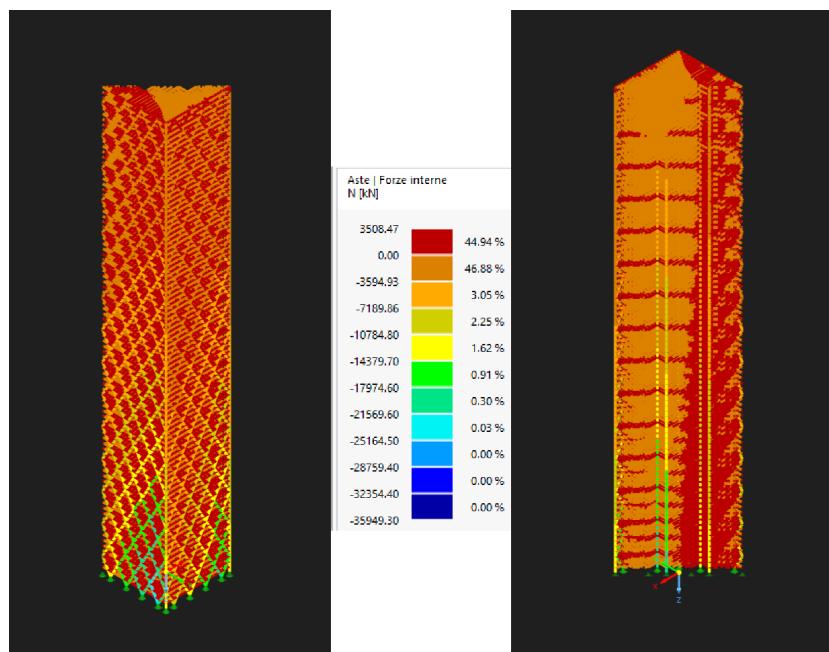


Figura 144: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 2 grandi spostamenti

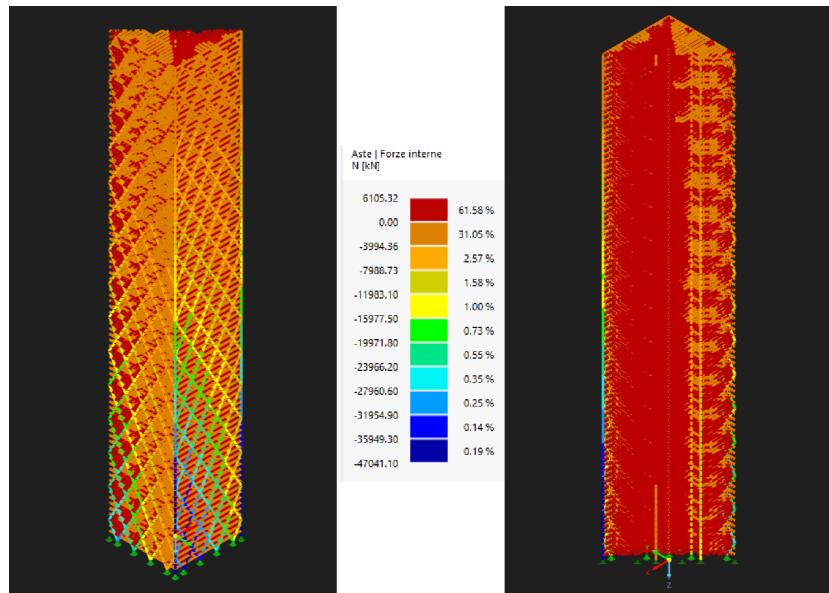


Figura 145: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 2 grandi spostamenti

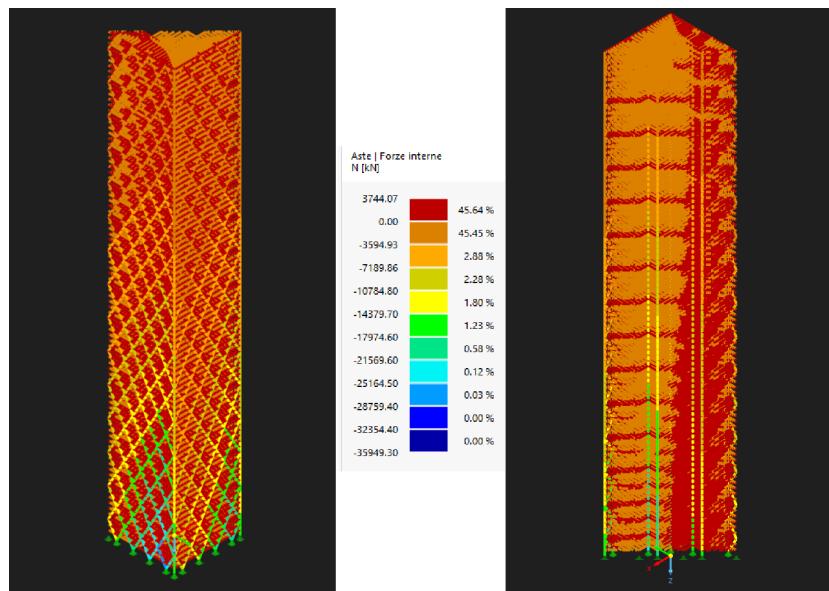


Figura 146: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 2 grandi spostamenti

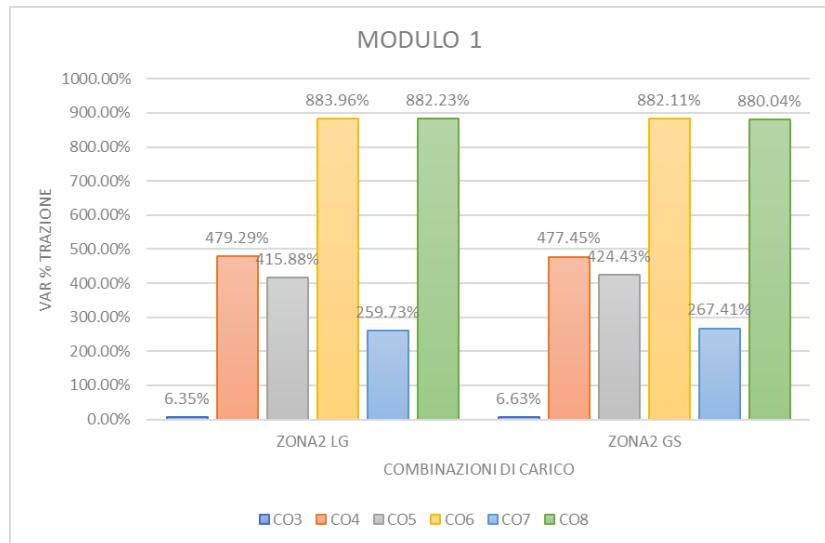


Figura 147: Variazione % trazione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 2

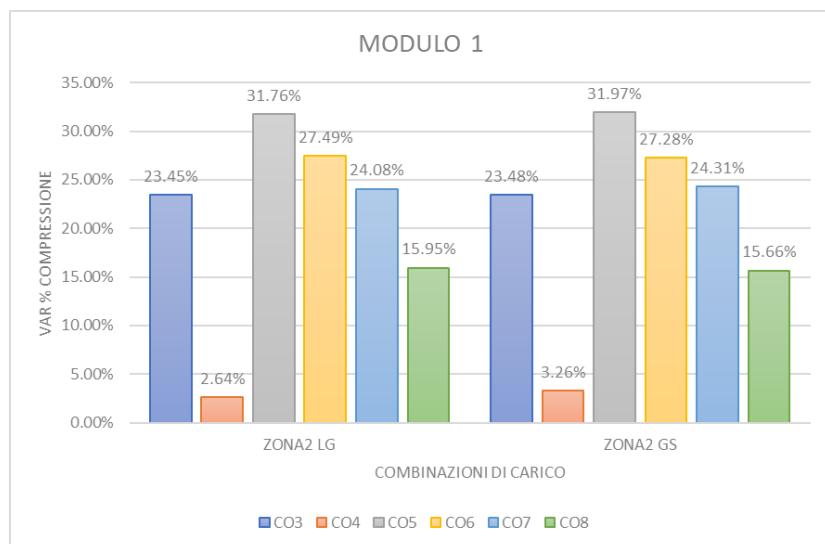


Figura 148: Variazione % compressione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 2

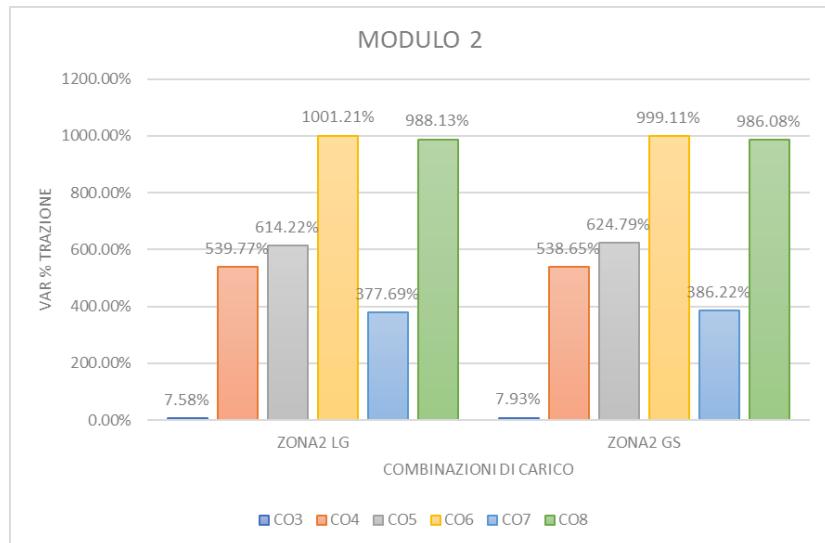


Figura 149: Variazione % trazione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 2

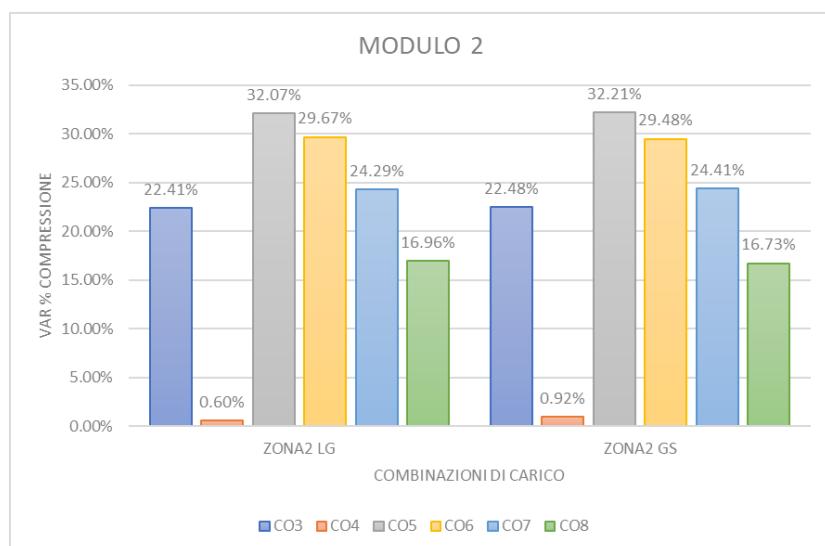


Figura 150: Variazione % compressione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 2

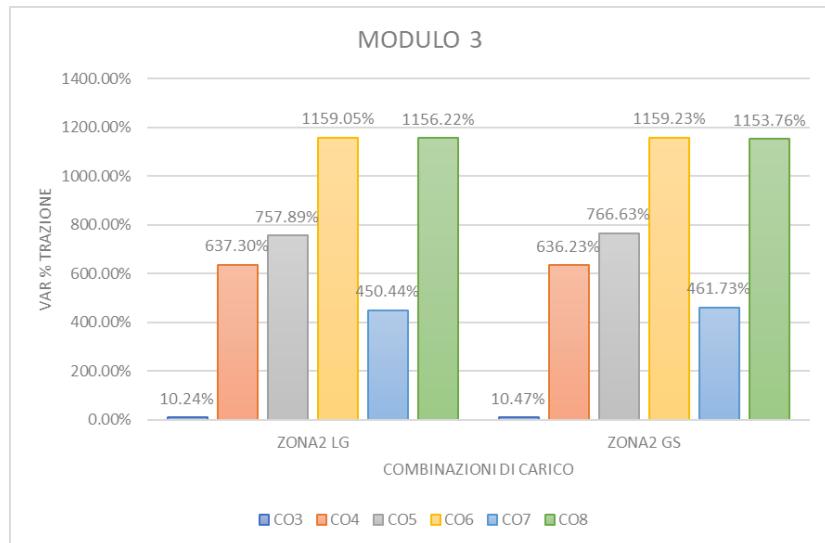


Figura 151: Variazione % trazione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, 16.389 kN; Zona 2

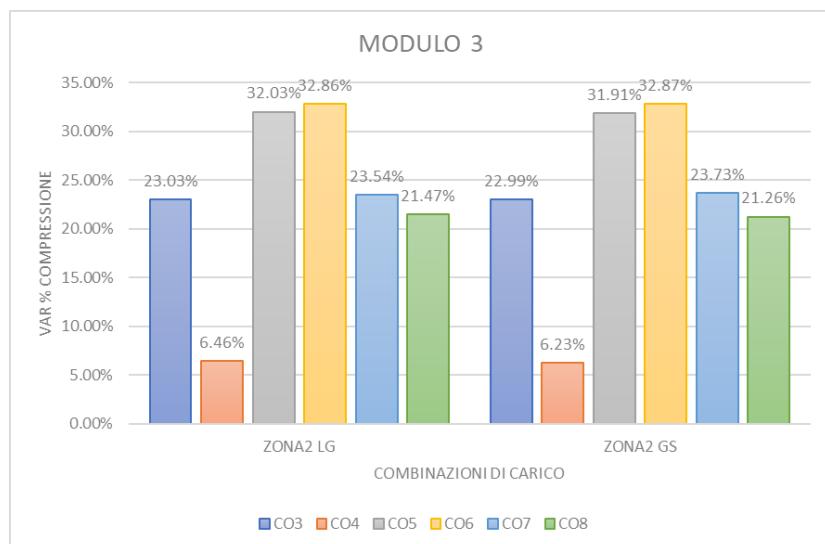


Figura 152: Variazione % compressione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, -6070.442 kN; Zona 2

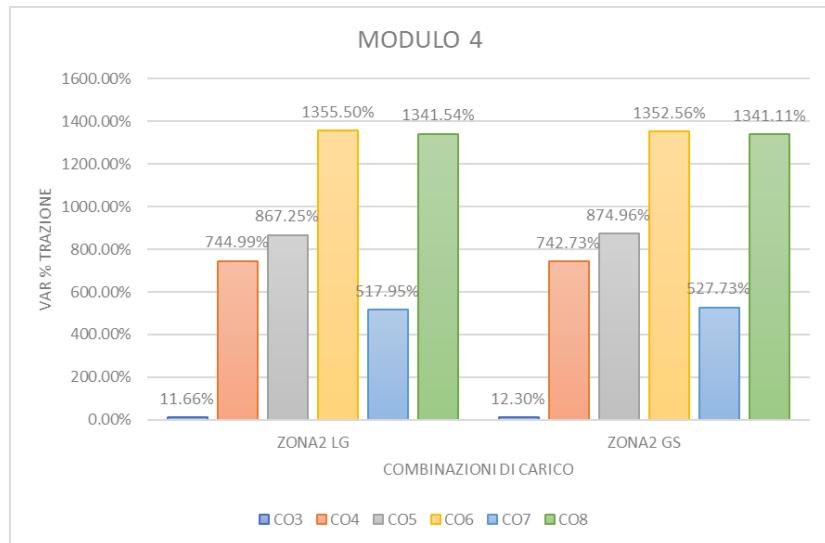


Figura 153: Variazione % trazione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, 14.449 kN; Zona 2

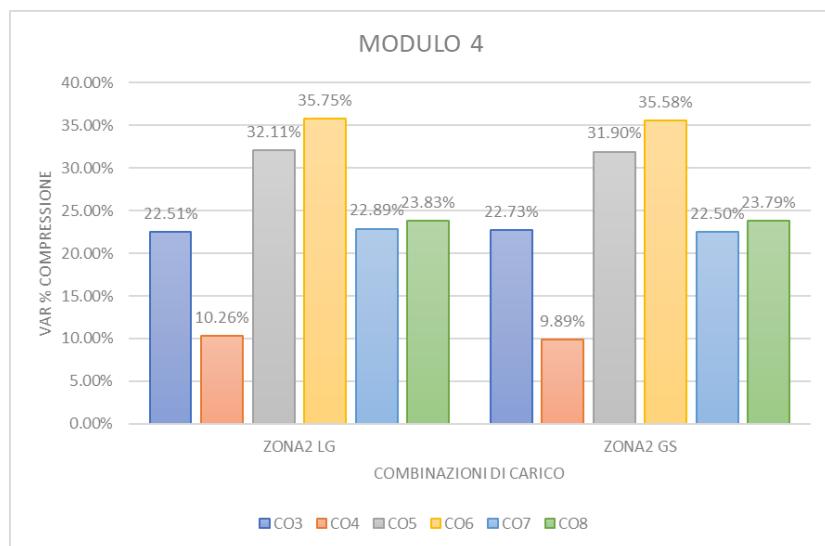


Figura 154: Variazione % compressione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, -5386.302 kN; Zona 2

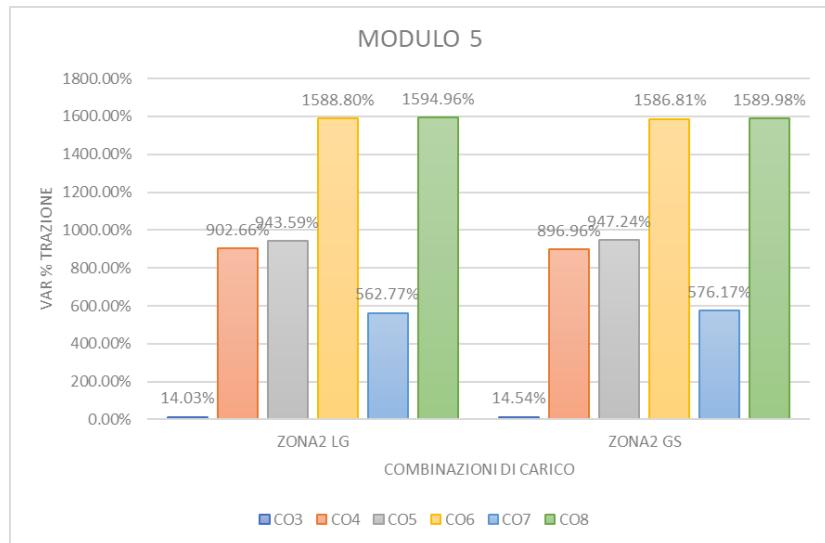


Figura 155: Variazione % trazione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, 12.564 kN; Zona 2

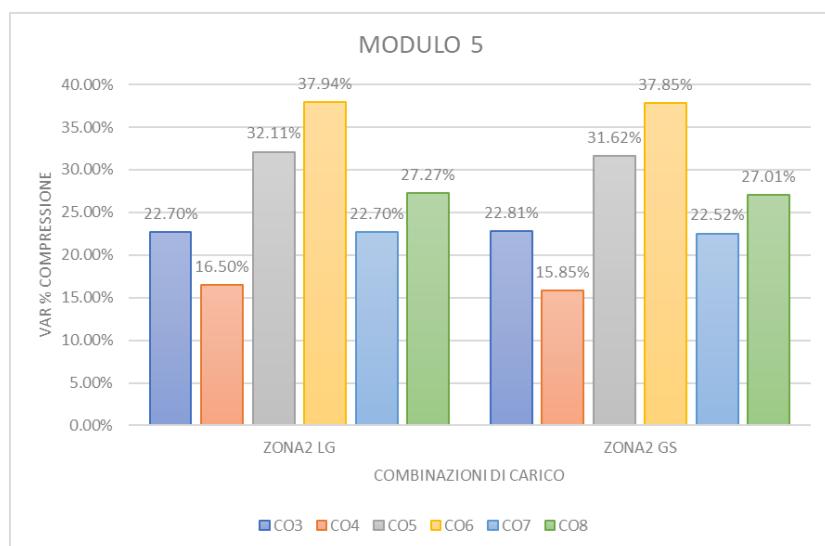


Figura 156: Variazione % compressione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, -4774-796 kN; Zona 2

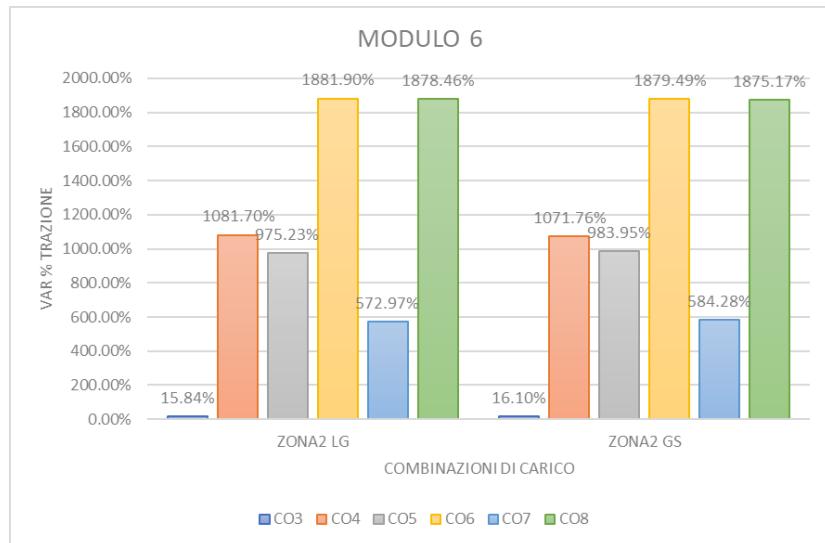


Figura 157: Variazione % trazione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, 10.868 kN; Zona 2

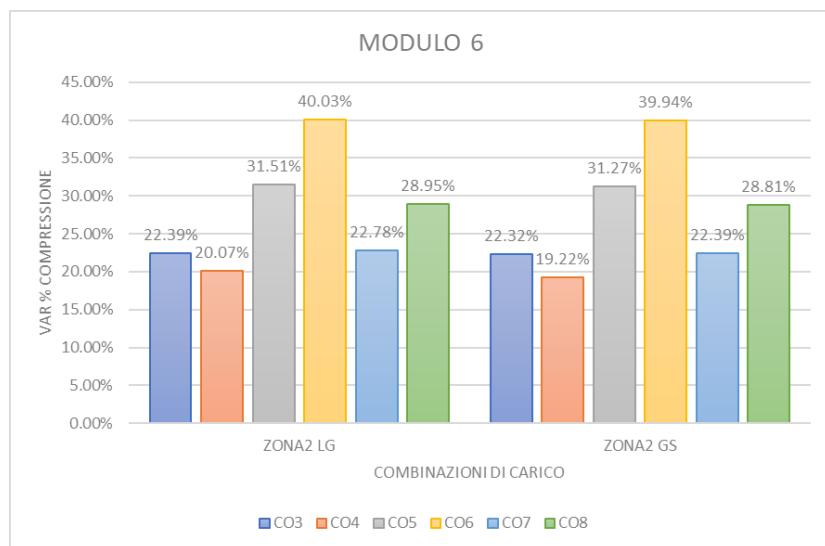


Figura 158: Variazione % compressione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, -4179.814 kN; Zona 2

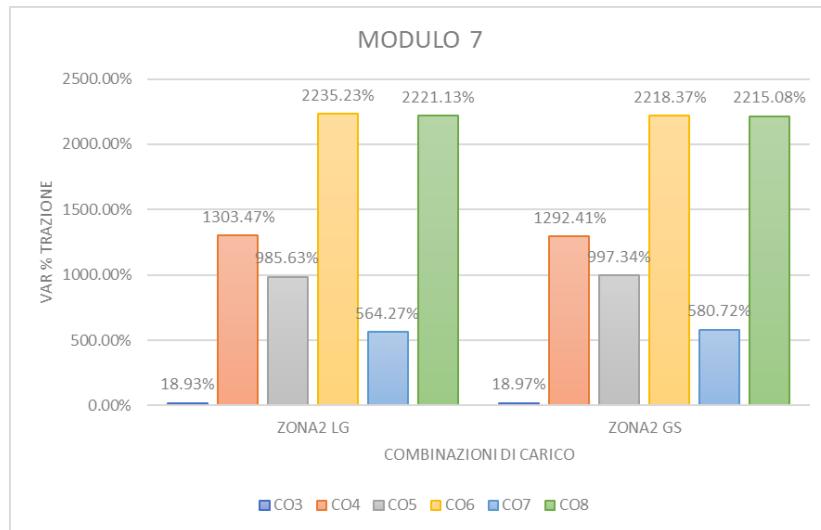


Figura 159: Variazione % trazione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, 9.395 kN; Zona 2

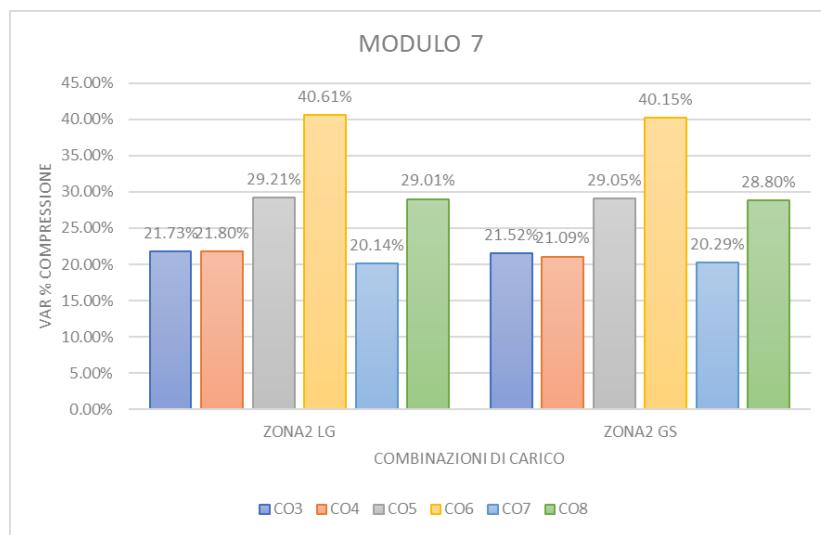


Figura 160: Variazione % compressione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, -3531.725 kN; Zona 2

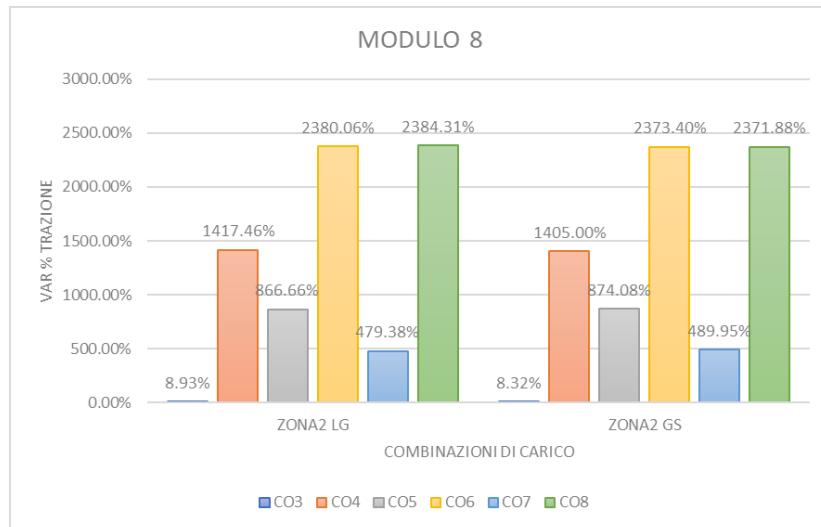


Figura 161: Variazione % trazione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, 8.396 kN; Zona 2

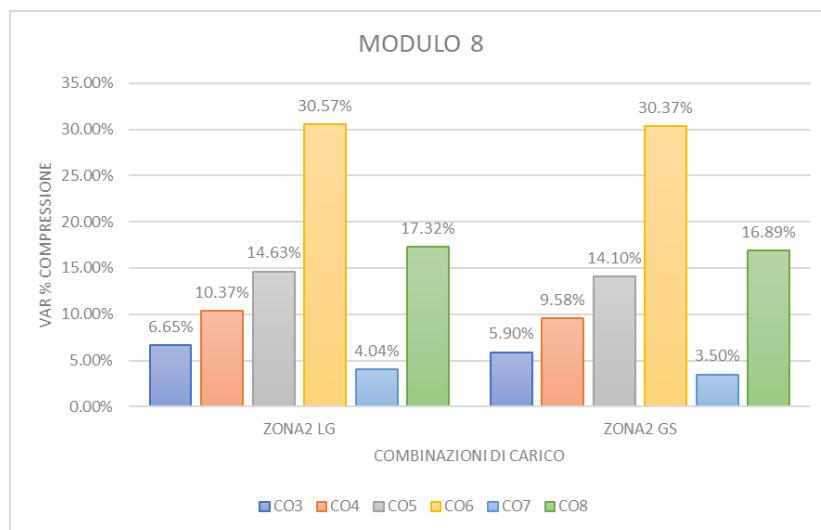


Figura 162: Variazione % compressione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, -2528.914 kN; Zona 2

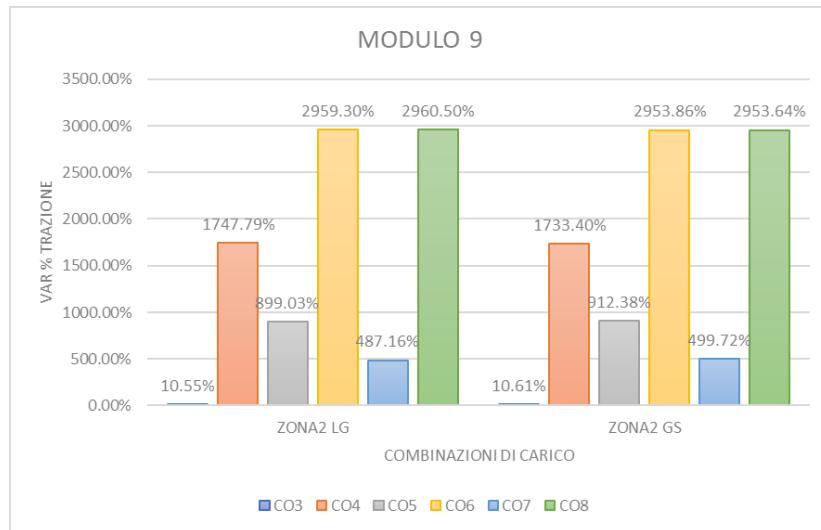


Figura 163: Variazione % trazione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, 7.299 kN; Zona 2

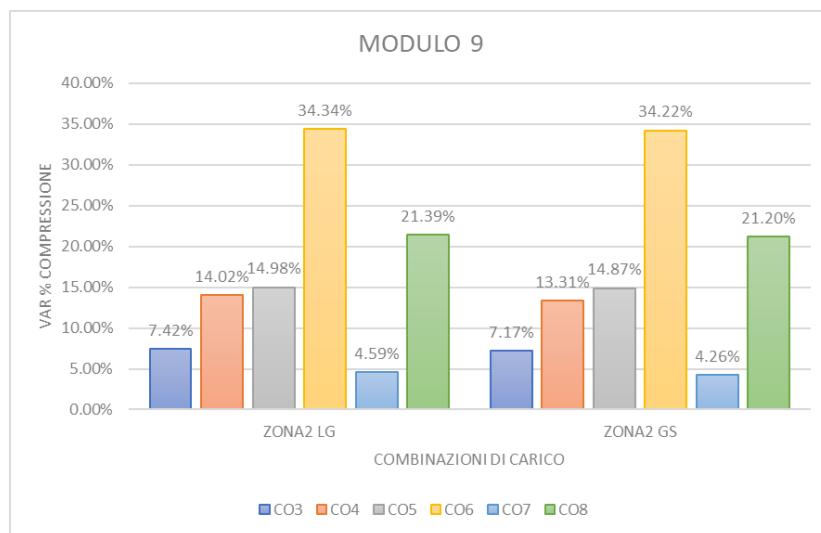


Figura 164: Variazione % compressione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, -2217.615 kN; Zona 2

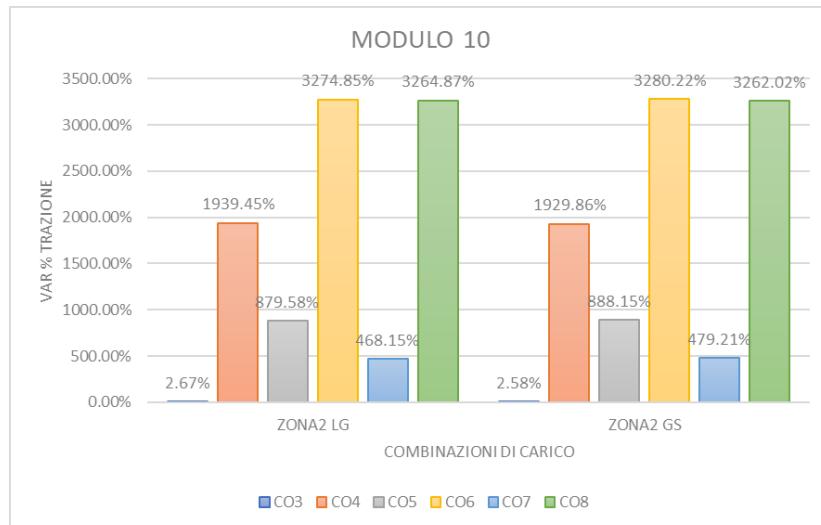


Figura 165: Variazione % trazione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, 6.737 kN; Zona 2

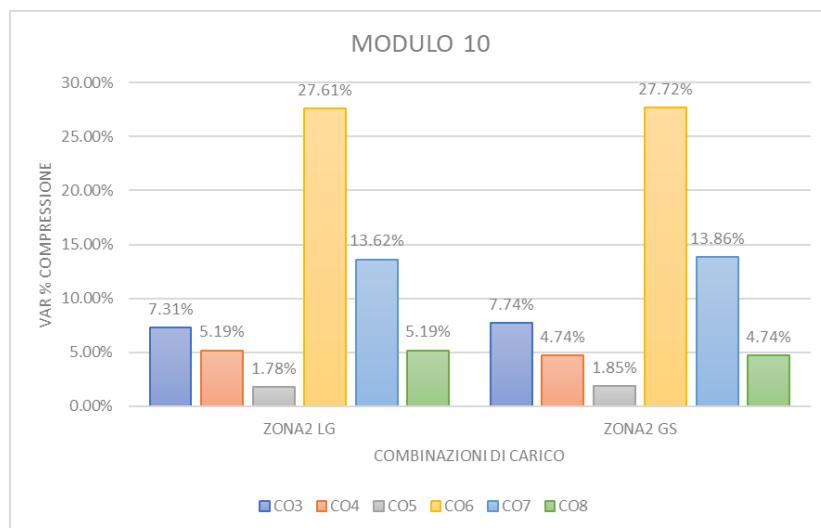


Figura 166: Variazione % compressione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, -1616.439 kN; Zona 2

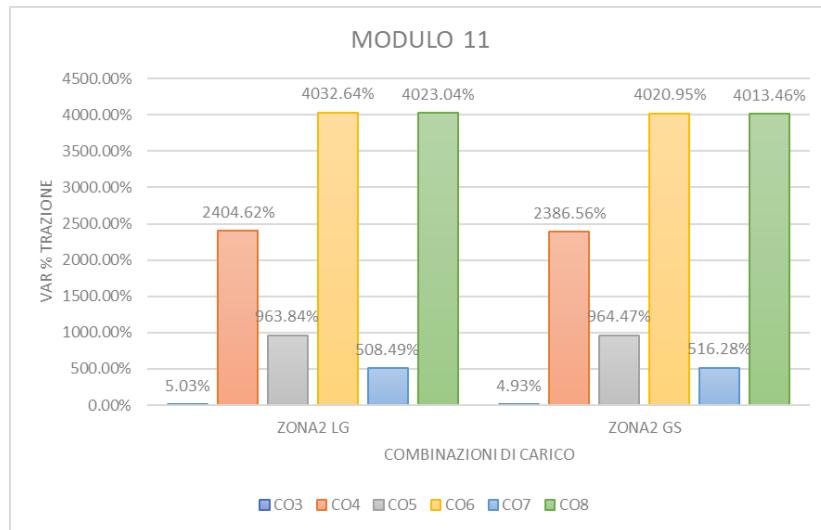


Figura 167: Variazione % trazione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, 5.542 kN; Zona 2

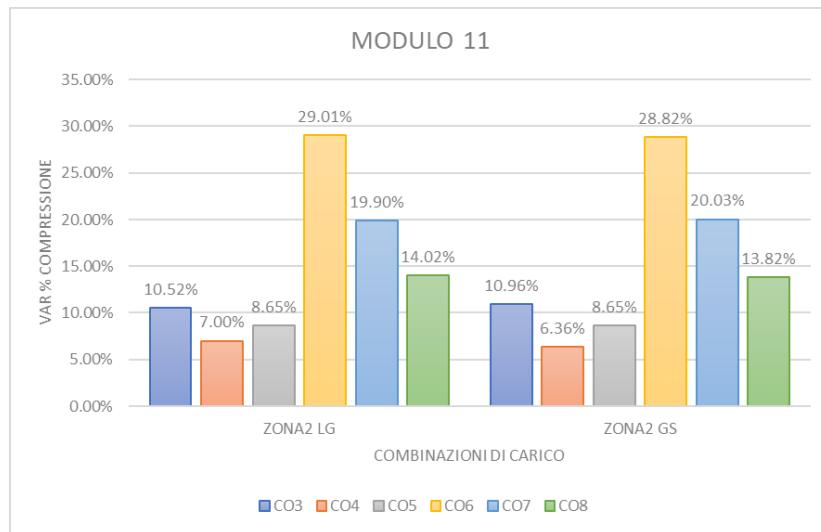


Figura 168: Variazione % compressione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, -1293.297 kN; Zona 2

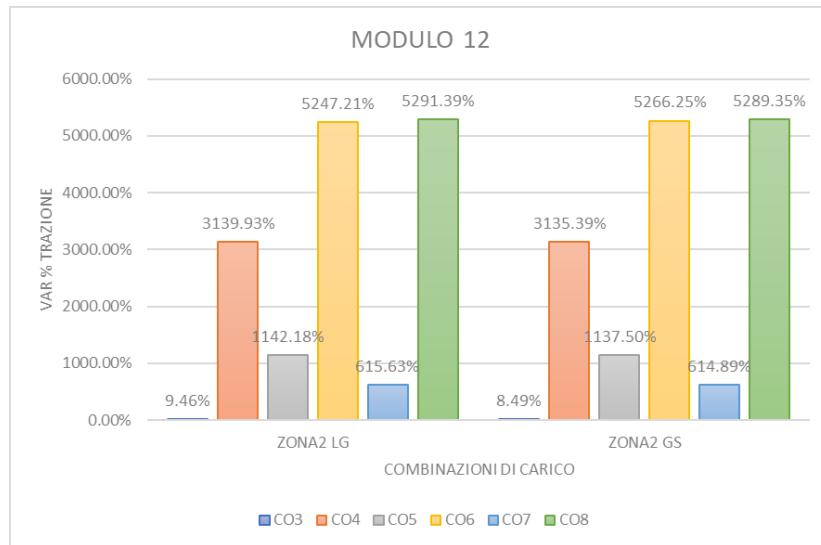


Figura 169: Variazione % trazione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, 4.245 kN; Zona 2

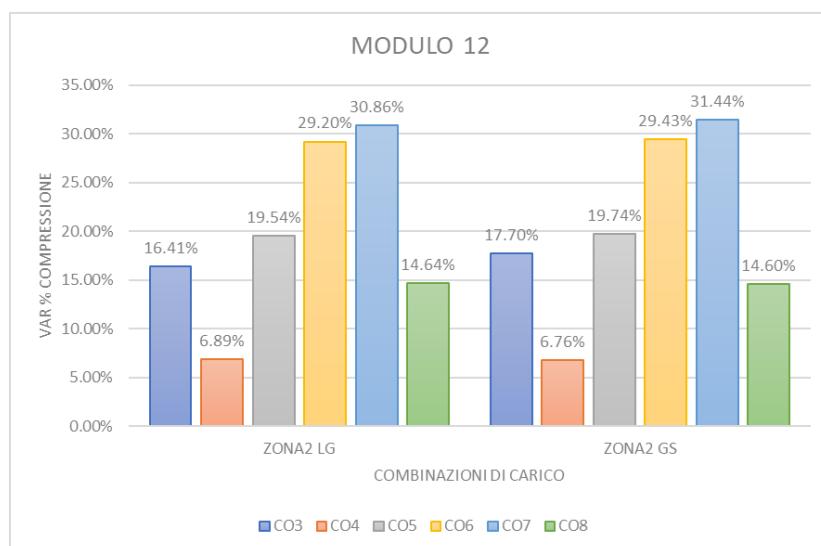


Figura 170: Variazione % compressione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, -983.055 kN; Zona 2

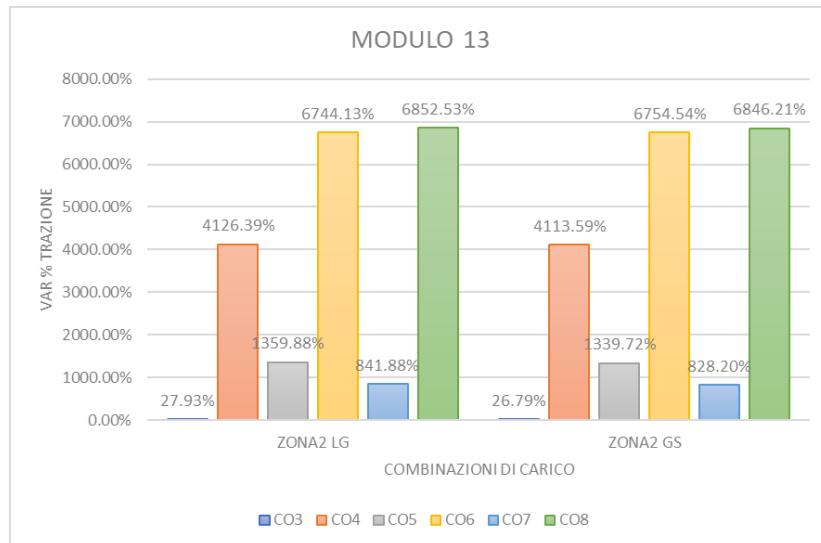


Figura 171: Variazione % trazione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, 3.401 kN; Zona 2

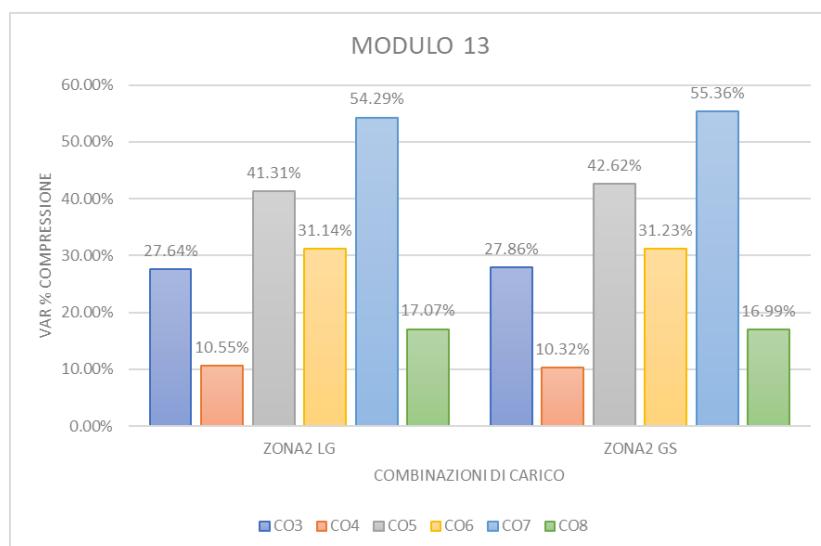


Figura 172: Variazione % compressione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, -684.734 kN; Zona 2

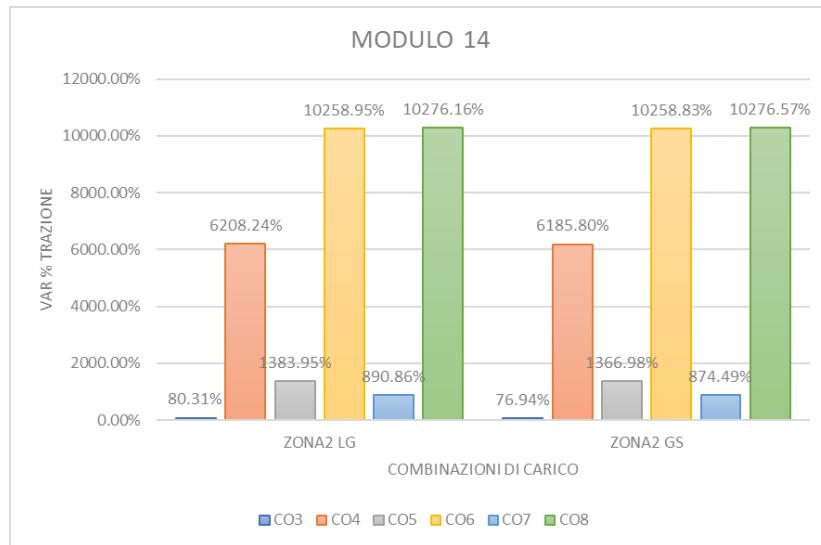


Figura 173: Variazione % trazione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, 2.271 kN; Zona 2

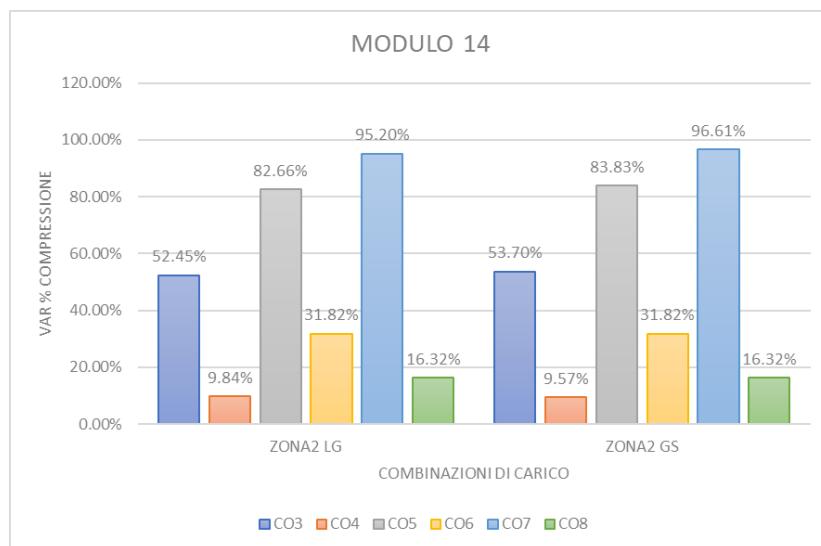


Figura 174: Variazione % compressione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, -401.080 kN; Zona 2

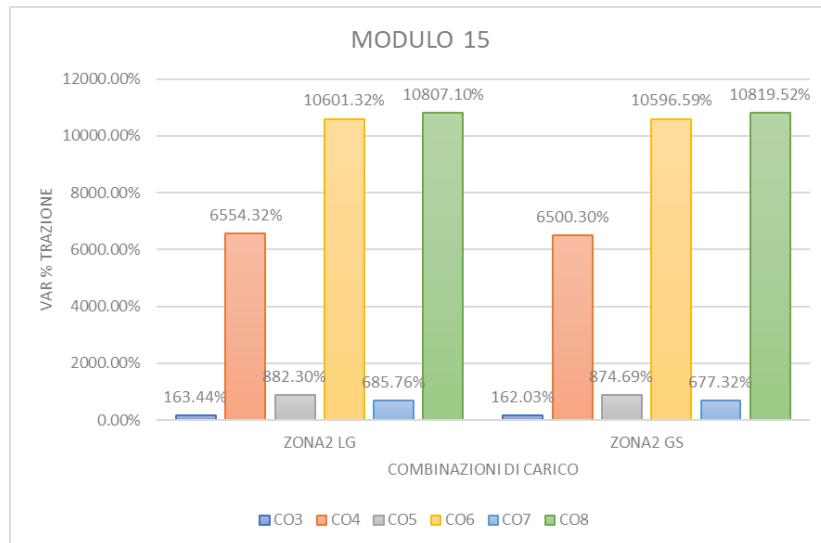


Figura 175: Variazione % trazione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, 2.269 kN; Zona 2

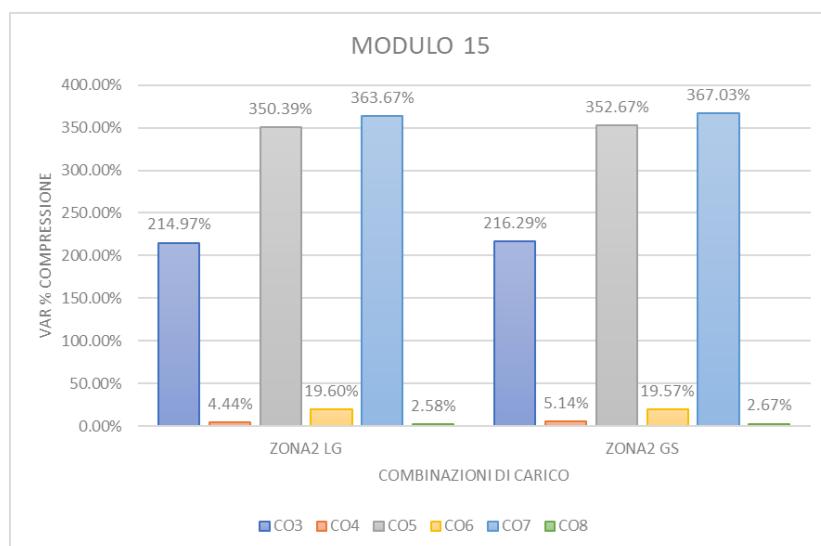


Figura 176: Variazione % compressione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, -119.021 kN; Zona 2

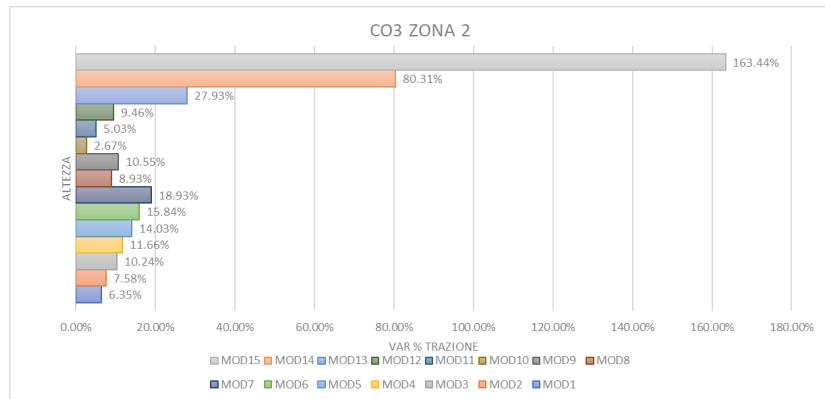


Figura 177: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 2

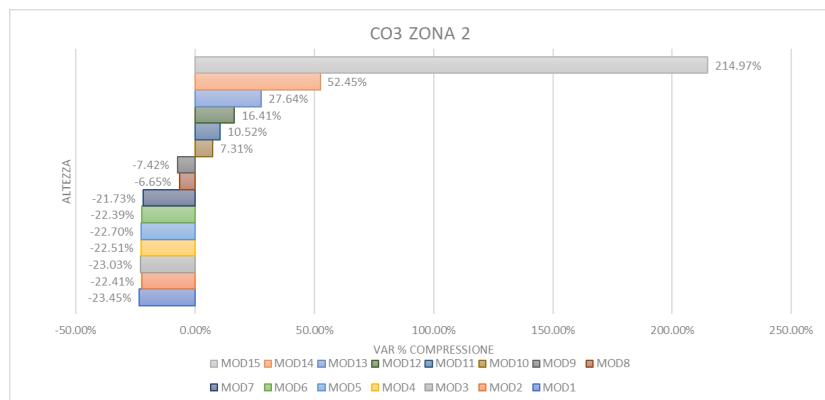


Figura 178: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 2

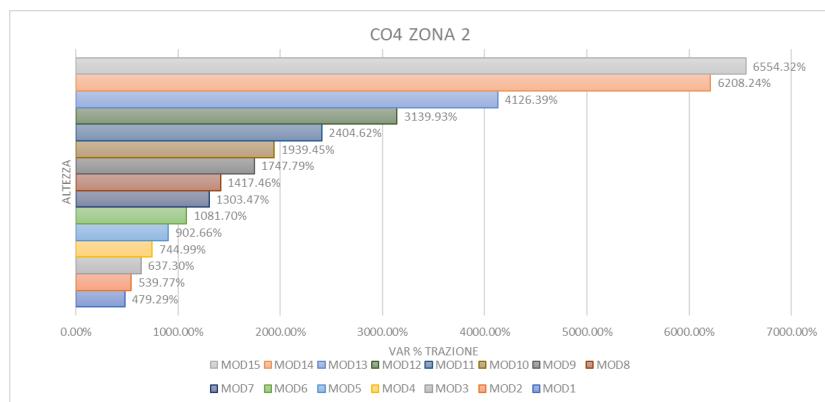


Figura 179: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 2

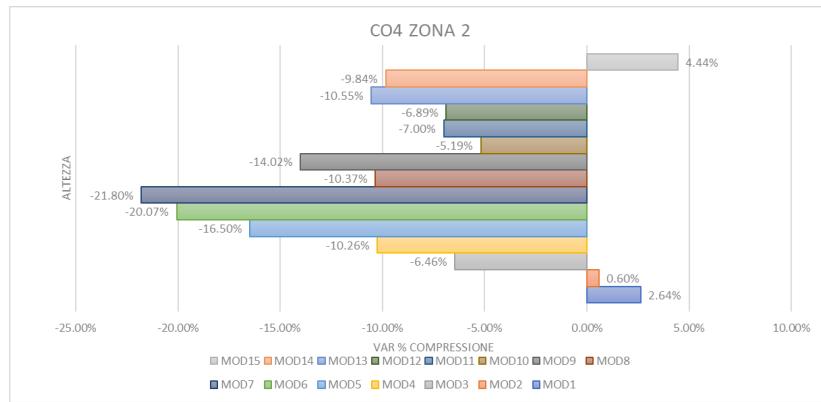


Figura 180: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 2

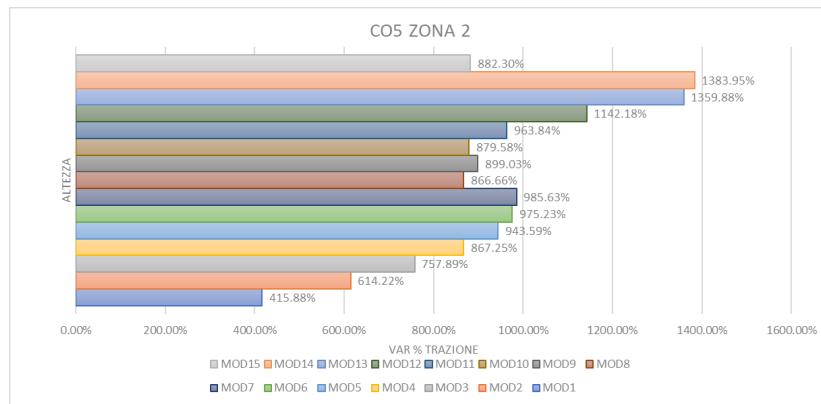


Figura 181: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 2

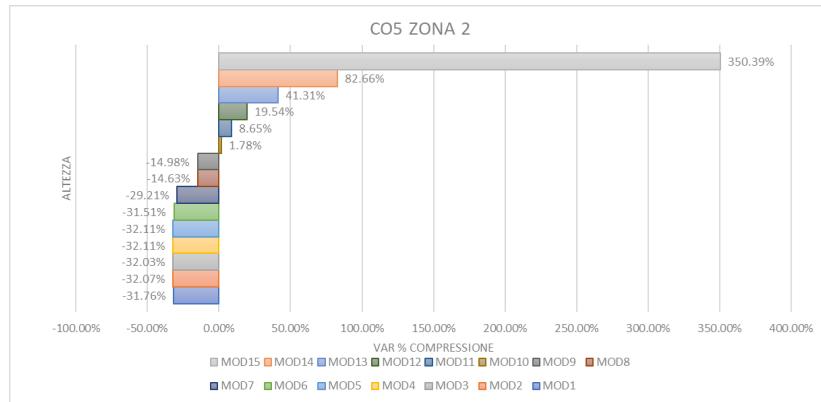


Figura 182: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 2

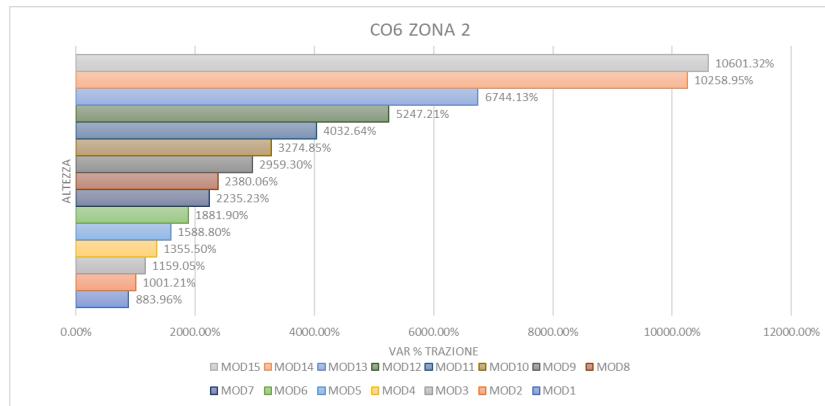


Figura 183: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 2

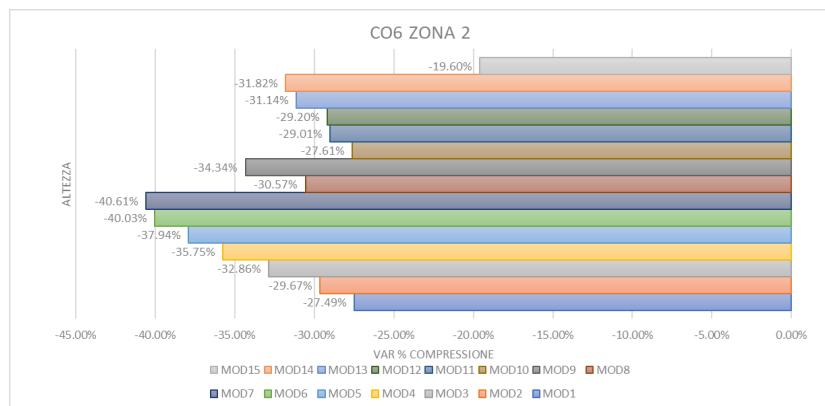


Figura 184: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 2

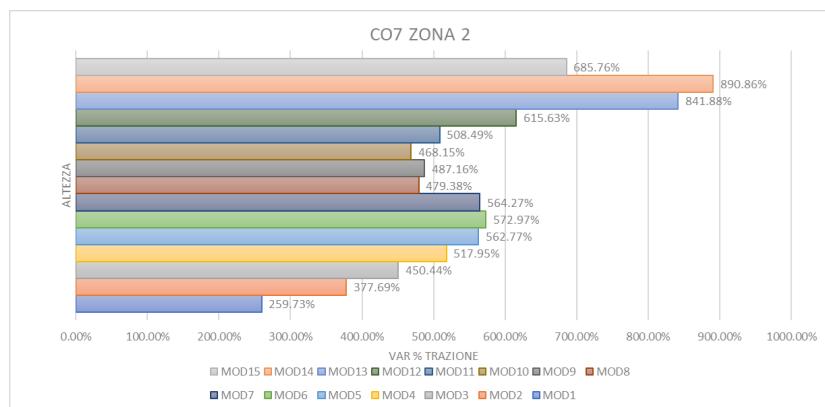


Figura 185: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 2

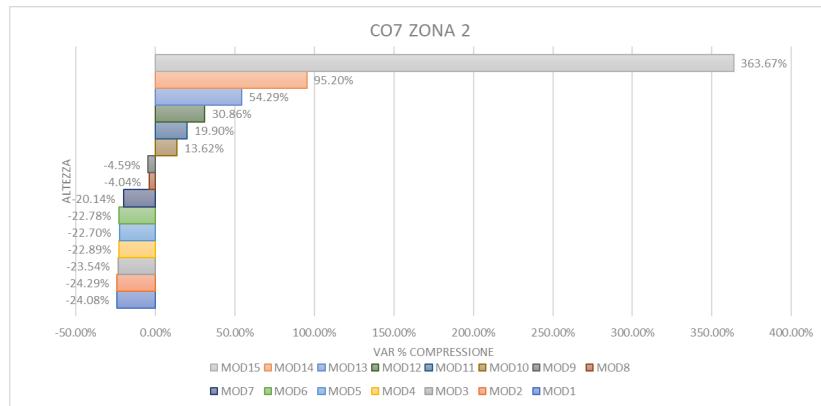


Figura 186: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 2

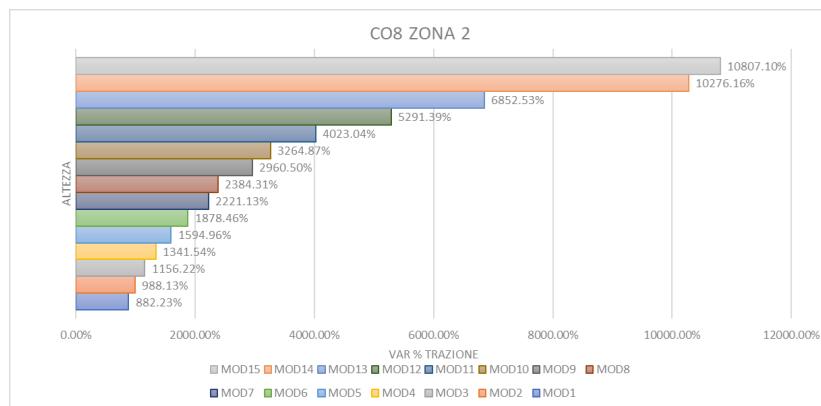


Figura 187: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 2

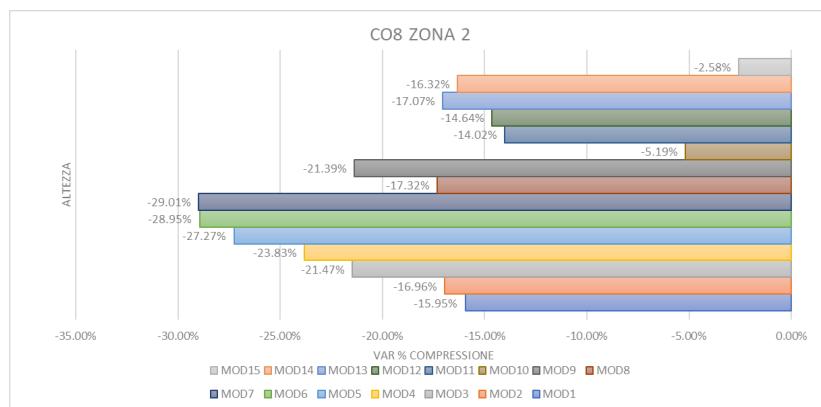


Figura 188: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 2

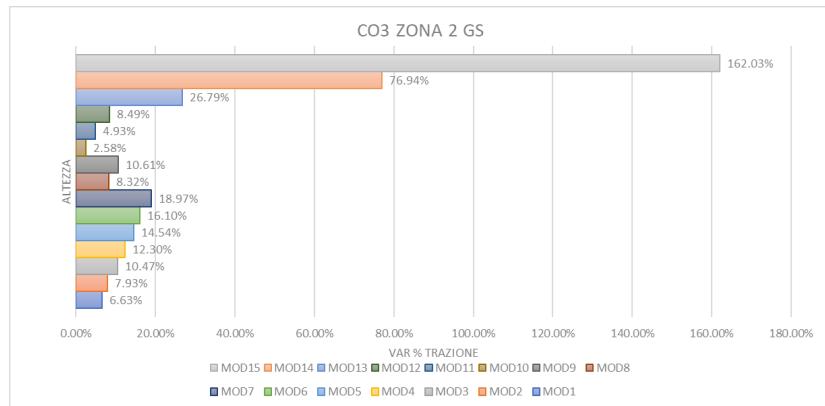


Figura 189: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti

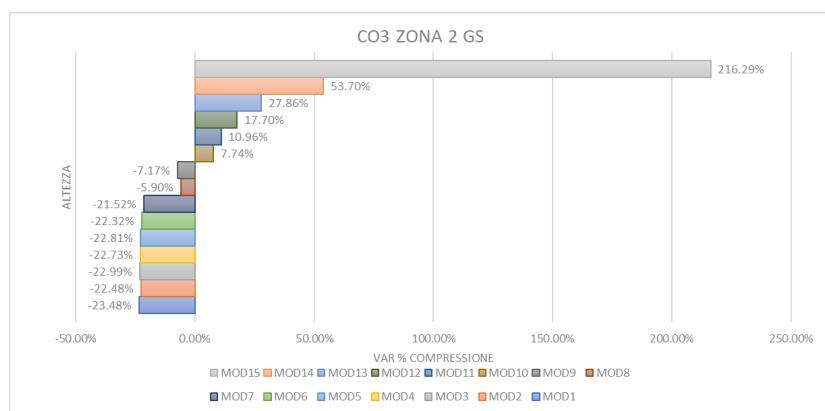


Figura 190: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti

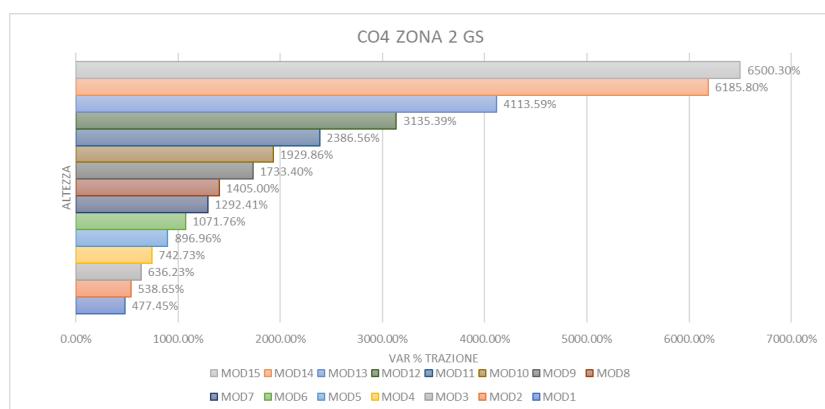


Figura 191: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti

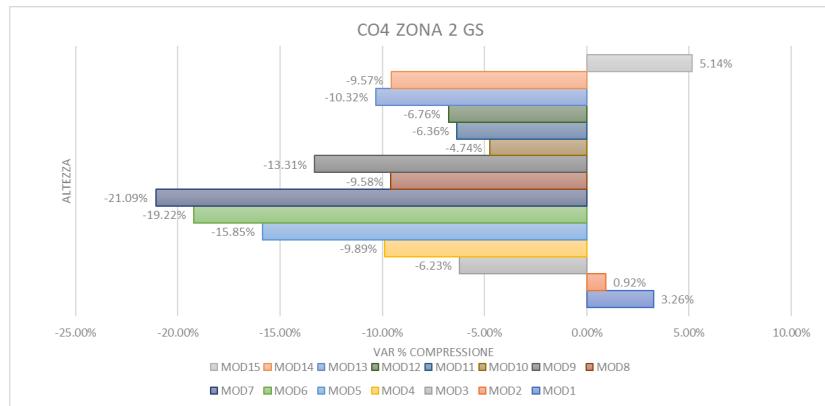


Figura 192: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti

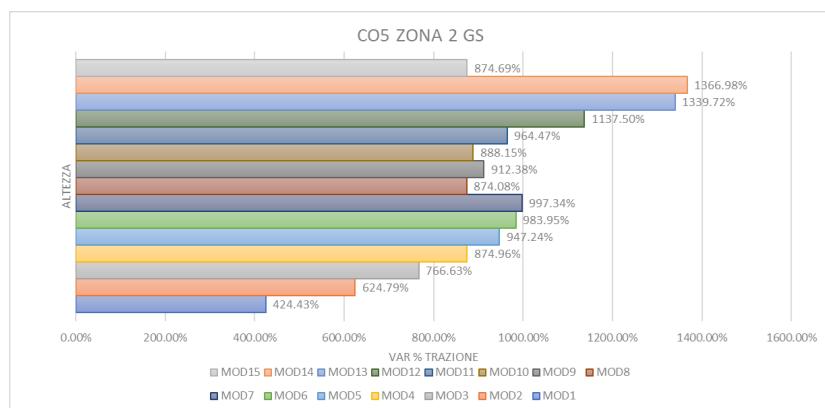


Figura 193: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti

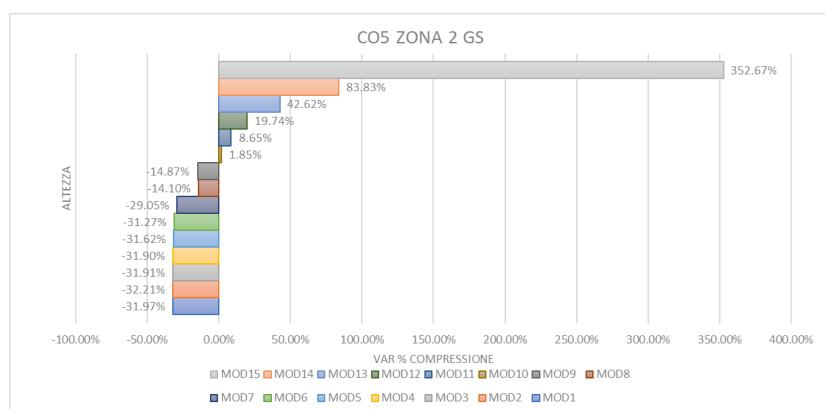


Figura 194: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti

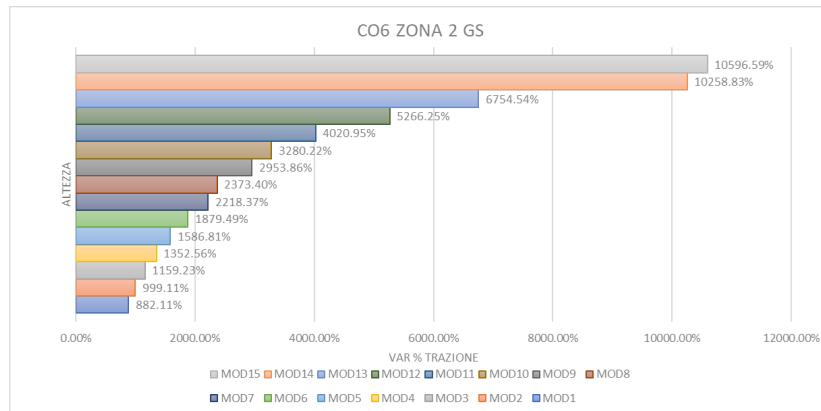


Figura 195: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 2
grandi spostamenti

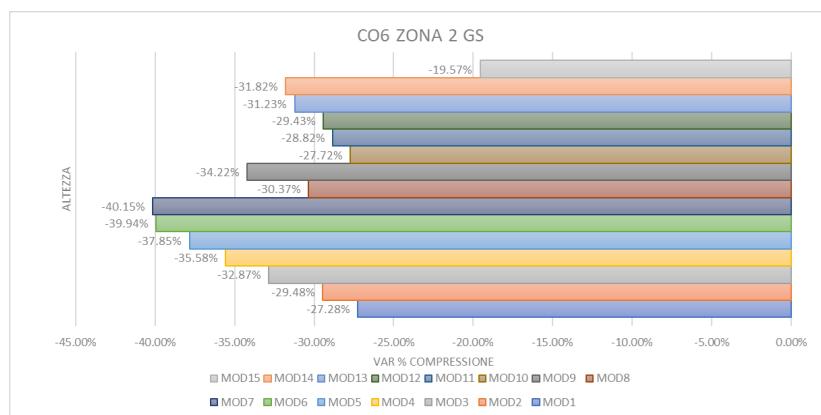


Figura 196: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 2
grandi spostamenti

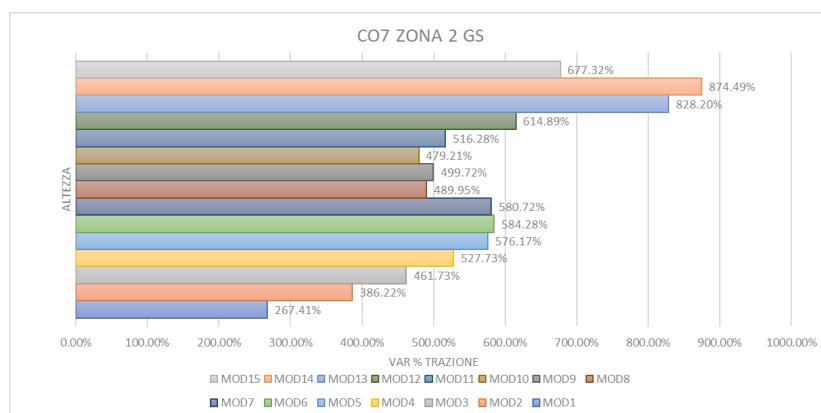


Figura 197: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 2
grandi spostamenti

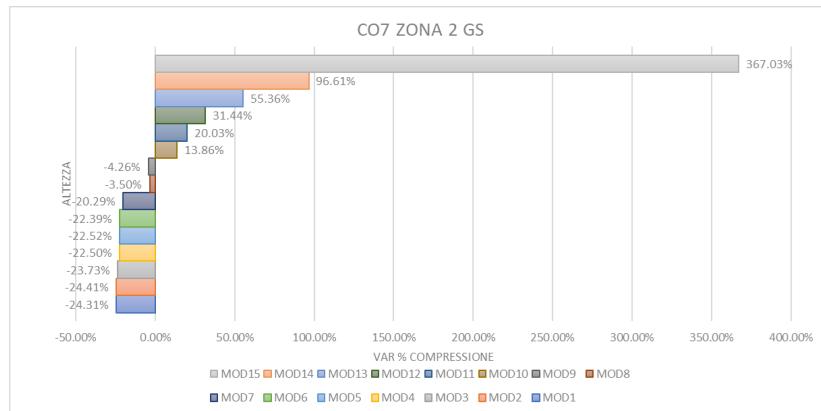


Figura 198: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 2
grandi spostamenti

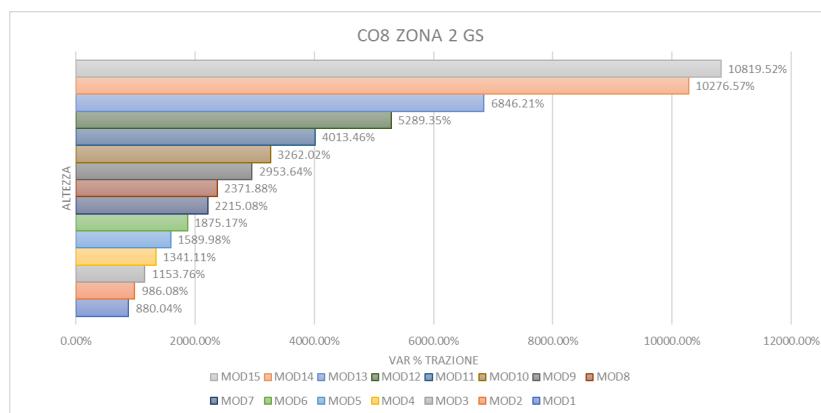


Figura 199: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 2
grandi spostamenti

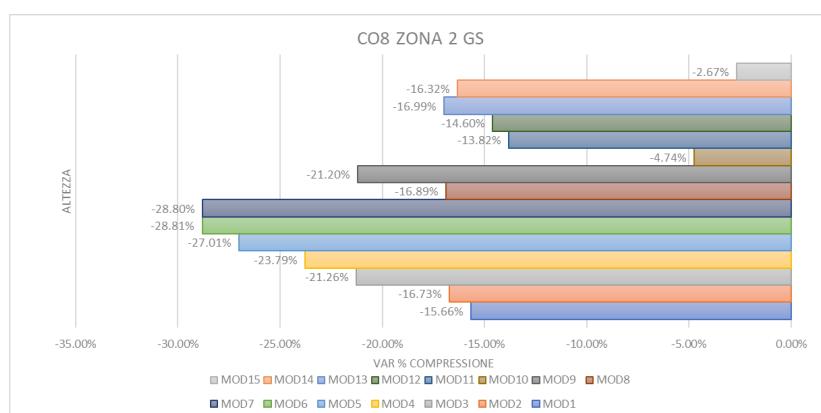
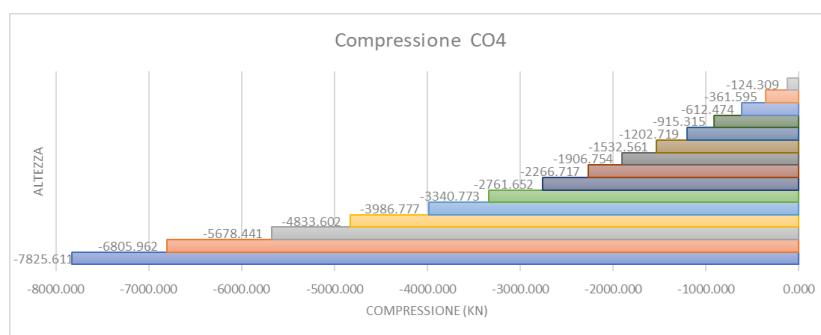
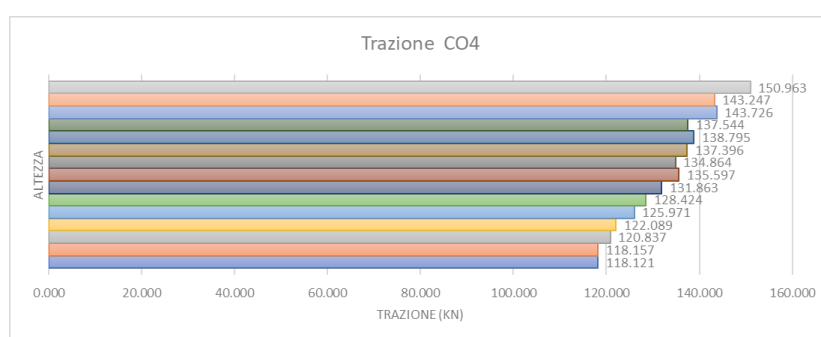
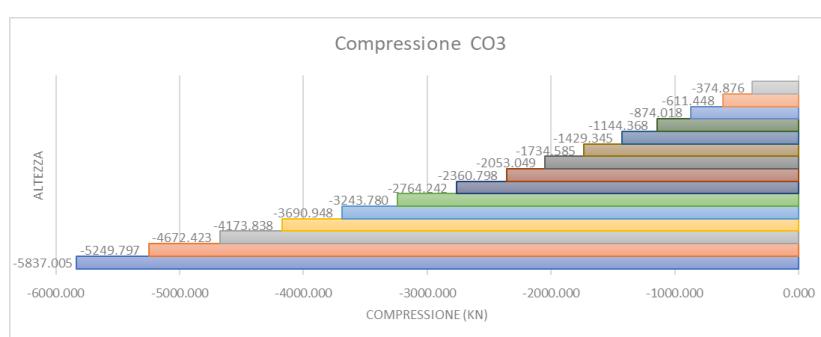
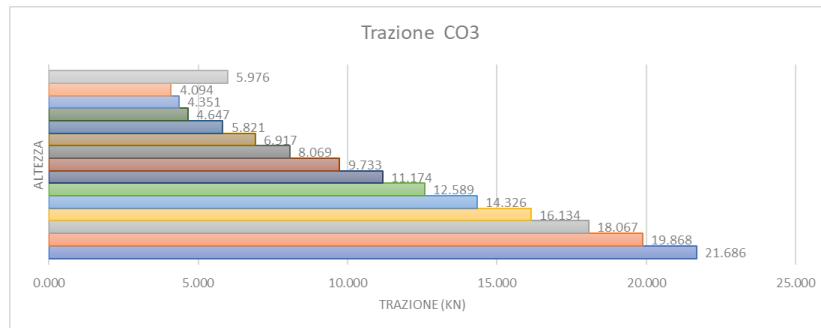


Figura 200: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 2
grandi spostamenti



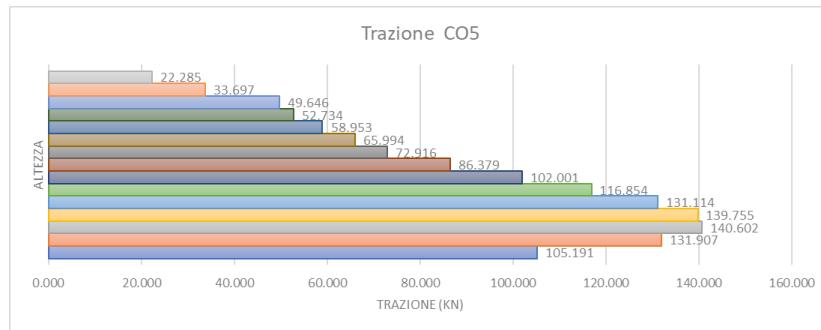


Figura 205: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 2

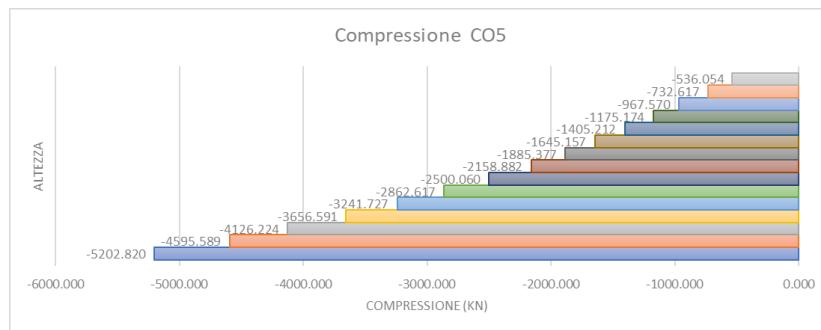


Figura 206: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 2

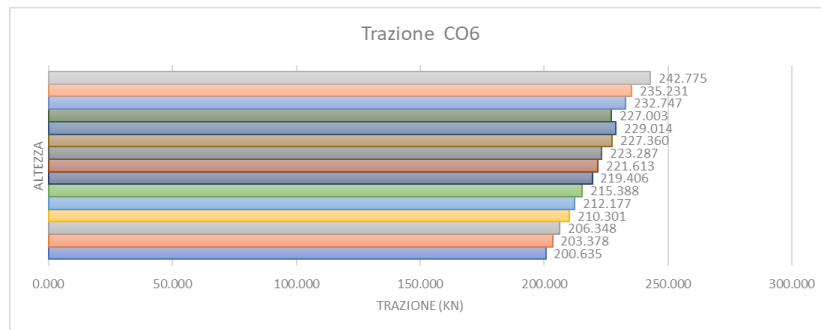


Figura 207: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 2

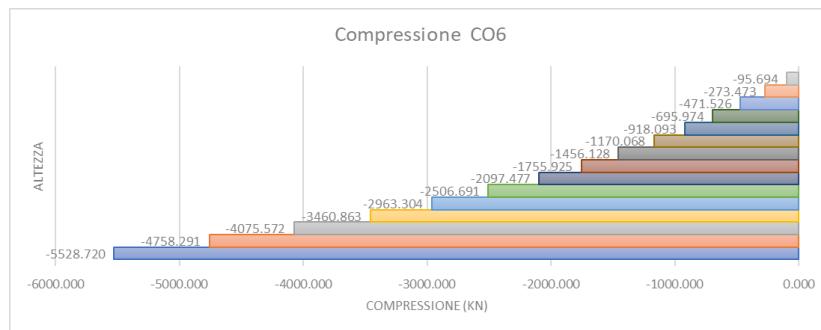


Figura 208: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 2

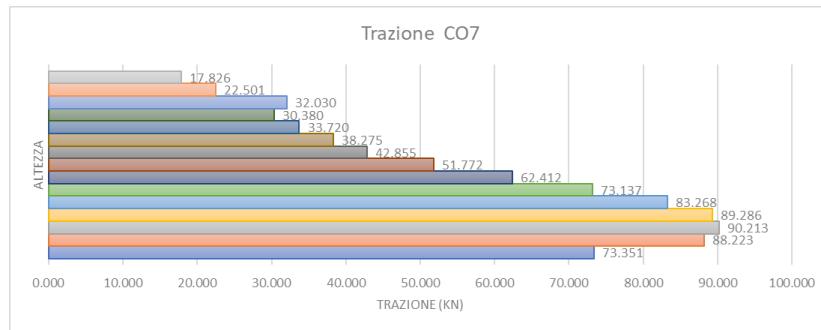


Figura 209: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 2

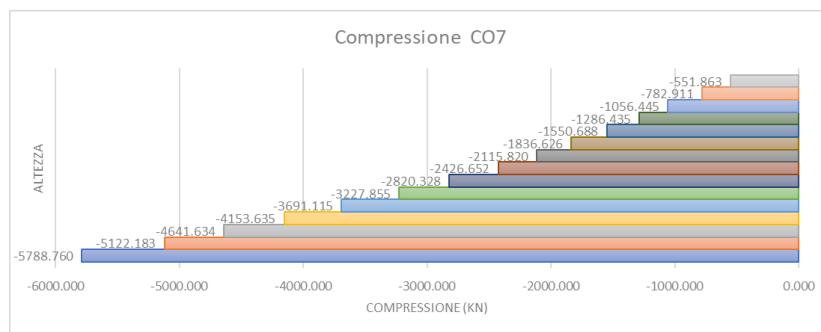


Figura 210: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 2

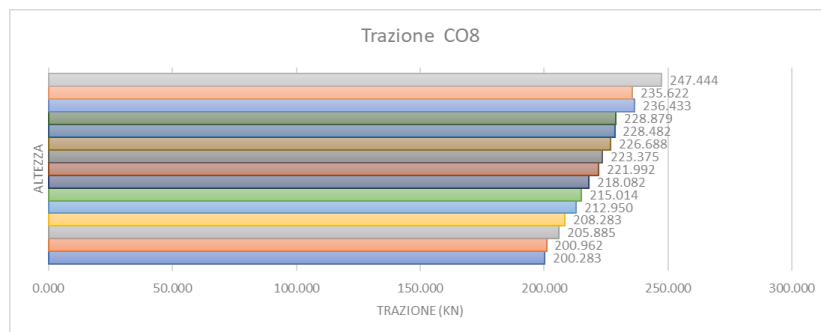


Figura 211: Andamento della trazione combinazione di carico CO8, Zona 2

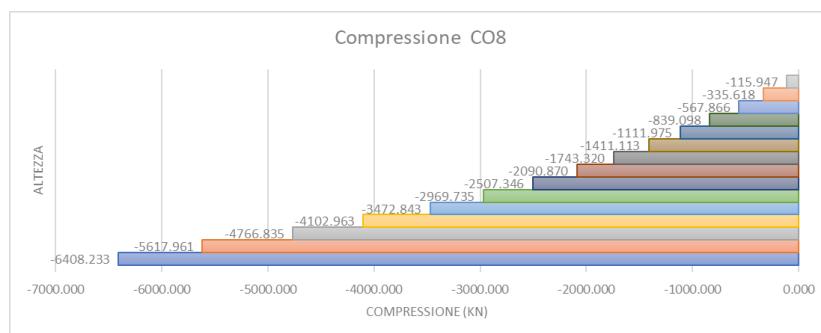


Figura 212: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 2

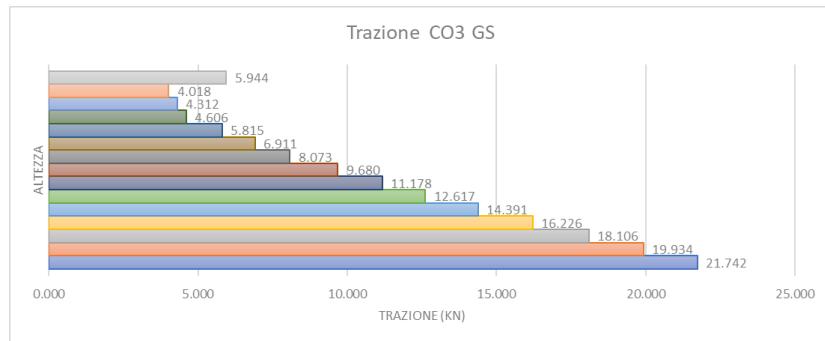


Figura 213: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti

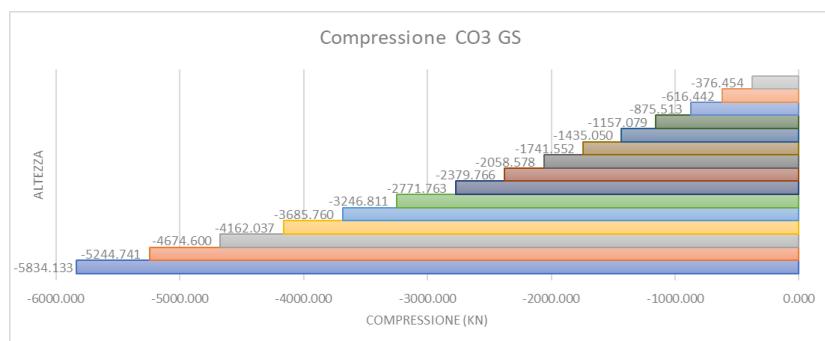


Figura 214: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 2 grandi spostamenti

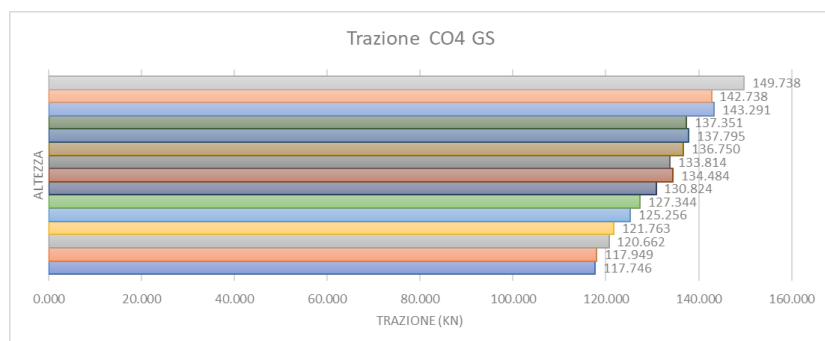


Figura 215: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti

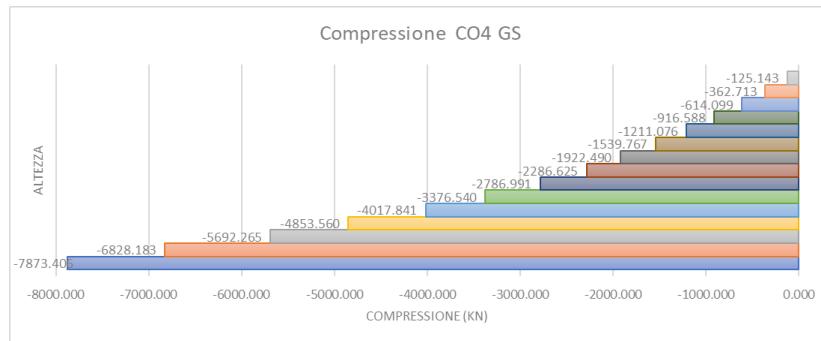


Figura 216: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 2 grandi spostamenti

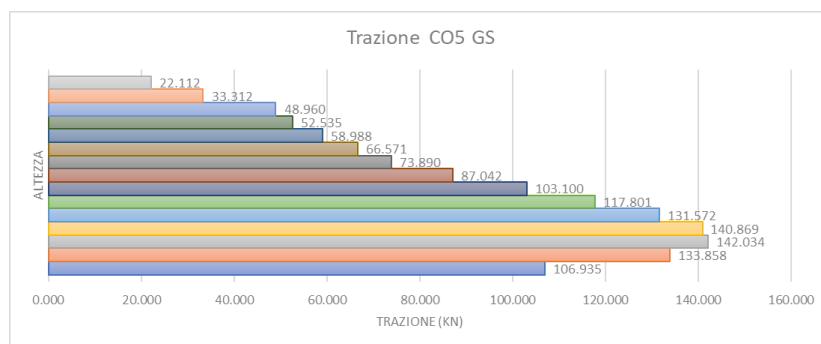


Figura 217: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti

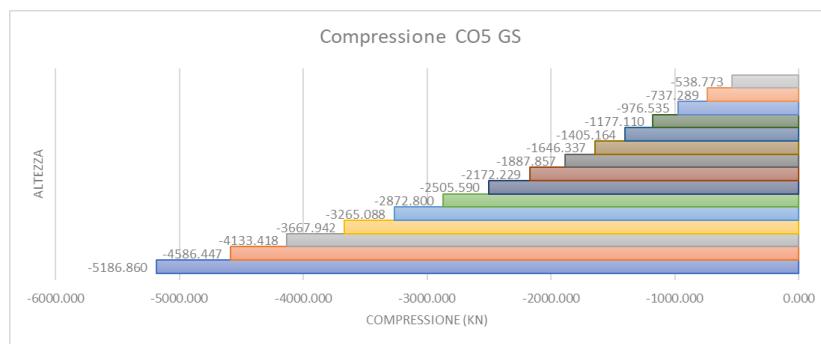


Figura 218: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 2 grandi spostamenti

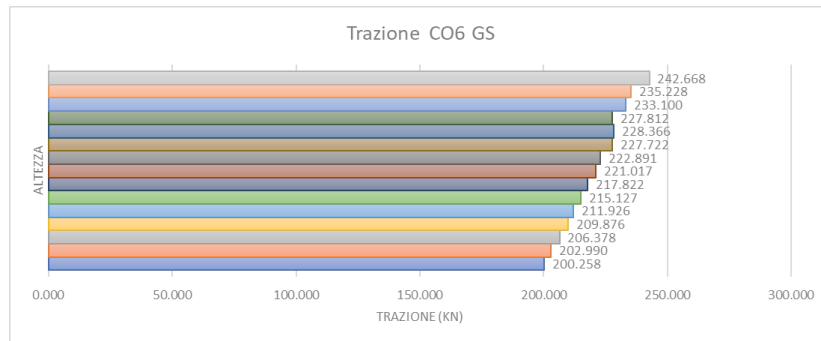


Figura 219: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 2 grandi spostamenti

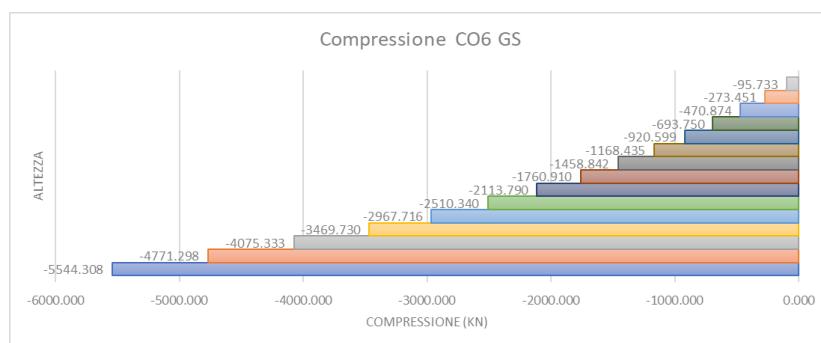


Figura 220: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 2 grandi spostamenti

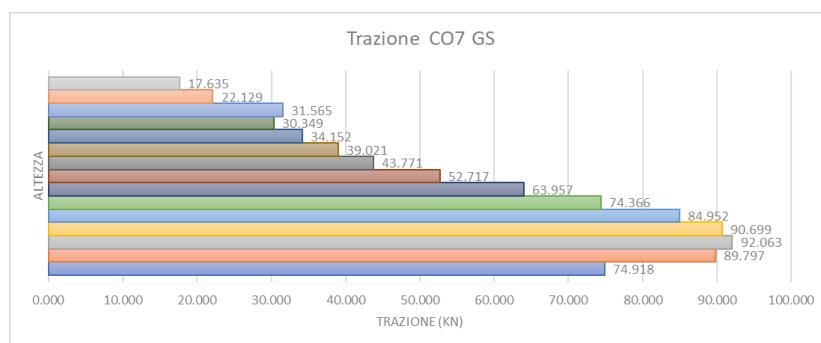


Figura 221: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 2 grandi spostamenti

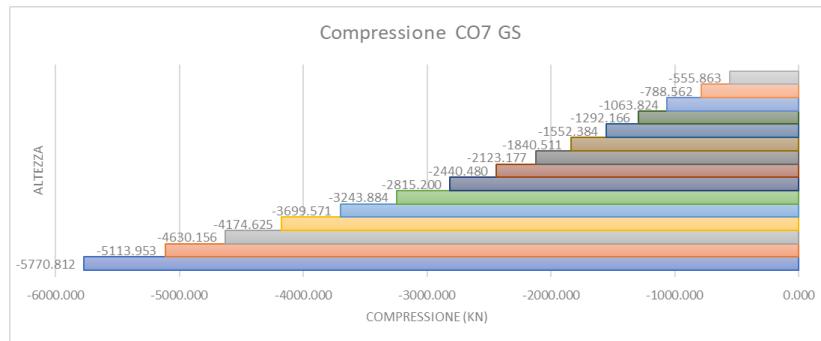


Figura 222: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 2 grandi spostamenti

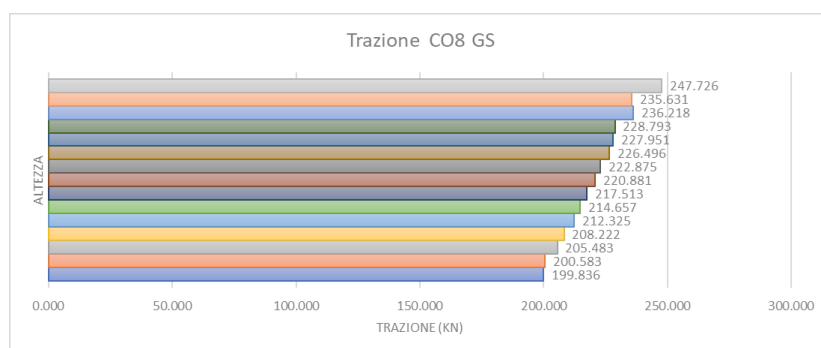


Figura 223: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 2 grandi spostamenti

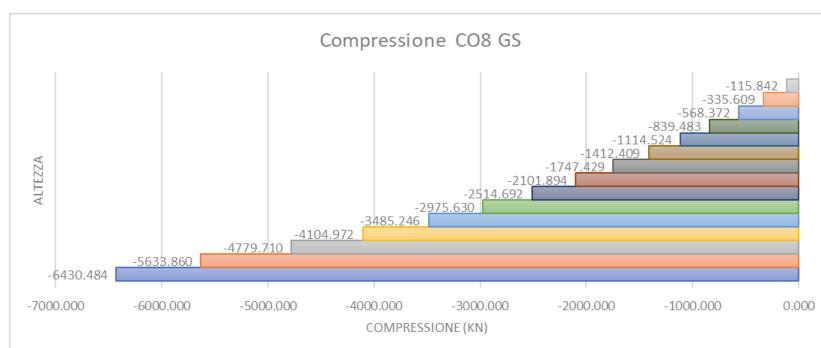


Figura 224: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 2 grandi spostamenti

Zona 3

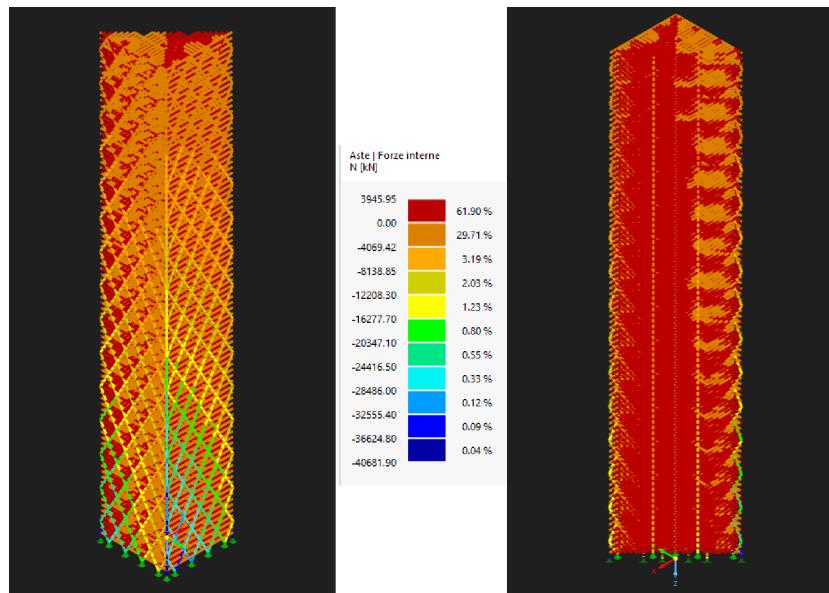


Figura 225: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 3

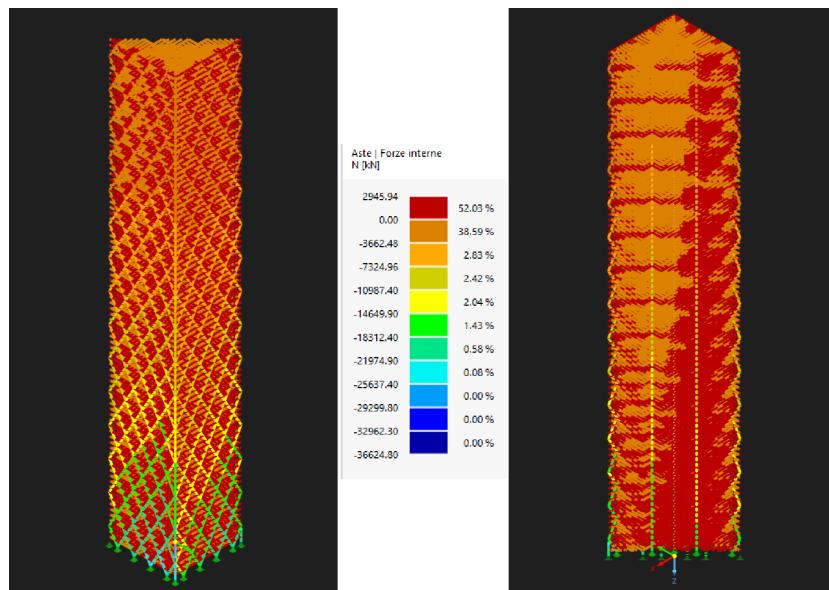


Figura 226: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 3

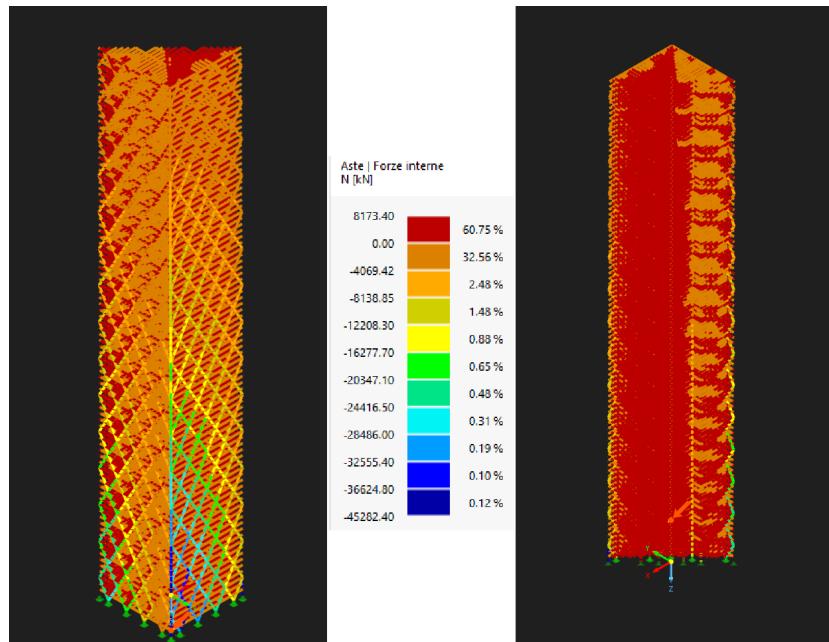


Figura 227: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 3

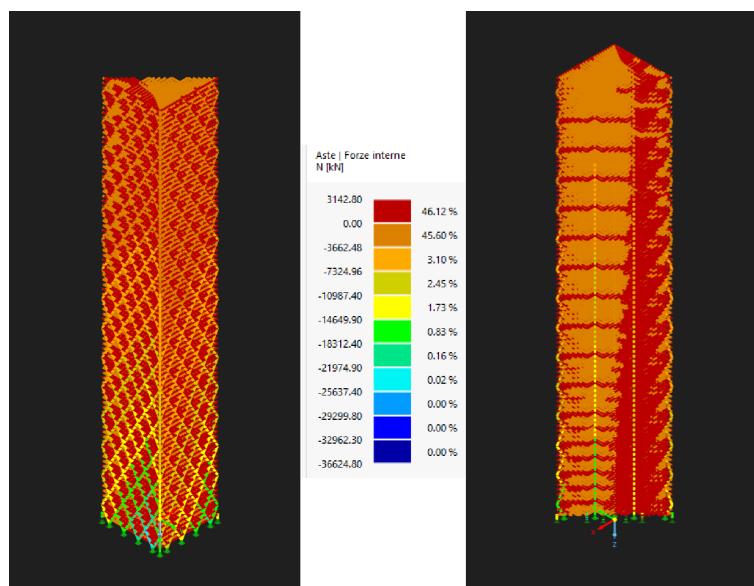


Figura 228: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 3

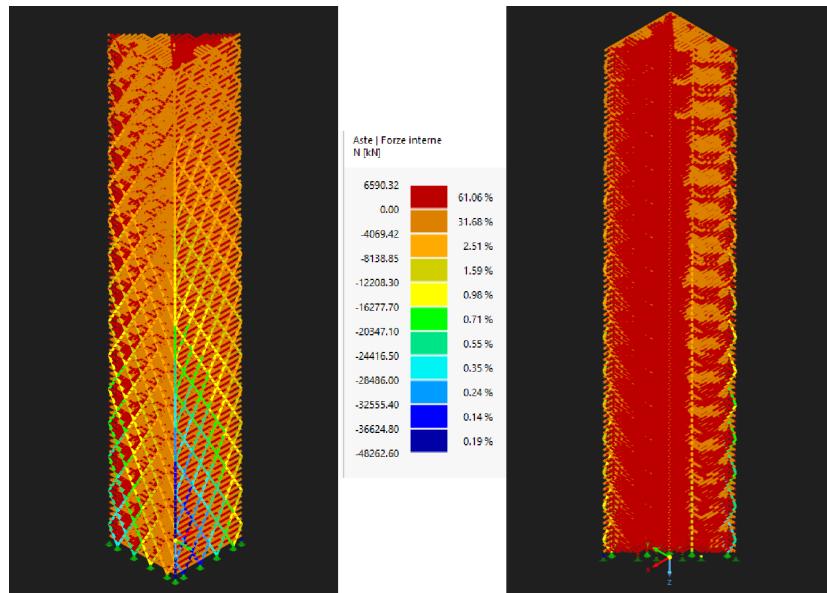


Figura 229: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 3

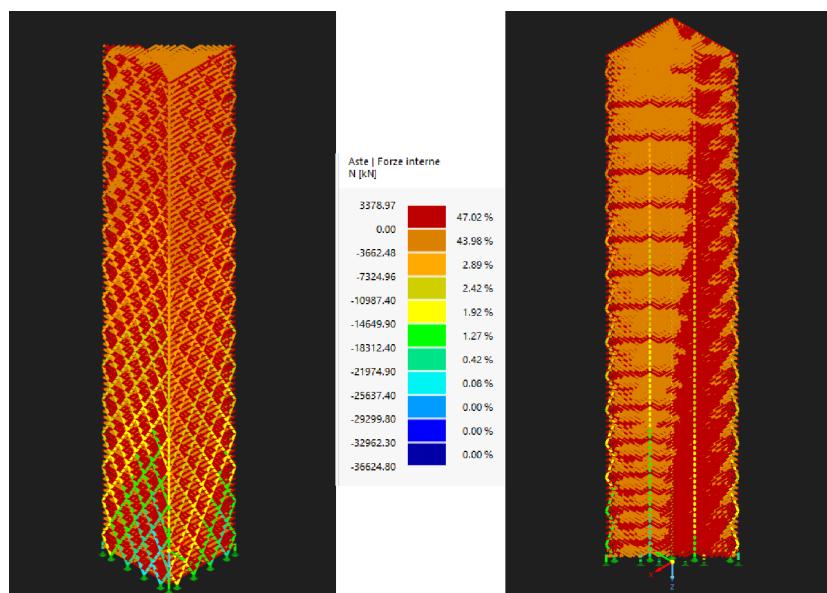


Figura 230: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 3

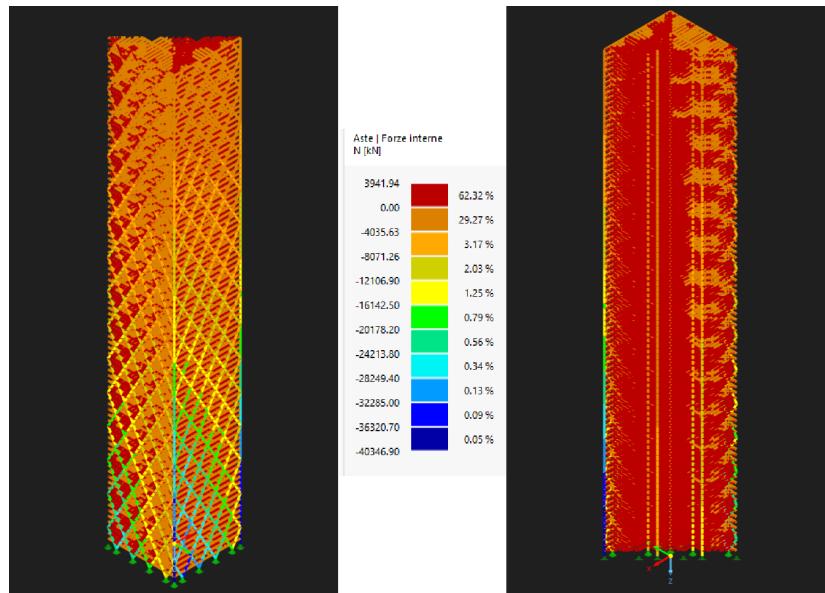


Figura 231: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 3 grandi spostamenti

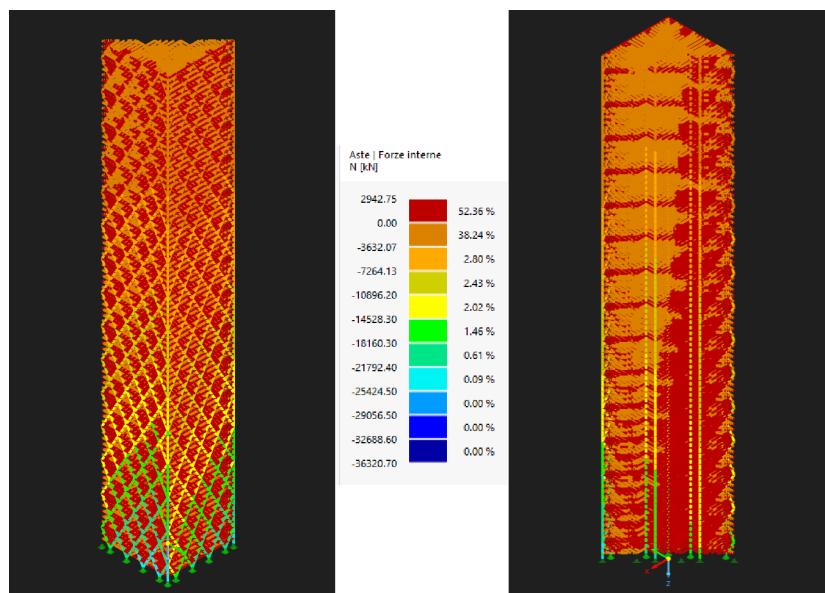


Figura 232: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti

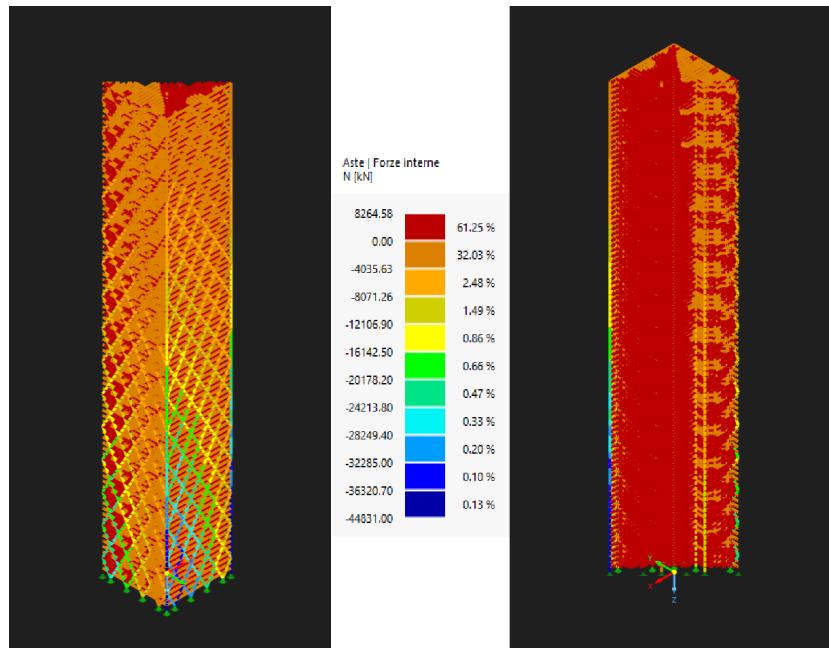


Figura 233: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti

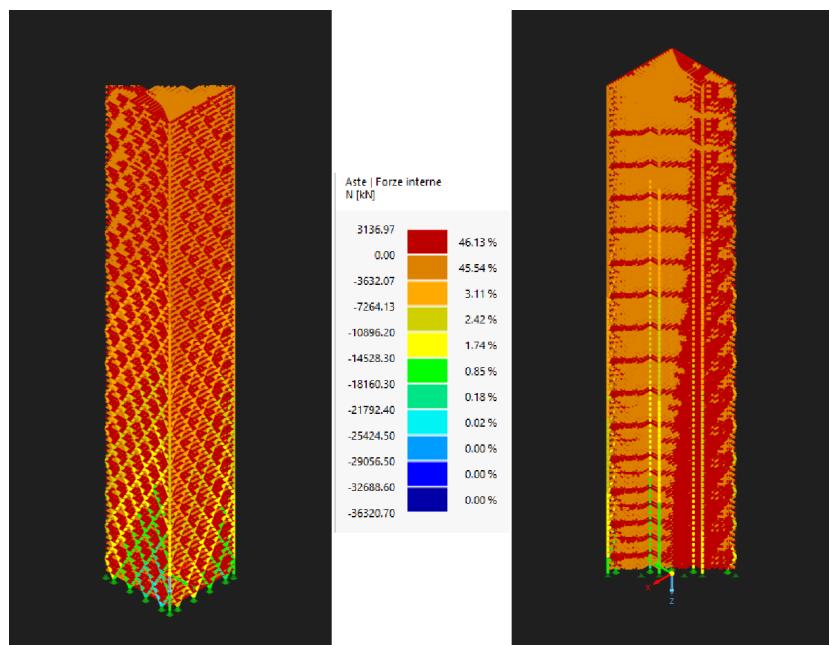


Figura 234: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 3 grandi spostamenti

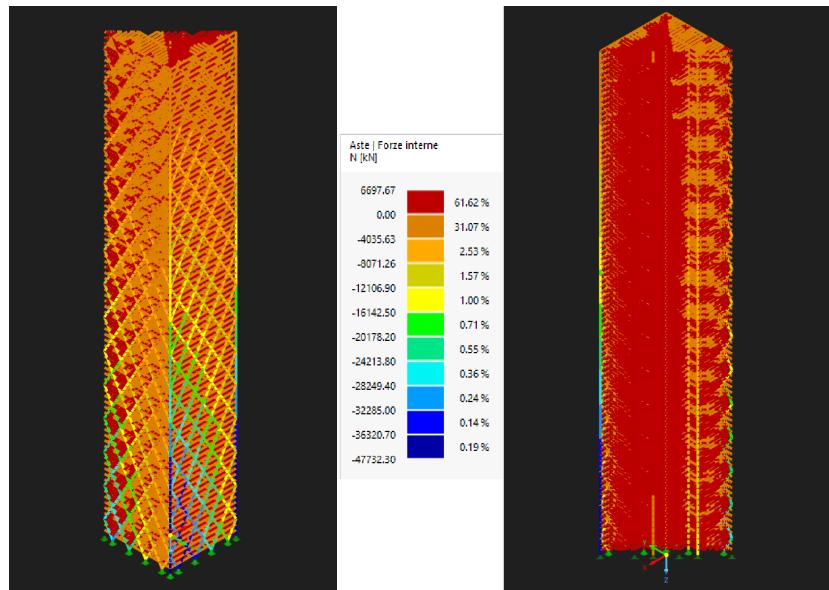


Figura 235: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti

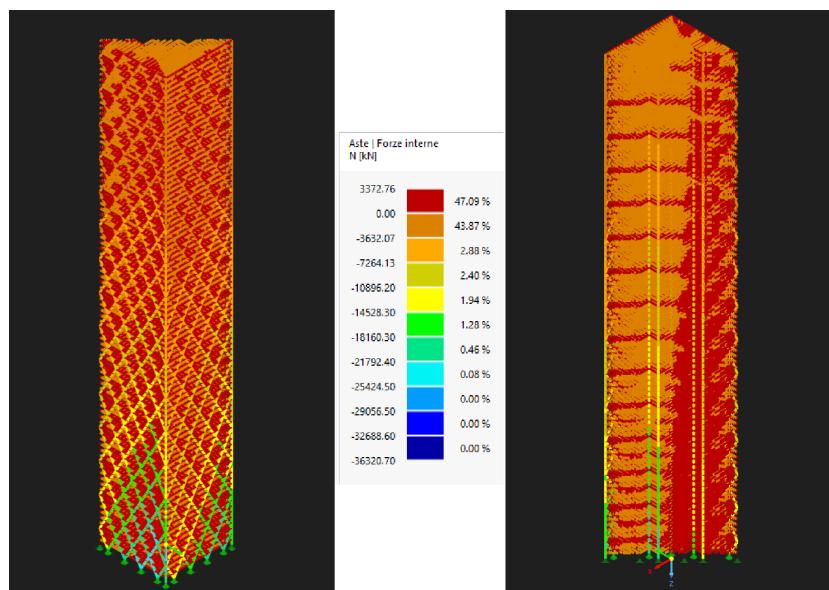


Figura 236: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti

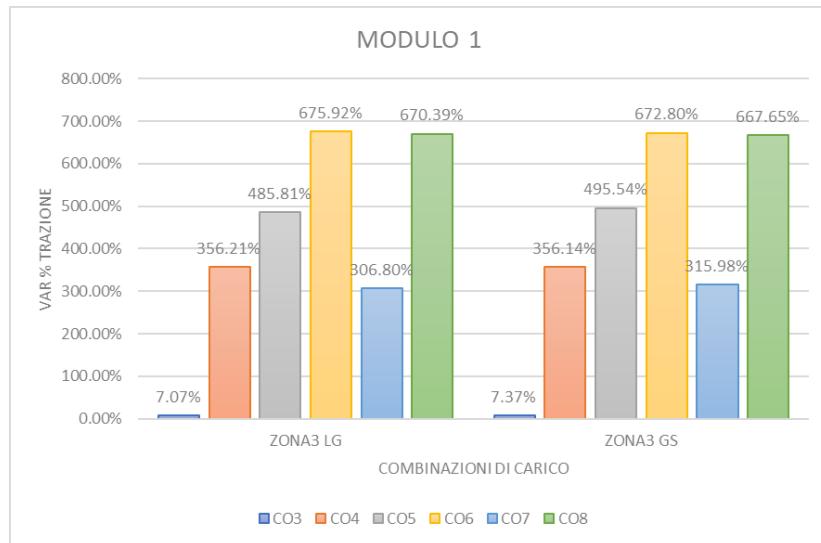


Figura 237: Variazione % trazione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 3

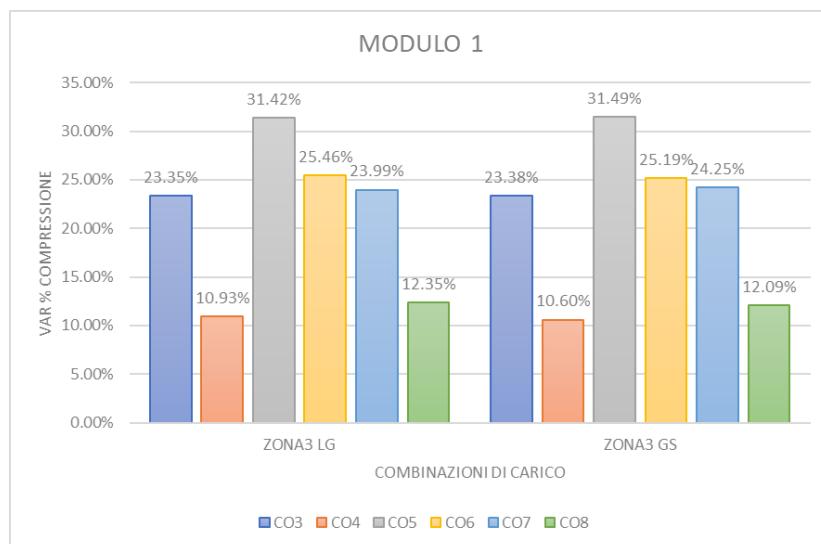


Figura 238: Variazione % compressione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 3

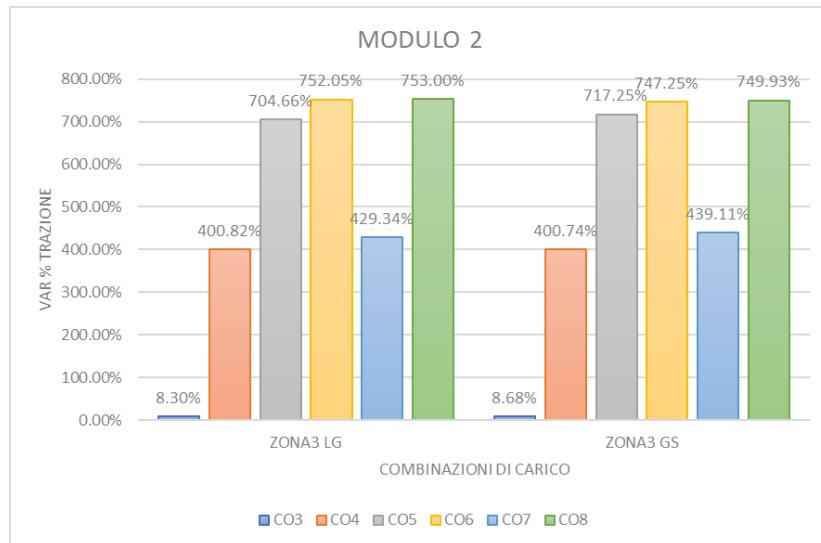


Figura 239: Variazione % trazione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 3

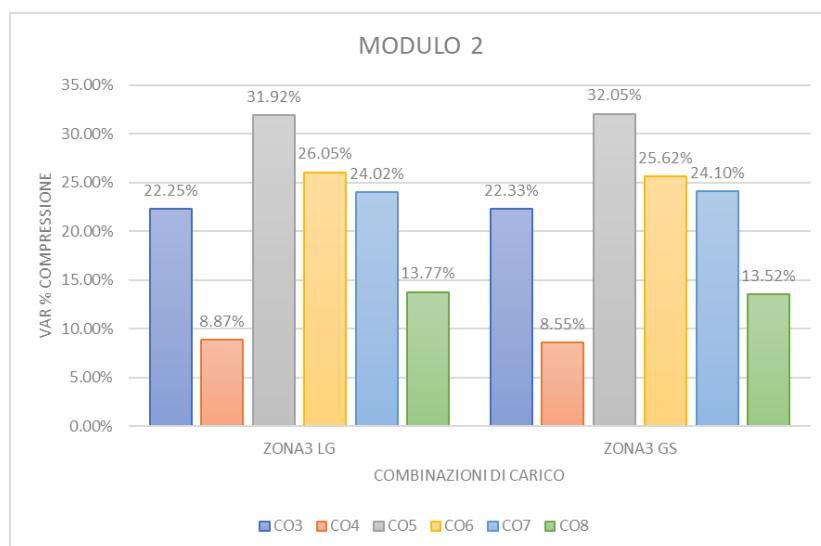


Figura 240: Variazione % compressione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 3

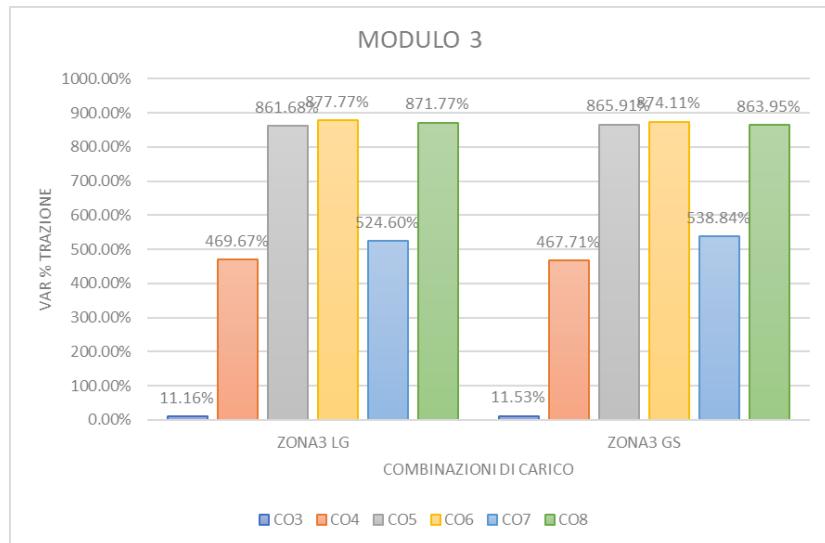


Figura 241: Variazione % trazione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, 16.389 kN; Zona 3

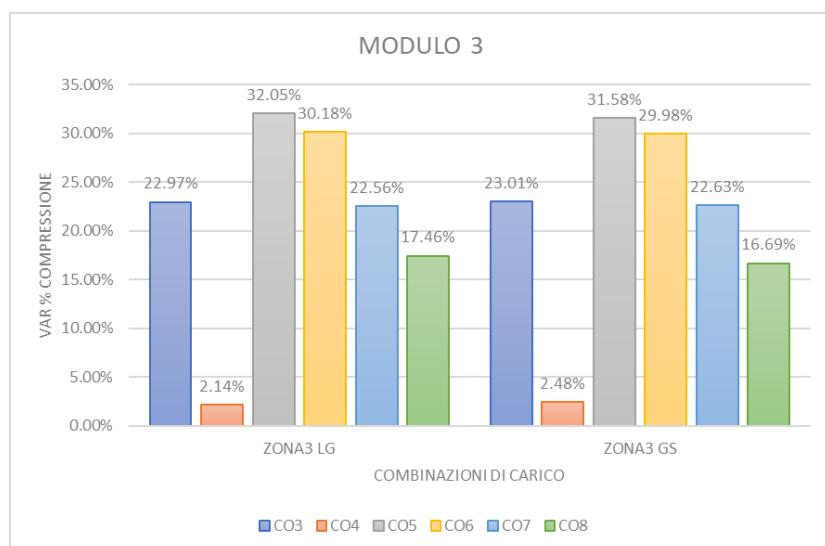


Figura 242: Variazione % compressione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, -6070.442 kN; Zona 3

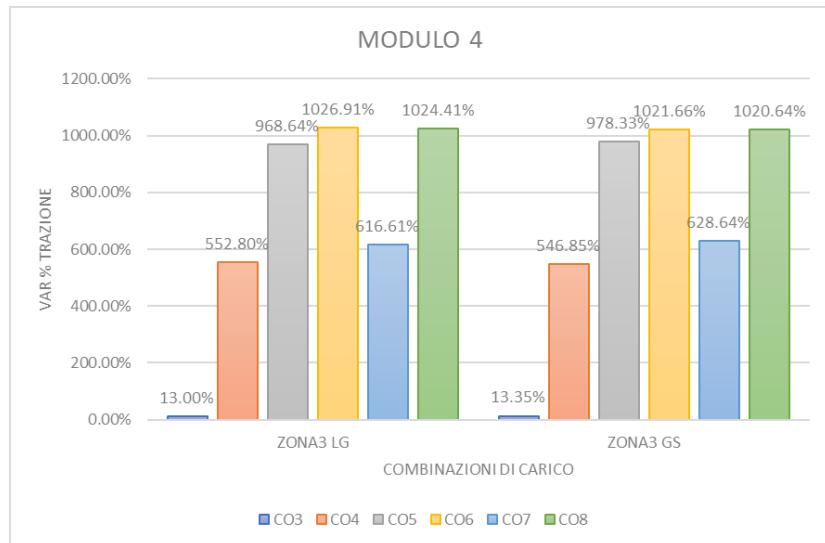


Figura 243: Variazione % trazione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, 14.449 kN; Zona 3

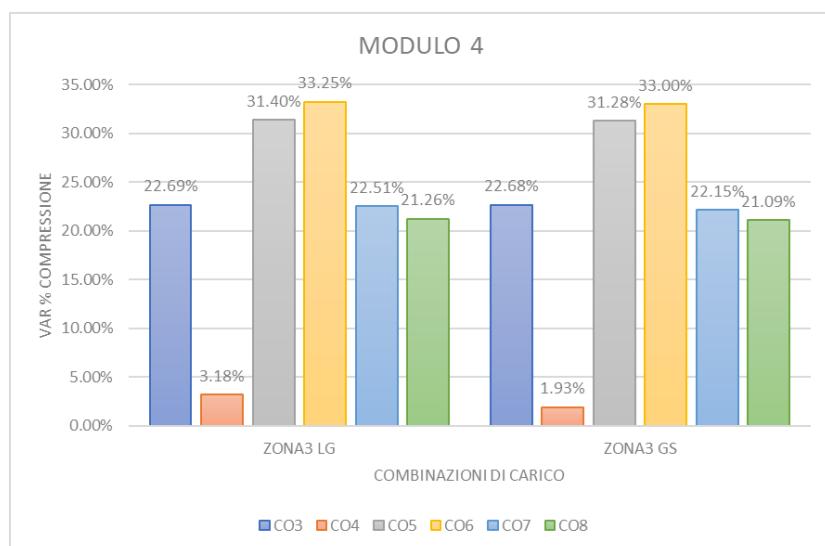


Figura 244: Variazione % compressione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, -5386.302 kN; Zona 3

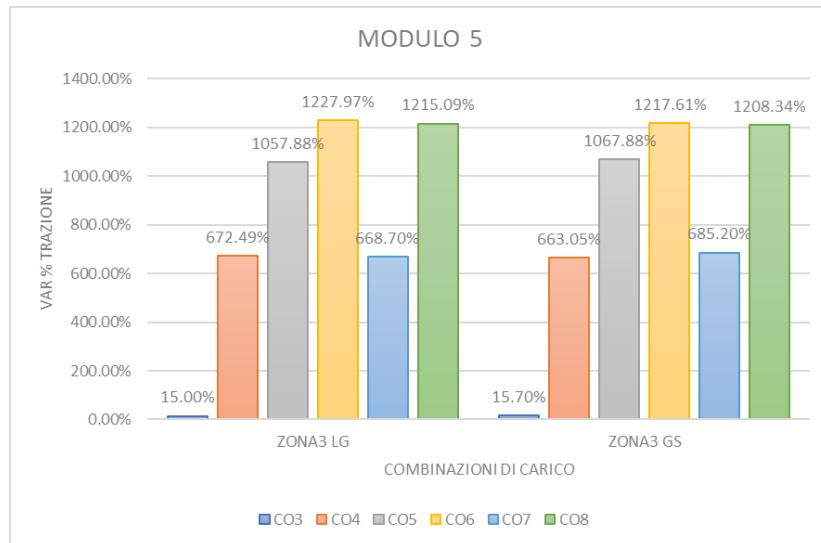


Figura 245: Variazione % trazione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, 12.564 kN; Zona 3

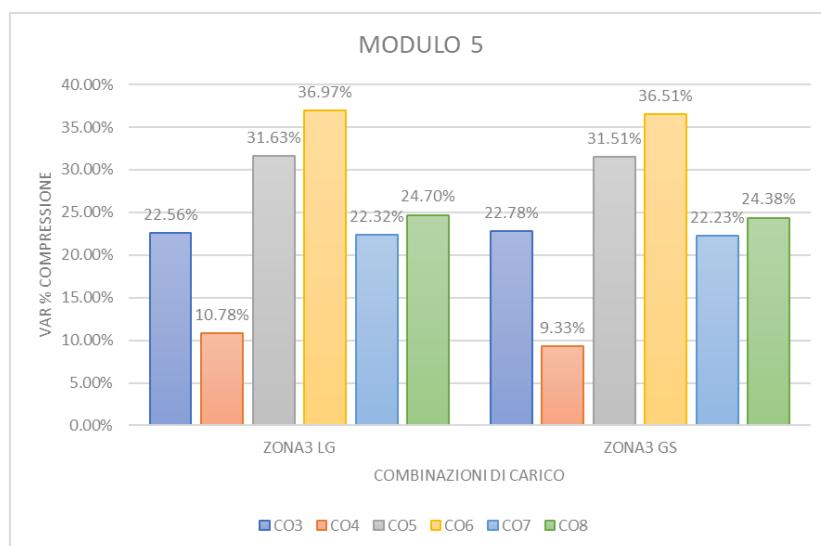


Figura 246: Variazione % compressione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, -4774-796 kN; Zona 3

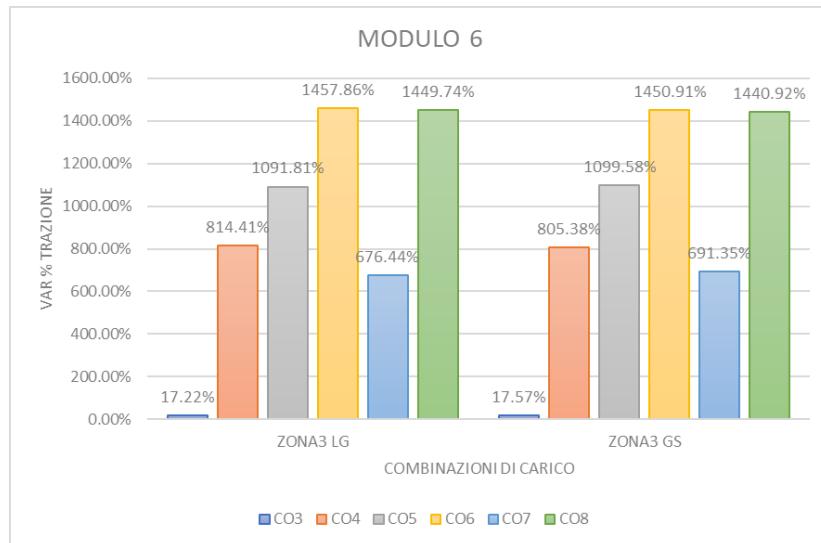


Figura 247: Variazione % trazione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, 10.868 kN; Zona 3

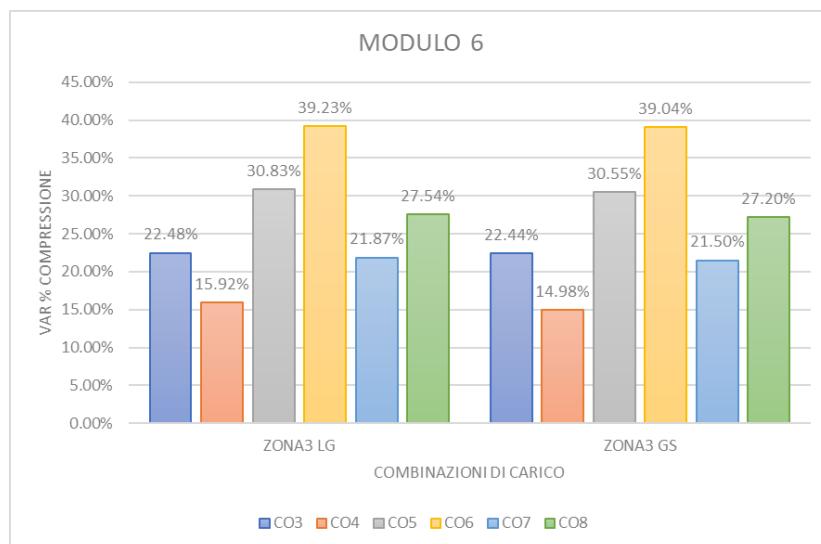


Figura 248: Variazione % compressione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, -4179.814 kN; Zona 3

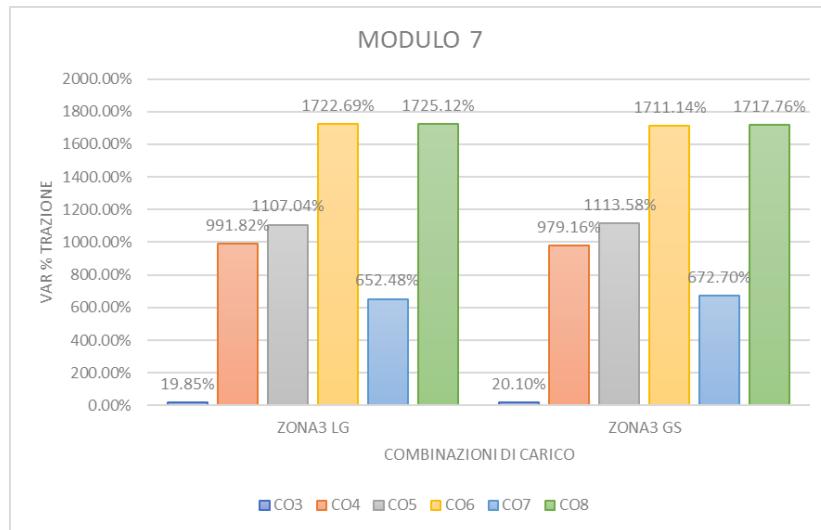


Figura 249: Variazione % trazione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, 9.395 kN; Zona 3

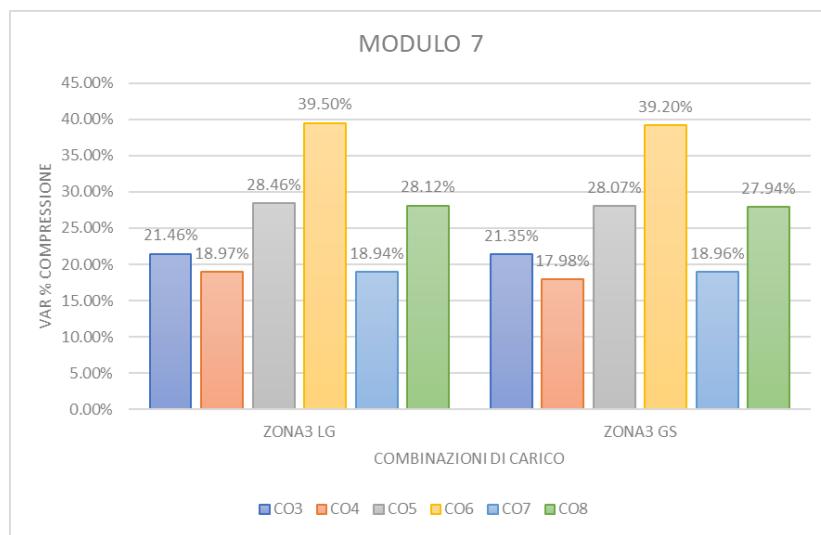


Figura 250: Variazione % compressione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, -3531.725 kN; Zona 3

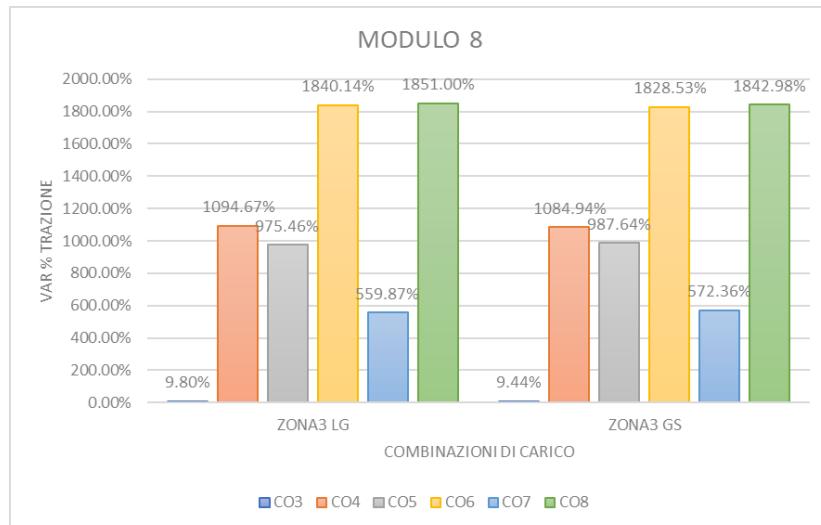


Figura 251: Variazione % trazione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, 8.396 kN; Zona 3

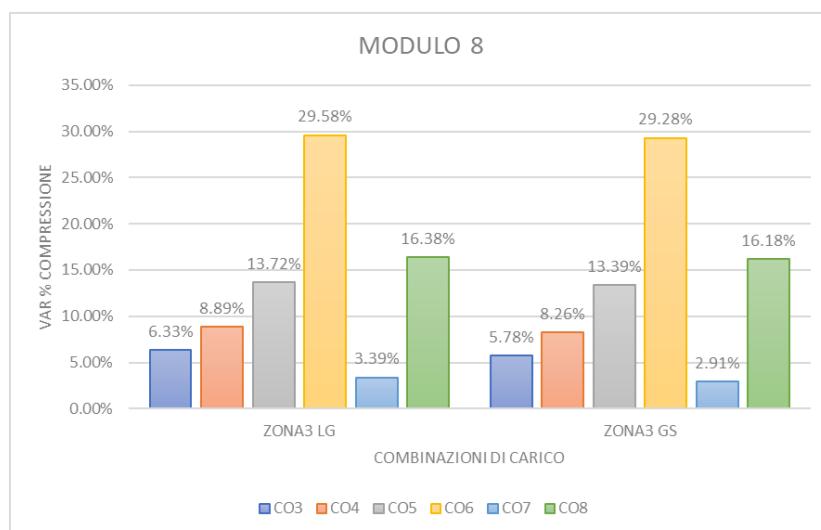


Figura 252: Variazione % compressione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, -2528.914 kN; Zona 3

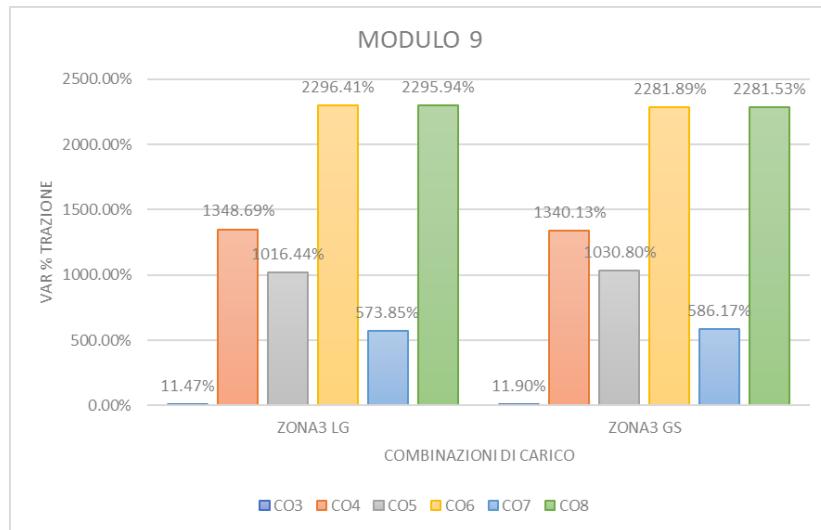


Figura 253: Variazione % trazione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, 7.299 kN; Zona 3

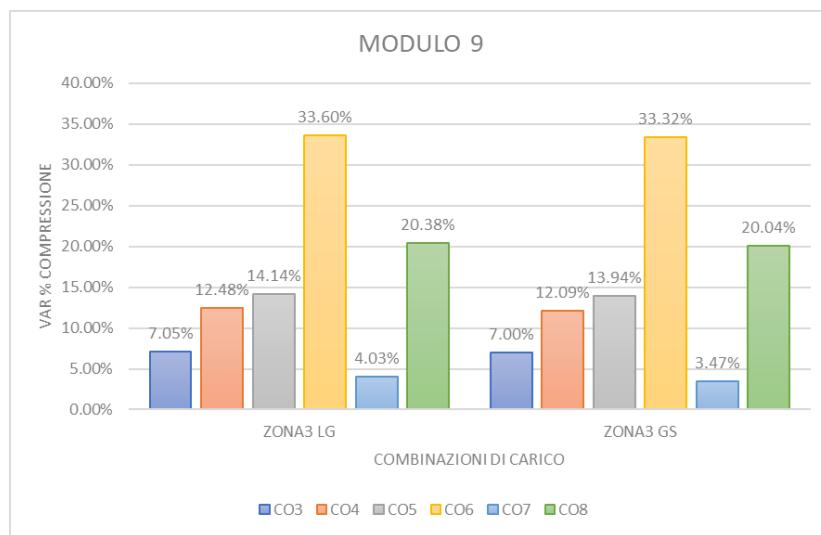


Figura 254: Variazione % compressione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, -2217.615 kN; Zona 3

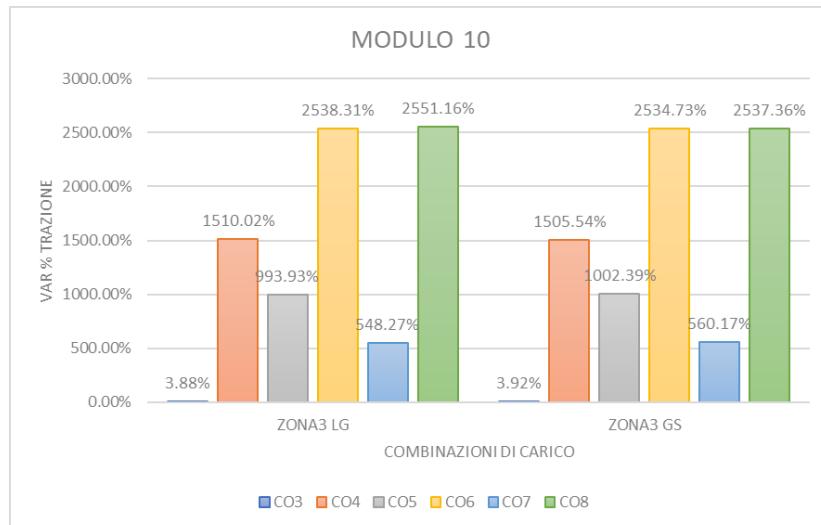


Figura 255: Variazione % trazione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, 6.737 kN; Zona 3

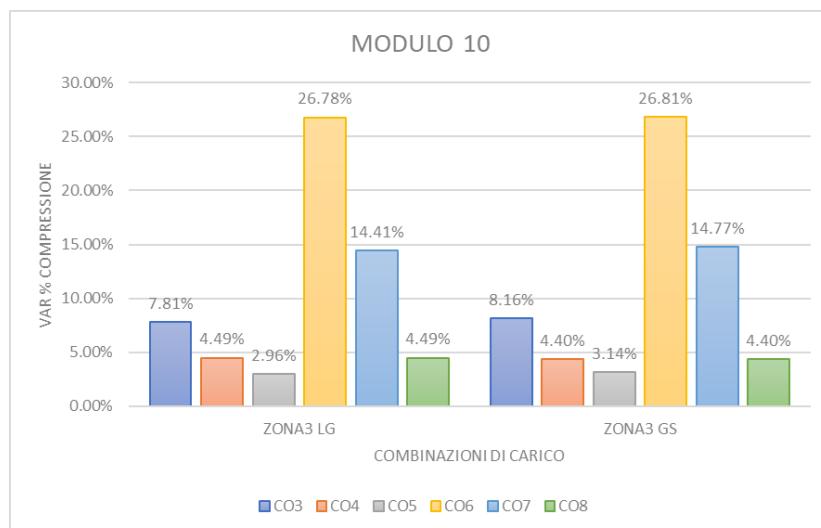


Figura 256: Variazione % compressione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, -1616.439 kN; Zona 3

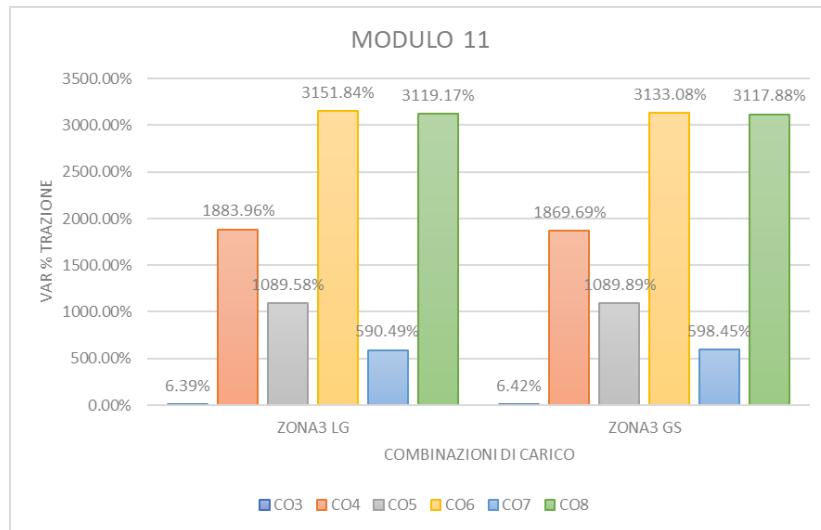


Figura 257: Variazione % trazione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, 5.542 kN; Zona 3

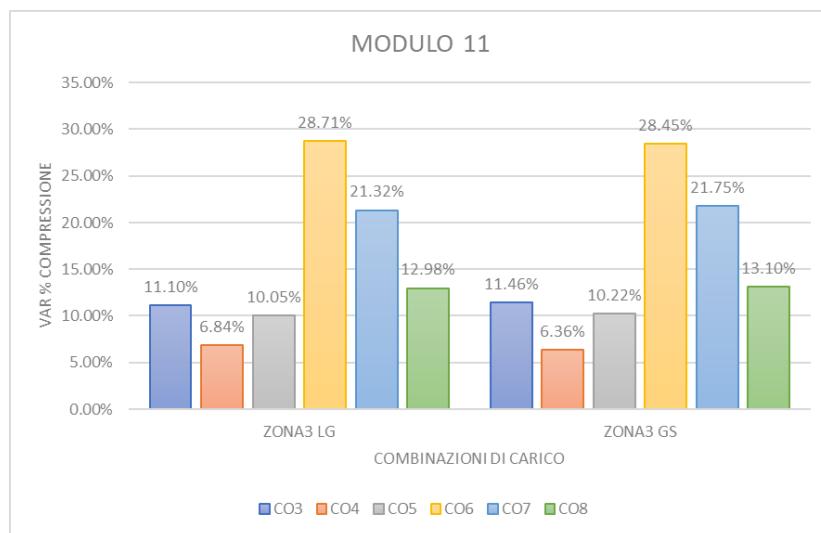


Figura 258: Variazione % compressione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, -1293.297 kN; Zona 3

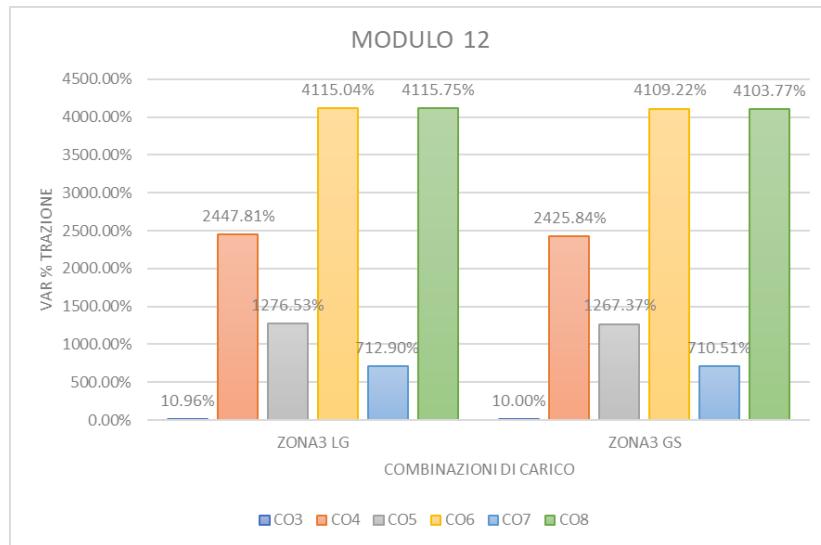


Figura 259: Variazione % trazione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, 4.245 kN; Zona 3

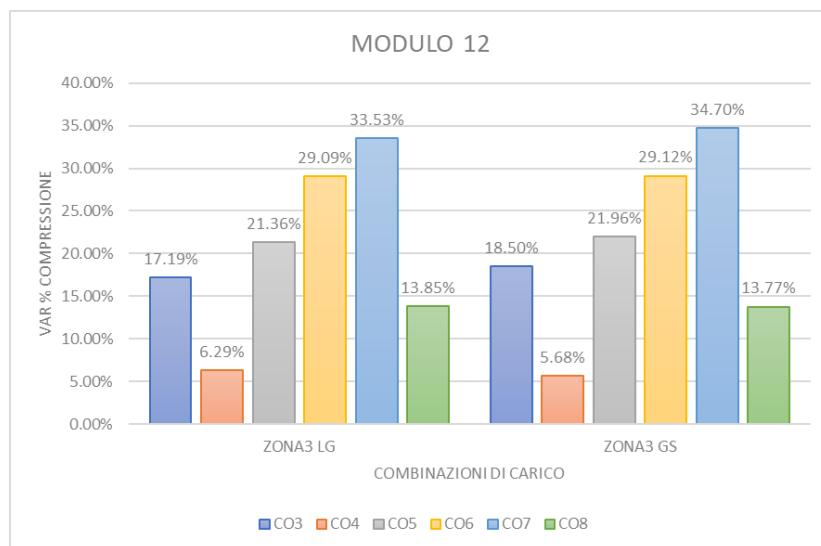


Figura 260: Variazione % compressione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, -983.055 kN; Zona 3

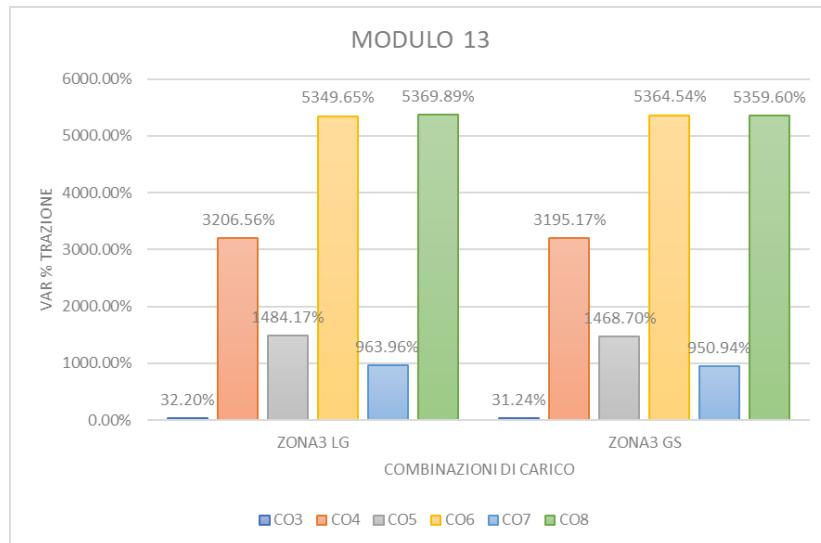


Figura 261: Variazione % trazione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, 3.401 kN; Zona 3

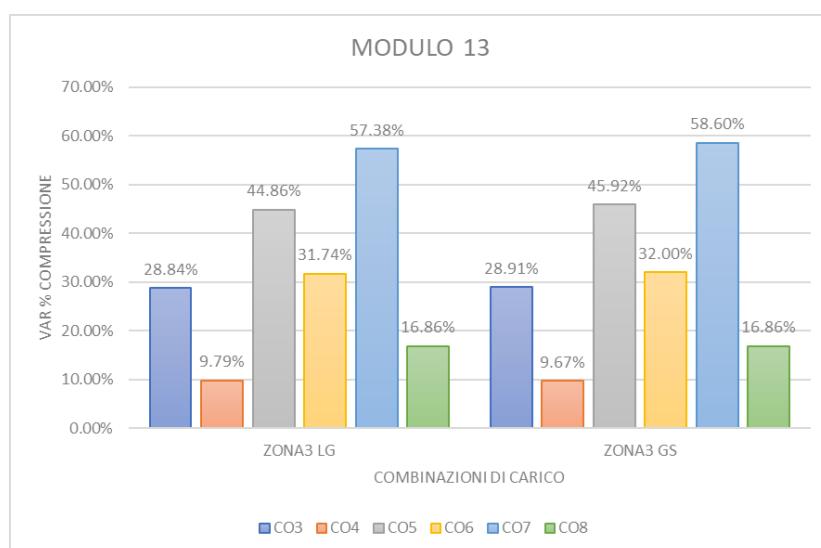


Figura 262: Variazione % compressione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, -684.734 kN; Zona 3

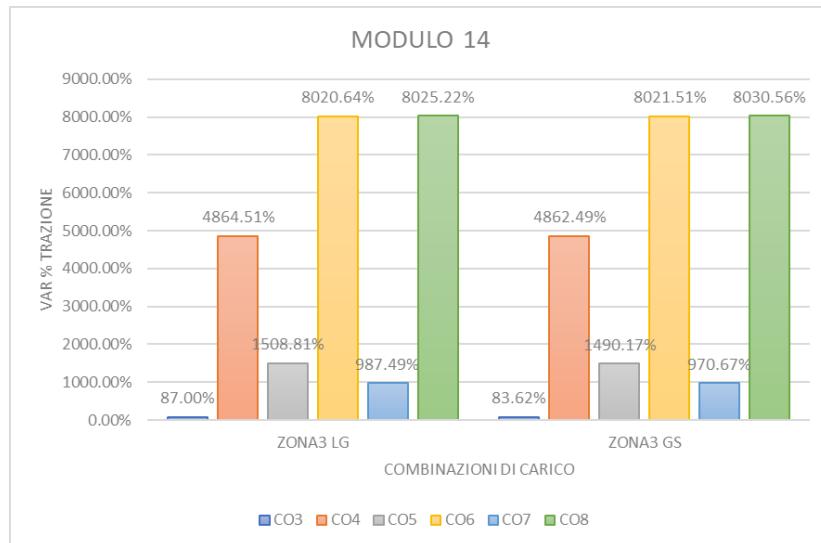


Figura 263: Variazione % trazione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, 2.271 kN; Zona 3

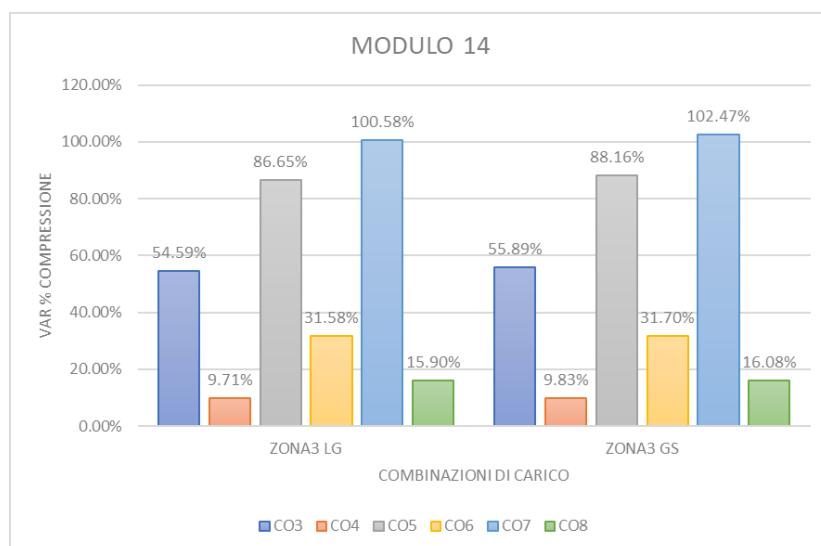


Figura 264: Variazione % compressione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, -401.080 kN; Zona 3

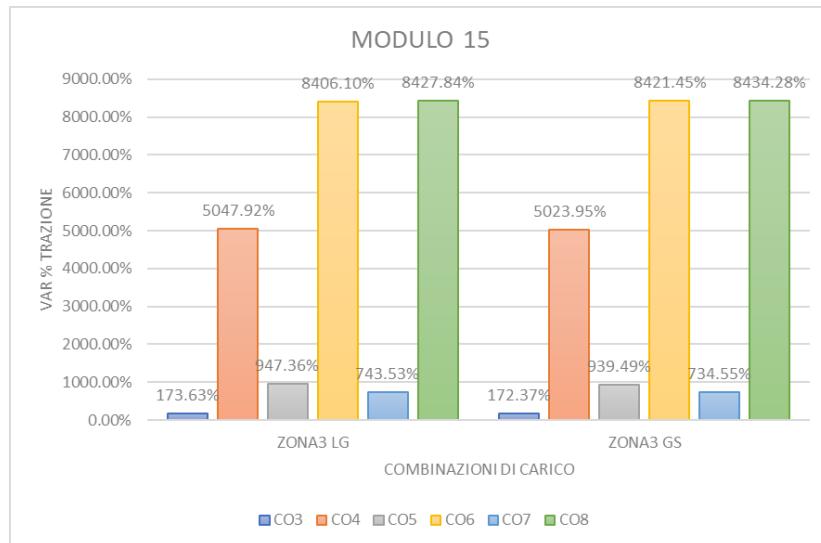


Figura 265: Variazione % trazione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, 2.269 kN; Zona 3

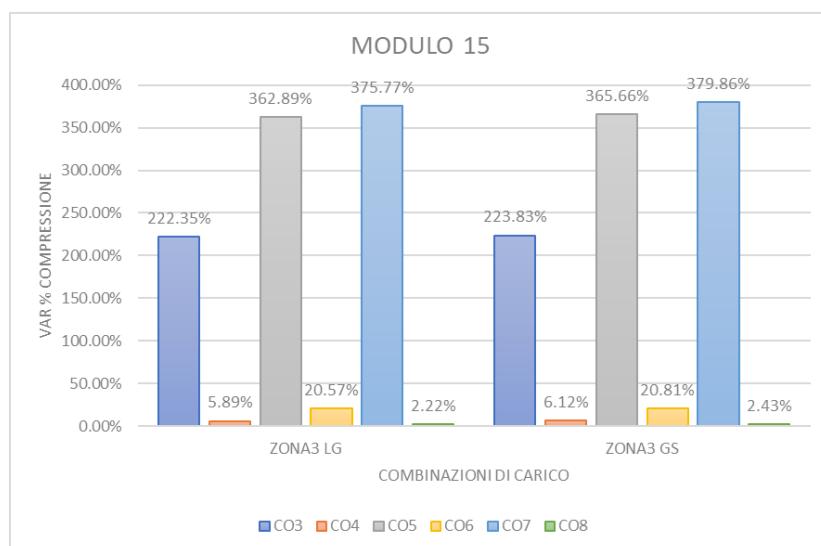


Figura 266: Variazione % compressione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, -119.021 kN; Zona 3

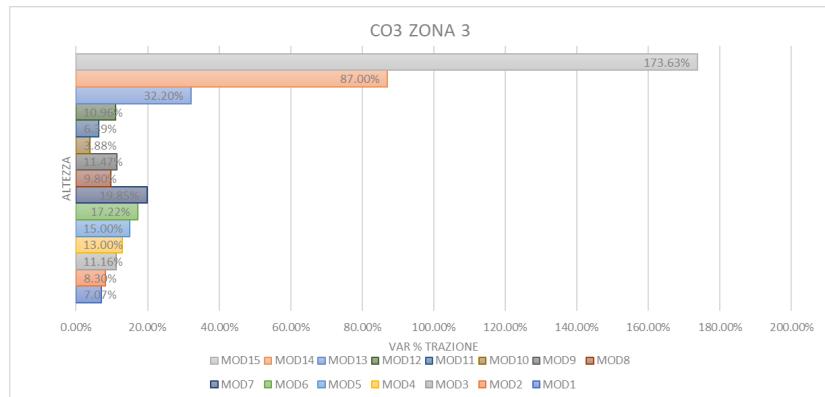


Figura 267: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 3

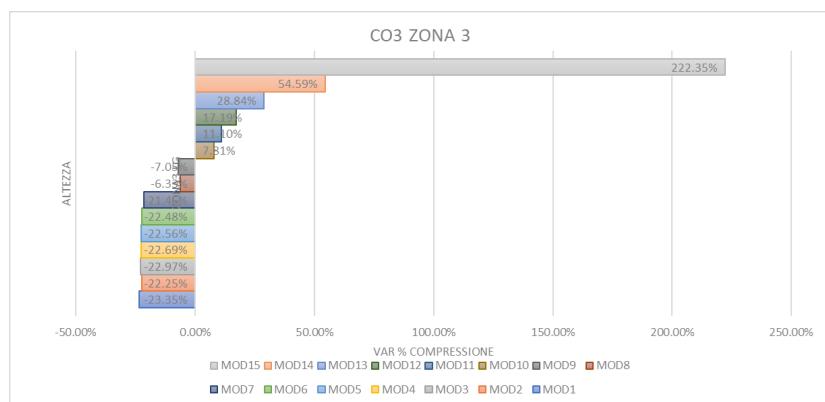


Figura 268: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 3

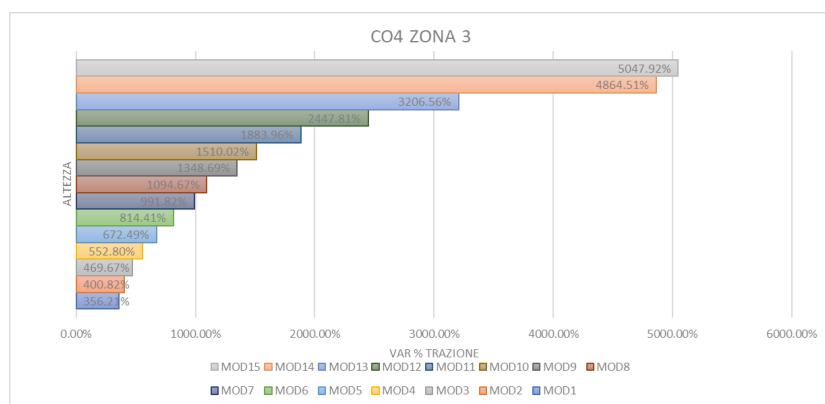


Figura 269: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 3

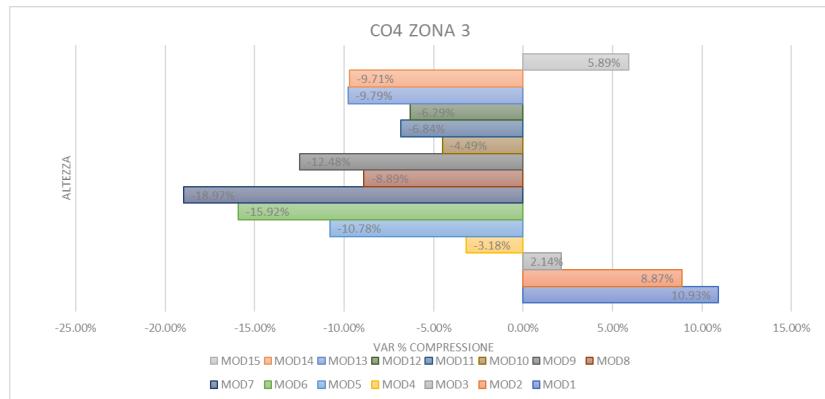


Figura 270: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 3

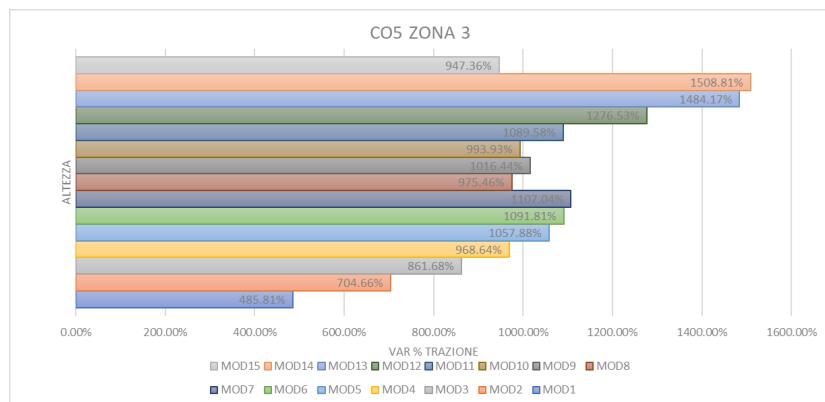


Figura 271: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 3

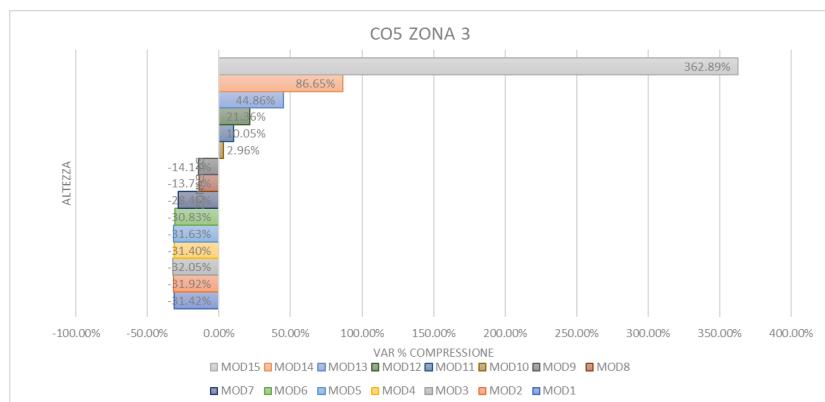


Figura 272: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 3

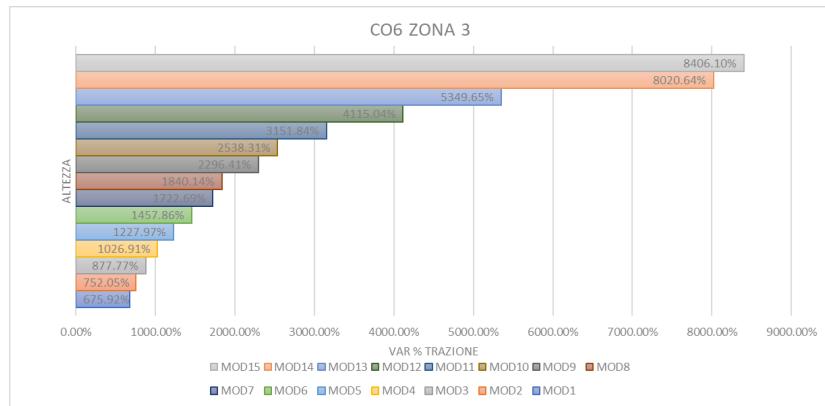


Figura 273: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 3

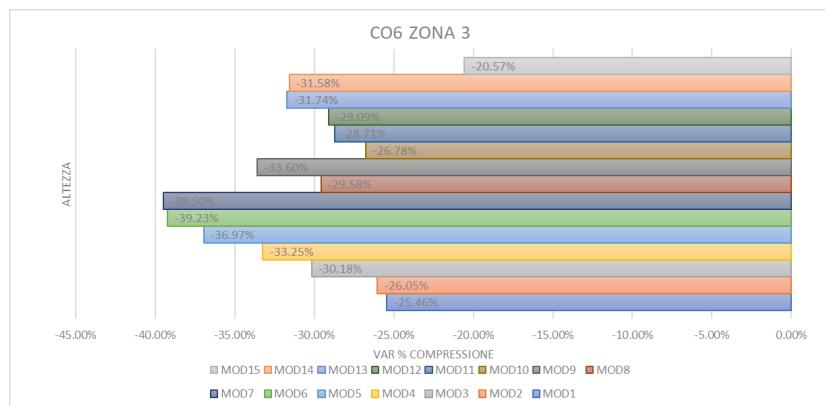


Figura 274: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 3

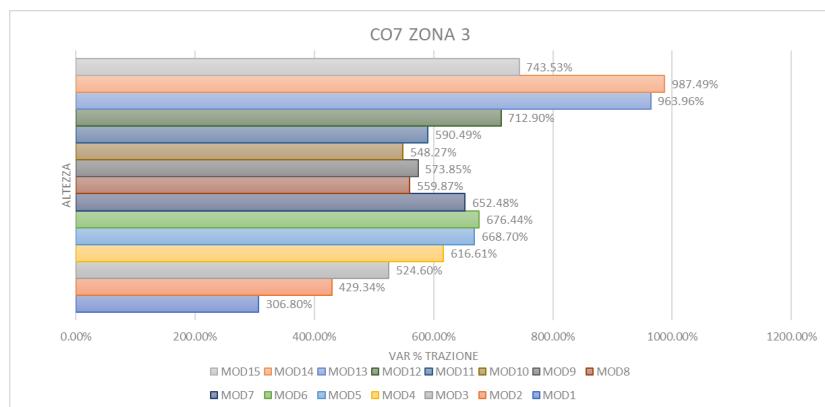


Figura 275: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 3

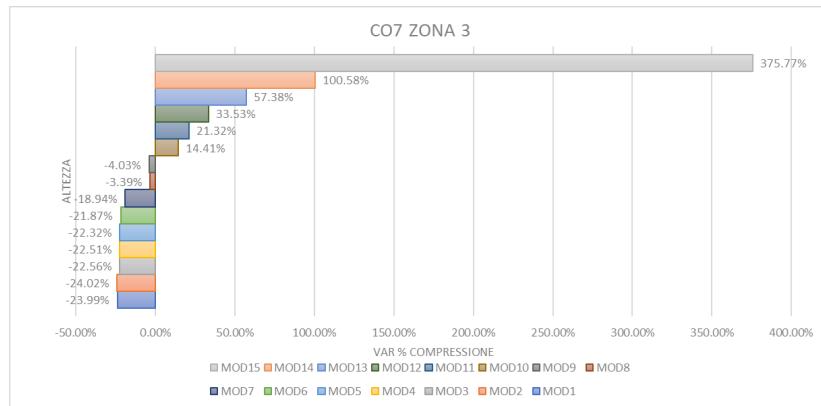


Figura 276: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 3

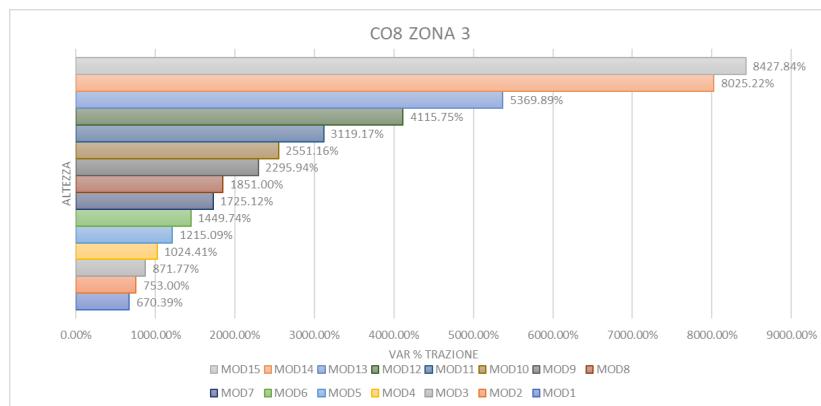


Figura 277: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 3

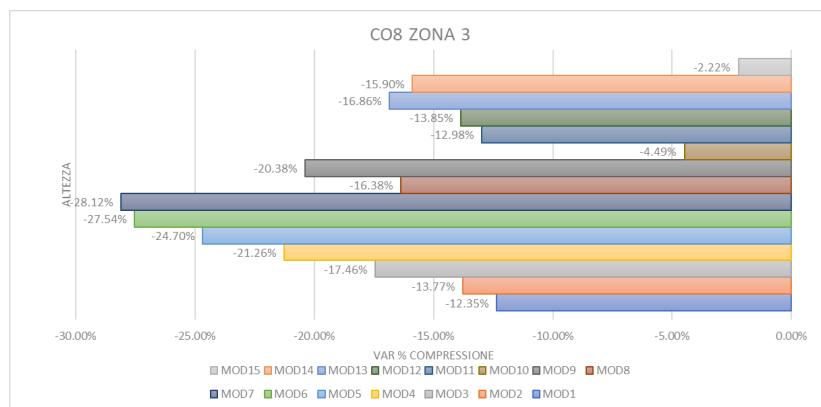


Figura 278: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 3

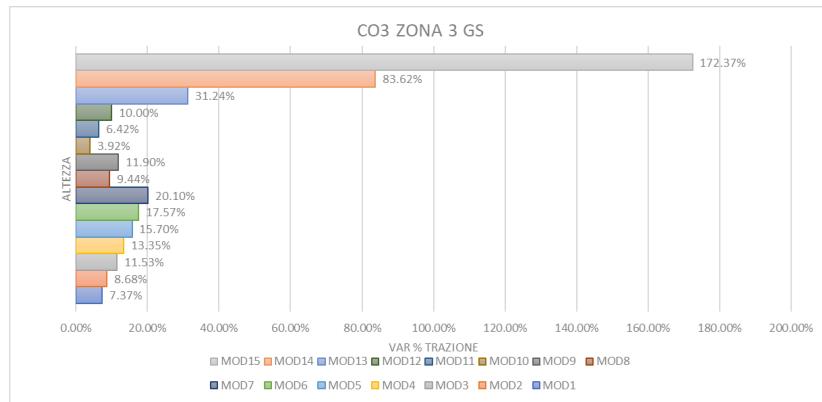


Figura 279: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 3
grandi spostamenti

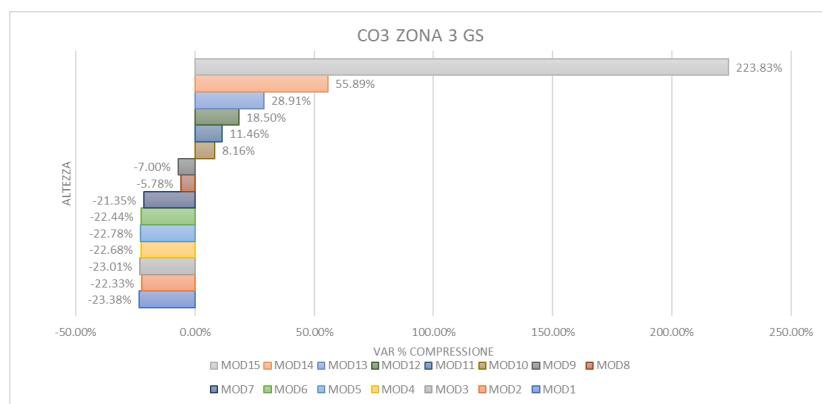


Figura 280: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 3
grandi spostamenti

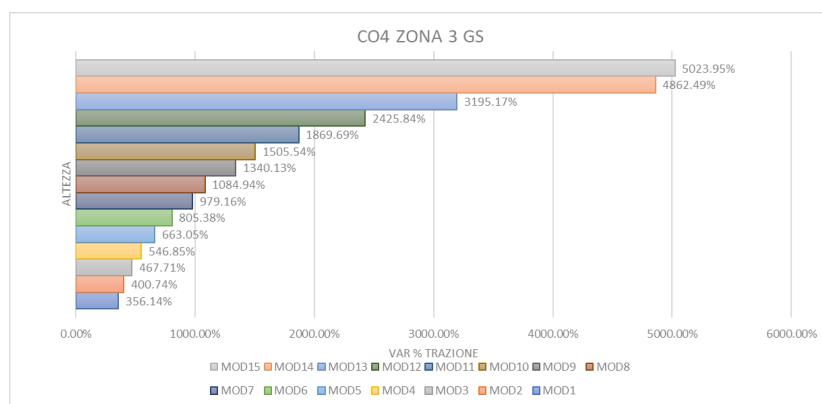


Figura 281: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 3
grandi spostamenti

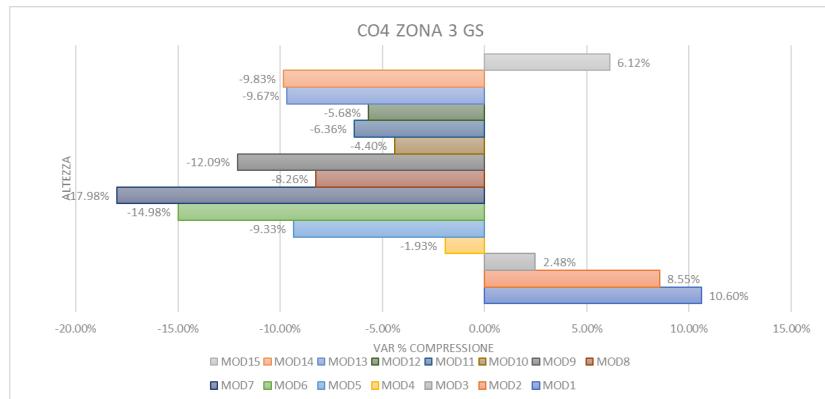


Figura 282: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti

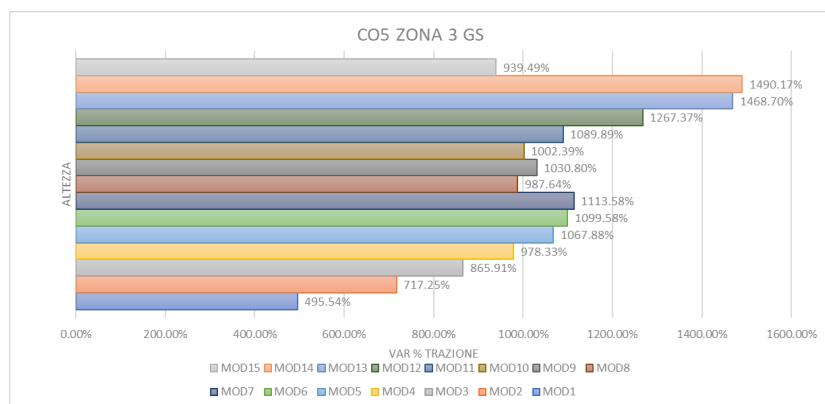


Figura 283: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti

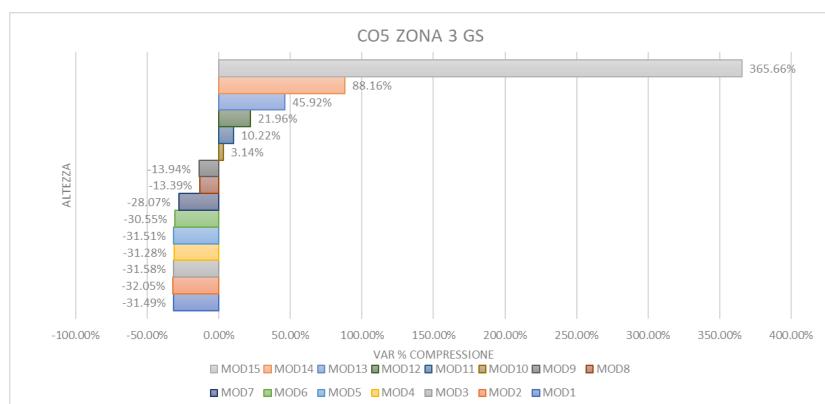


Figura 284: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti

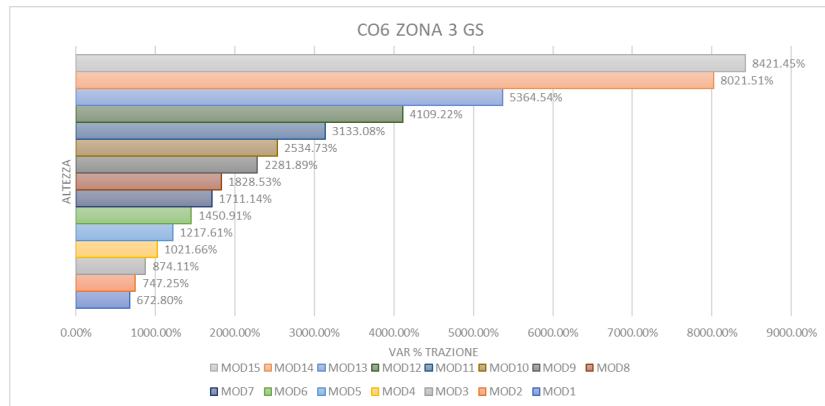


Figura 285: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 3
grandi spostamenti

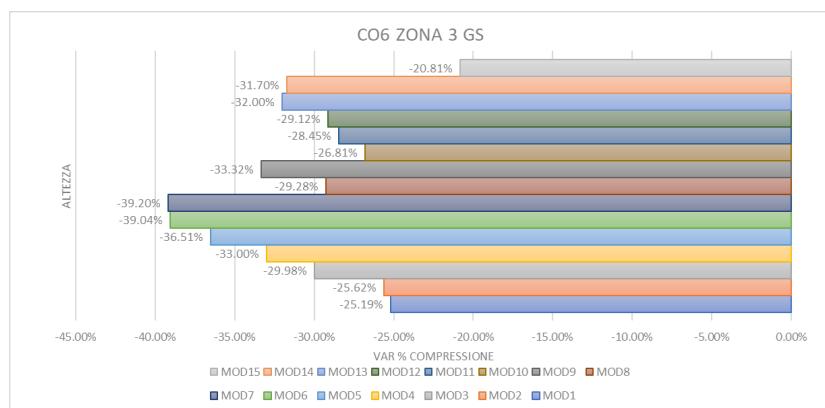


Figura 286: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 3
grandi spostamenti

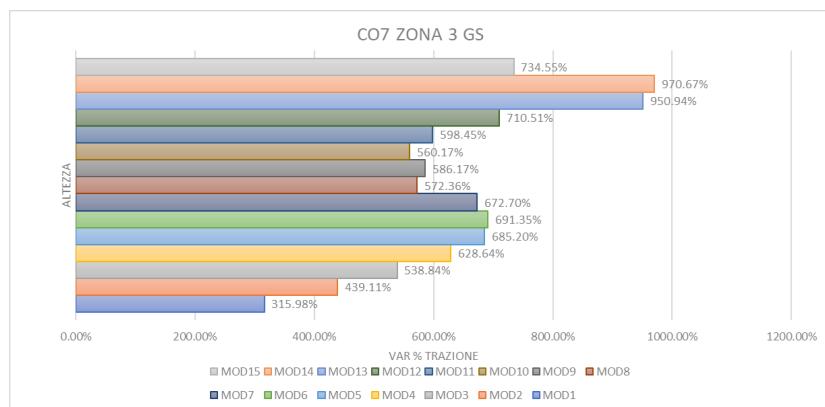


Figura 287: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 3
grandi spostamenti

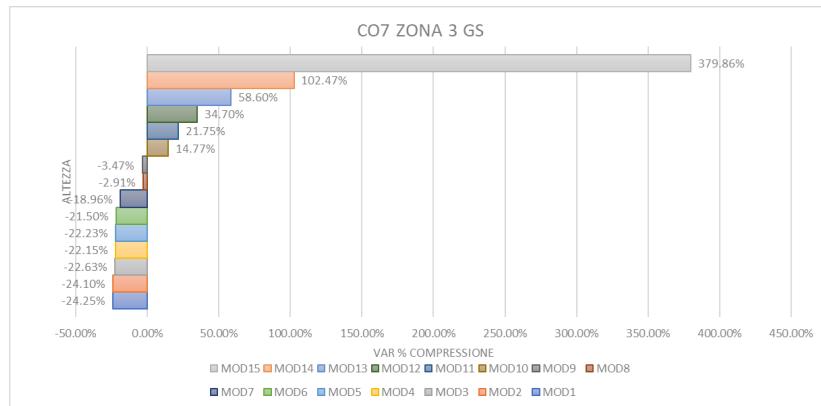


Figura 288: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti

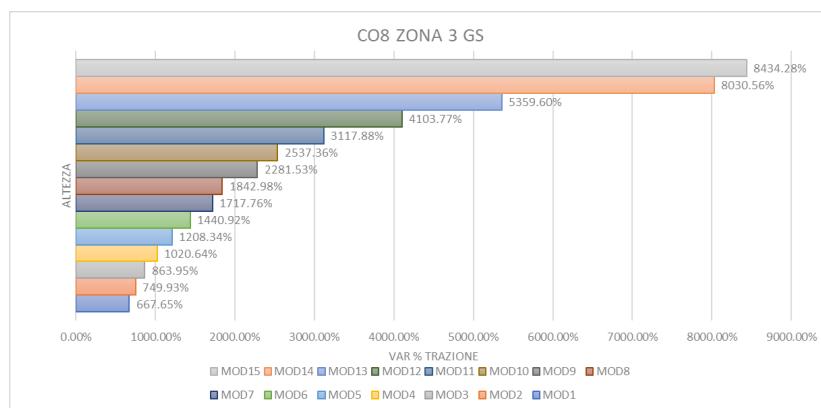


Figura 289: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti

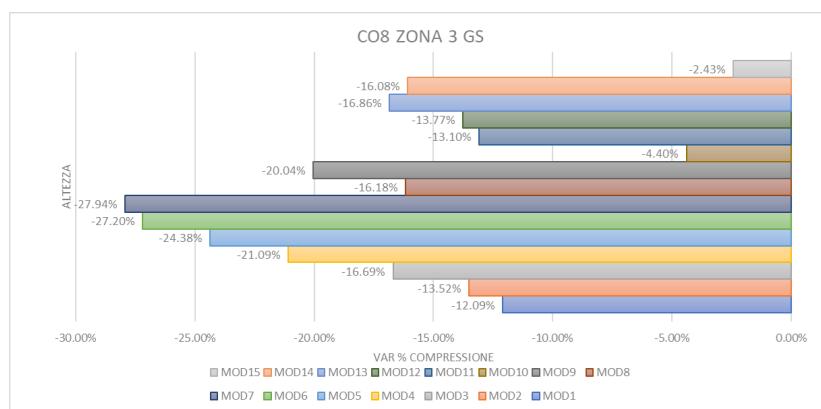


Figura 290: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti

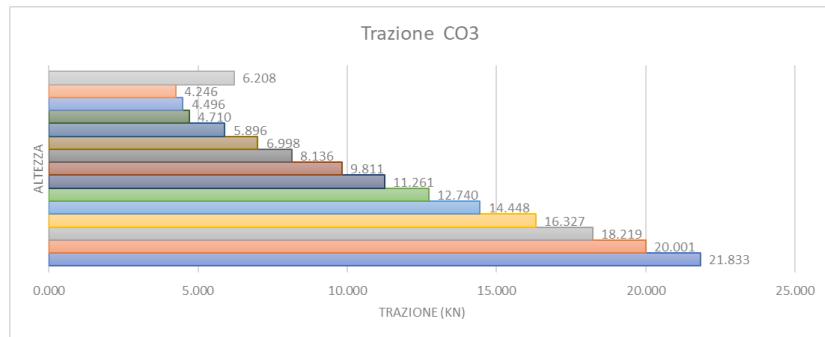


Figura 291: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 3

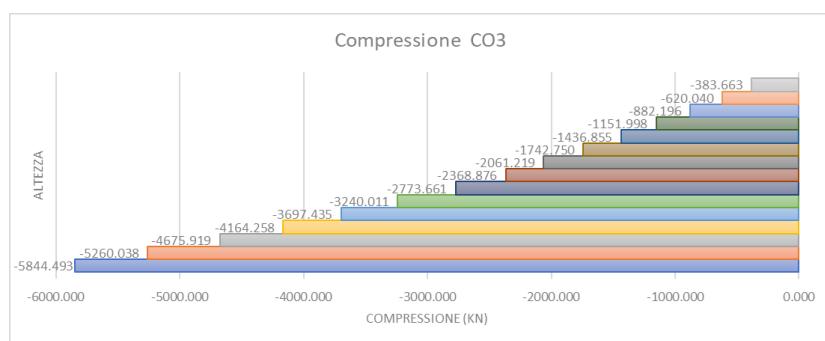


Figura 292: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 3

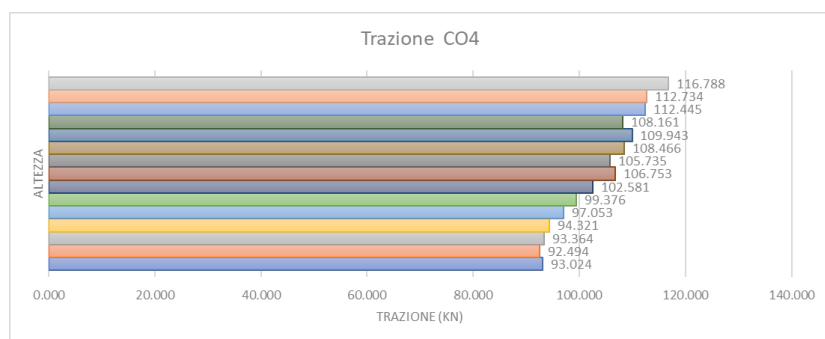


Figura 293: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 3

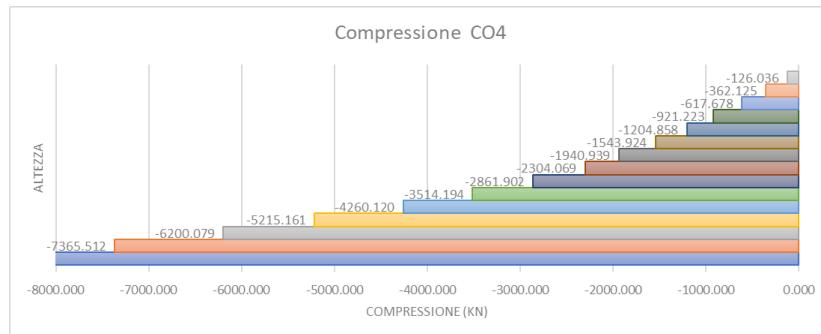


Figura 294: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 3

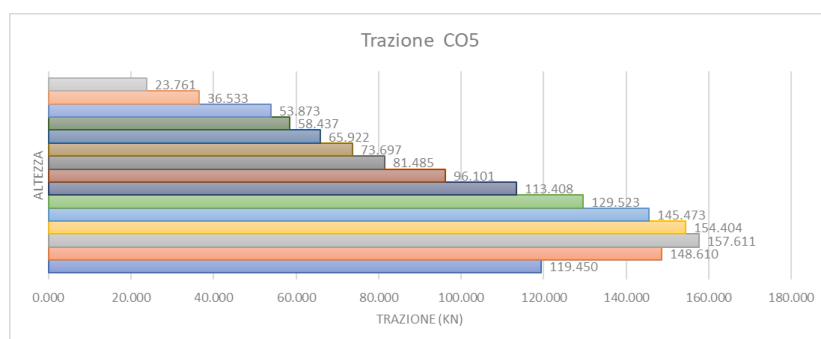


Figura 295: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 3

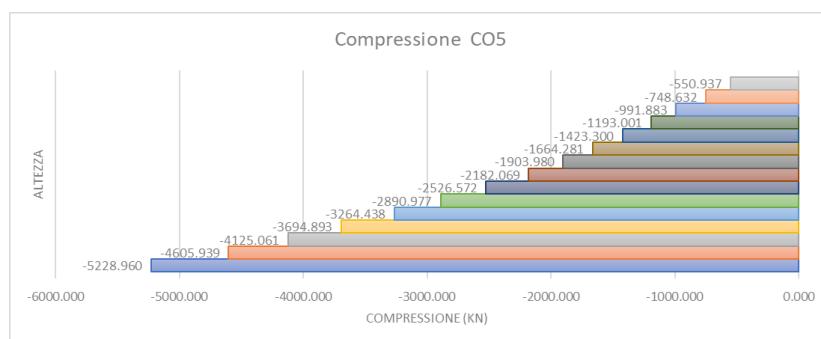


Figura 296: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 3

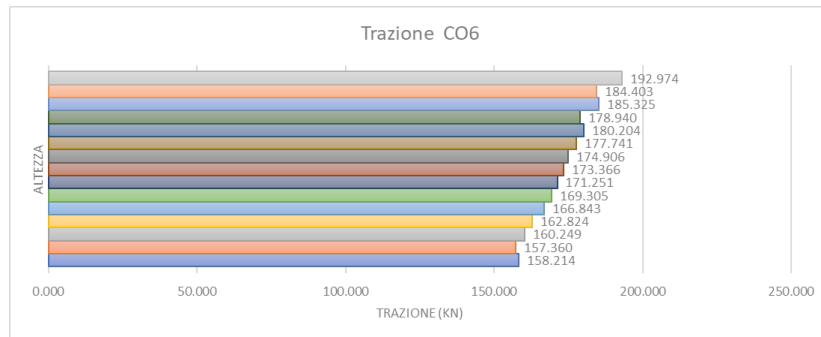


Figura 297: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 3

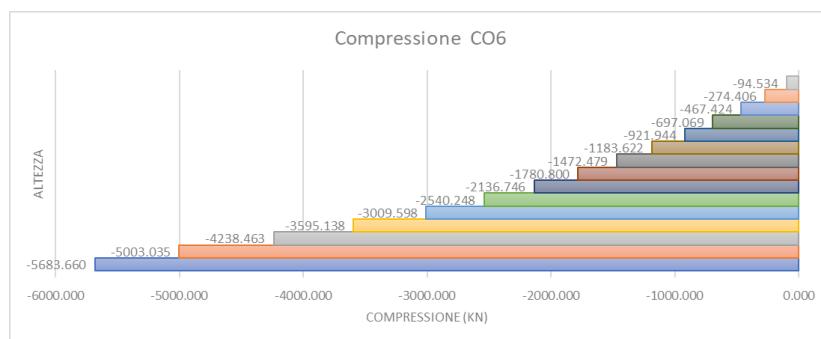


Figura 298: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 3

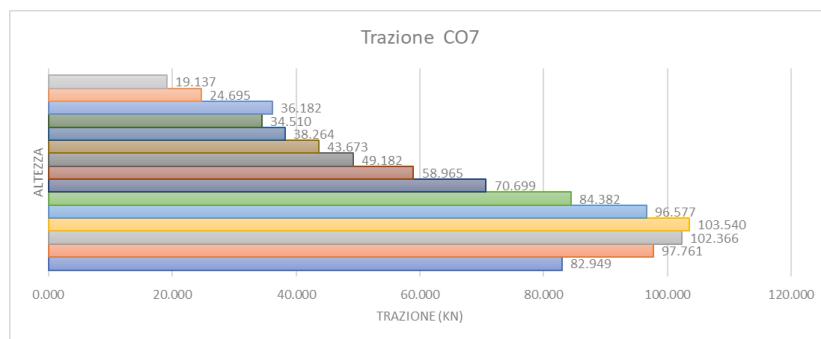


Figura 299: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 3

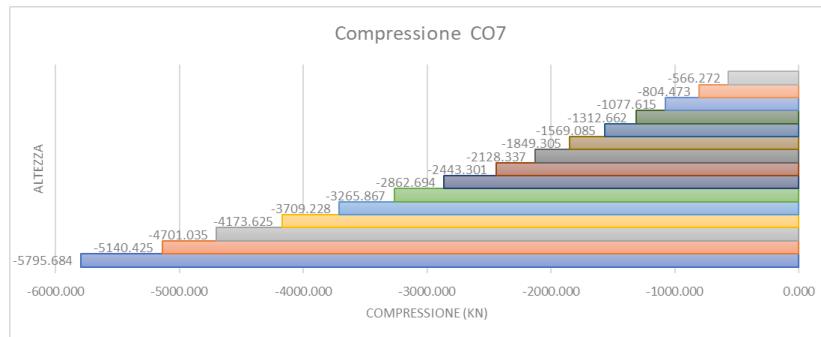


Figura 300: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 3

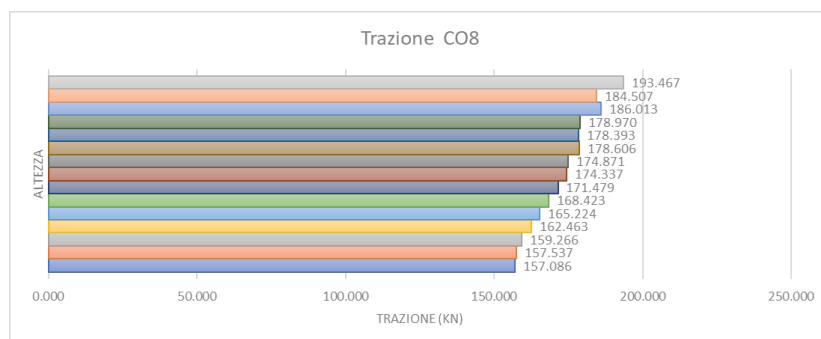


Figura 301: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 3

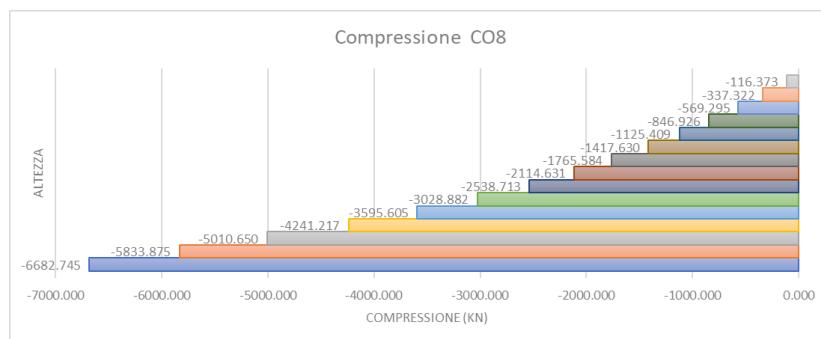


Figura 302: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 3

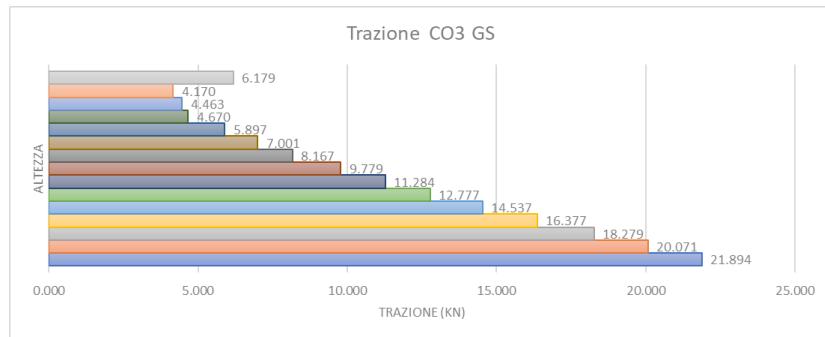


Figura 303: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 3 grandi spostamenti

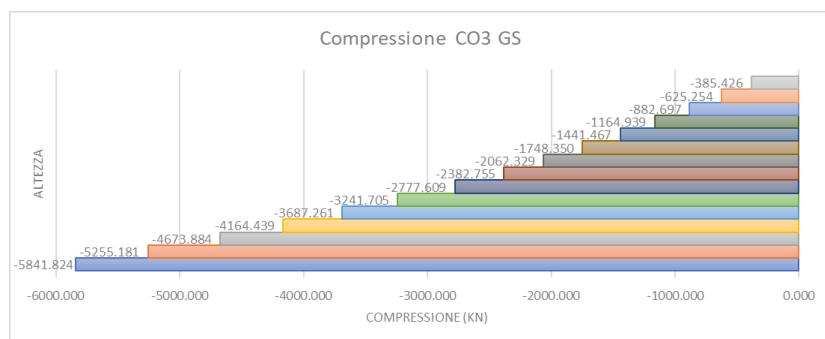


Figura 304: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 3 grandi spostamenti

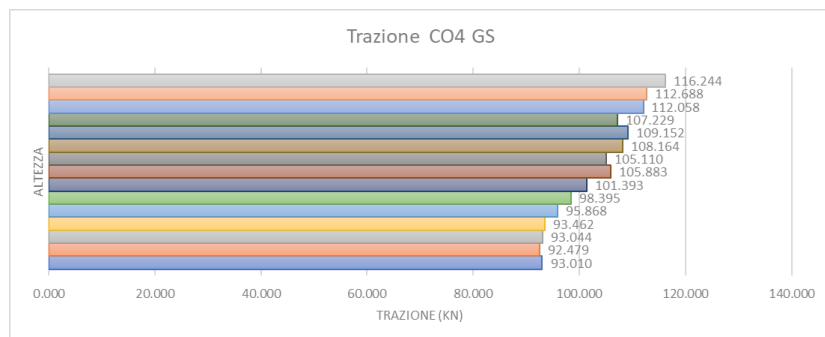


Figura 305: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti

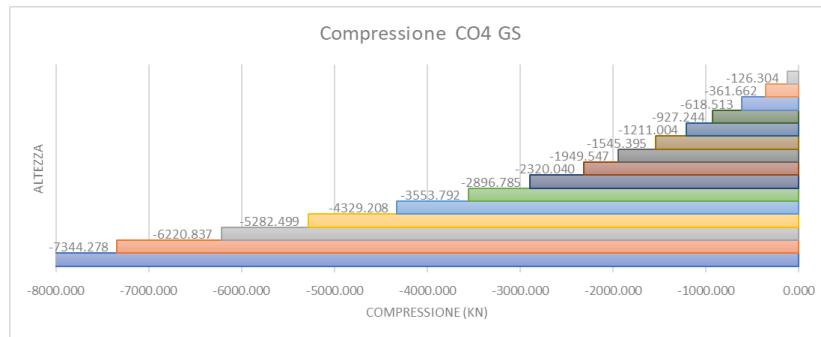


Figura 306: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 3 grandi spostamenti

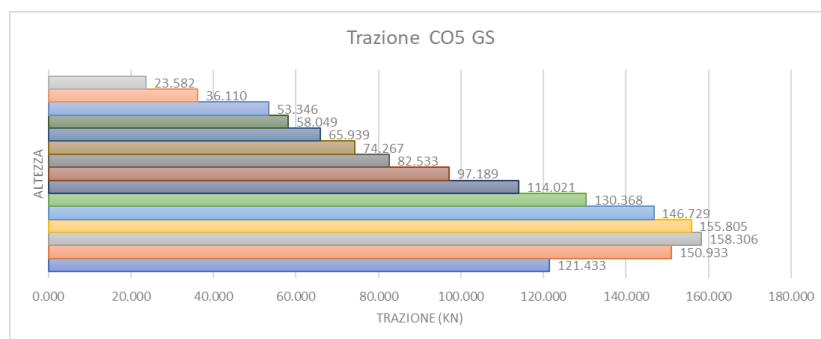


Figura 307: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti

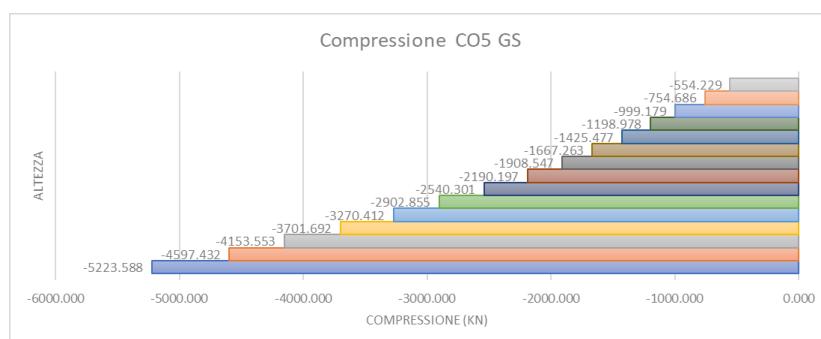


Figura 308: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 3 grandi spostamenti

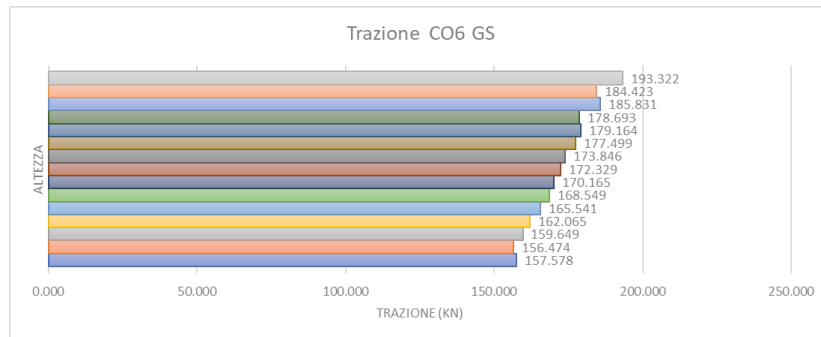


Figura 309: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 3 grandi spostamenti

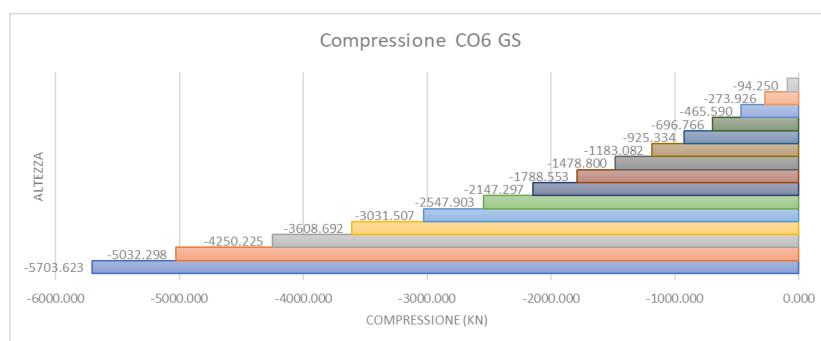


Figura 310: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 3 grandi spostamenti

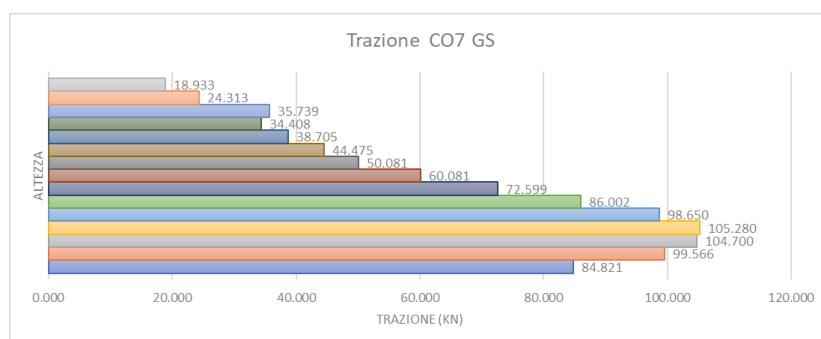


Figura 311: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti

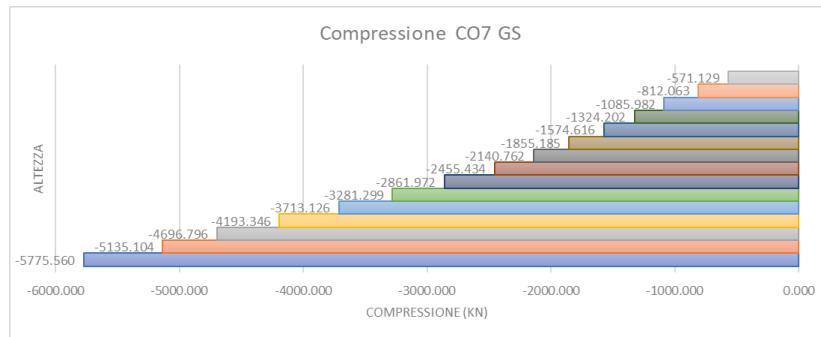


Figura 312: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 3 grandi spostamenti

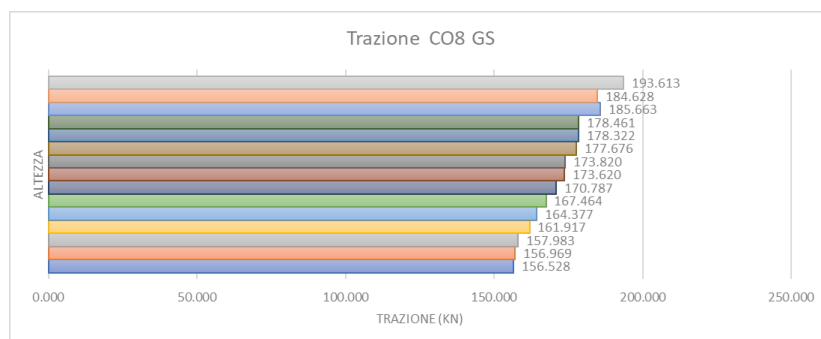


Figura 313: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti

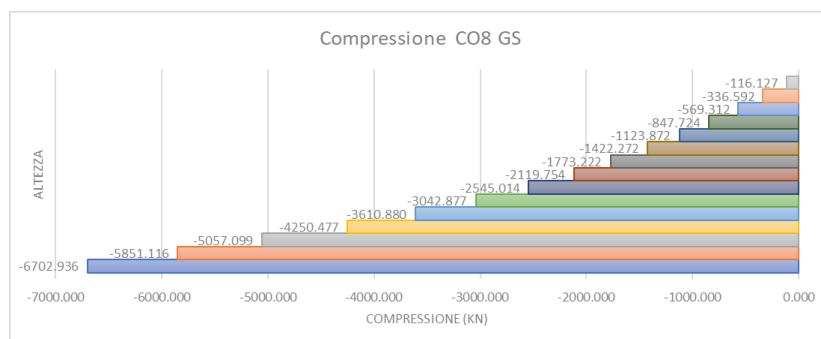


Figura 314: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 3 grandi spostamenti

Zona 4

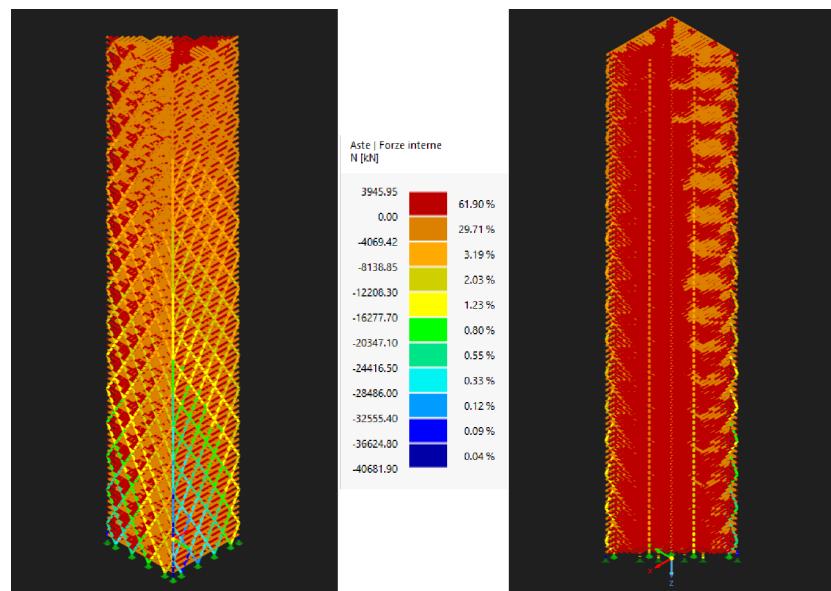


Figura 315: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 4

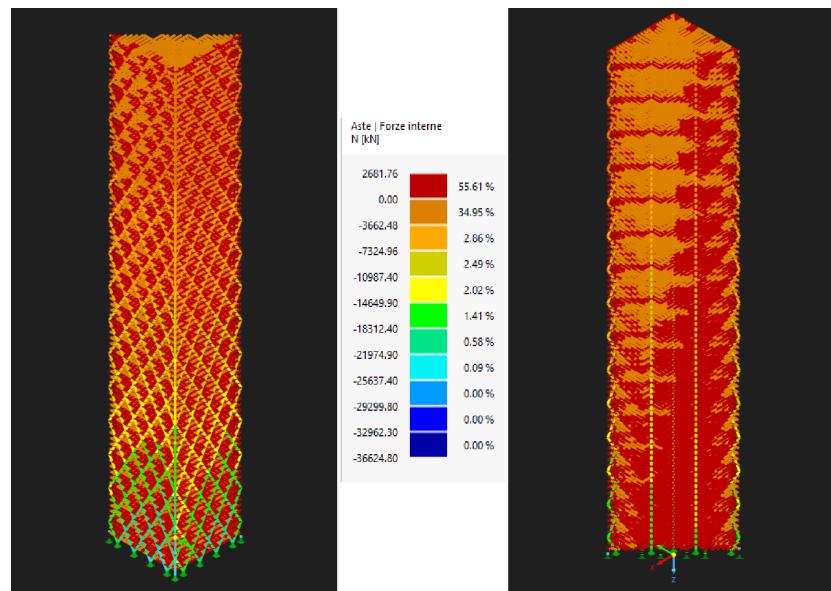


Figura 316: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 4

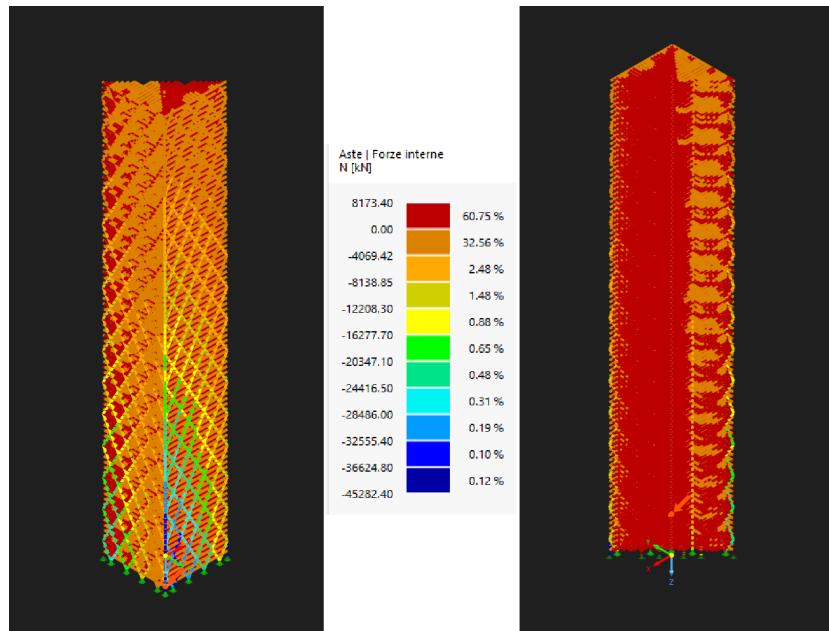


Figura 317: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 4

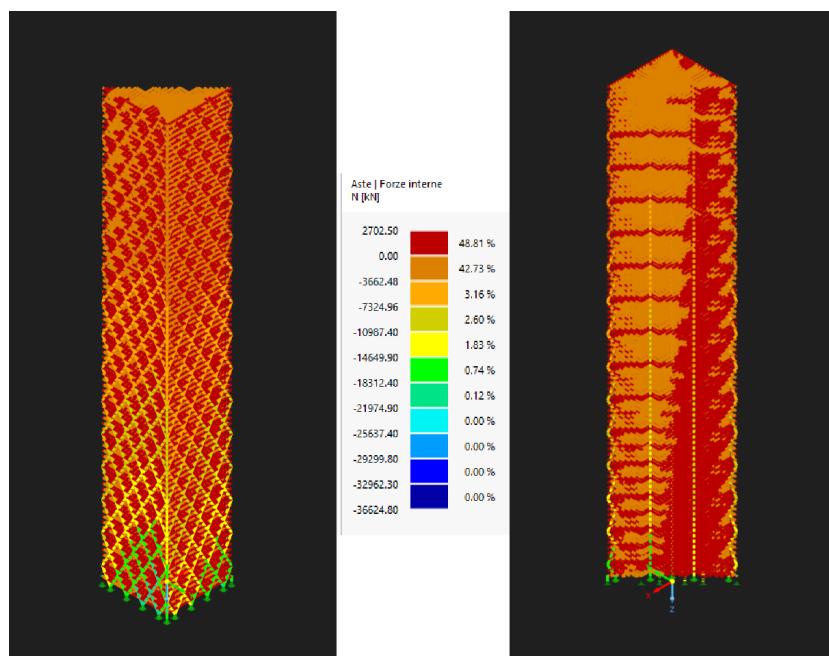


Figura 318: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 4

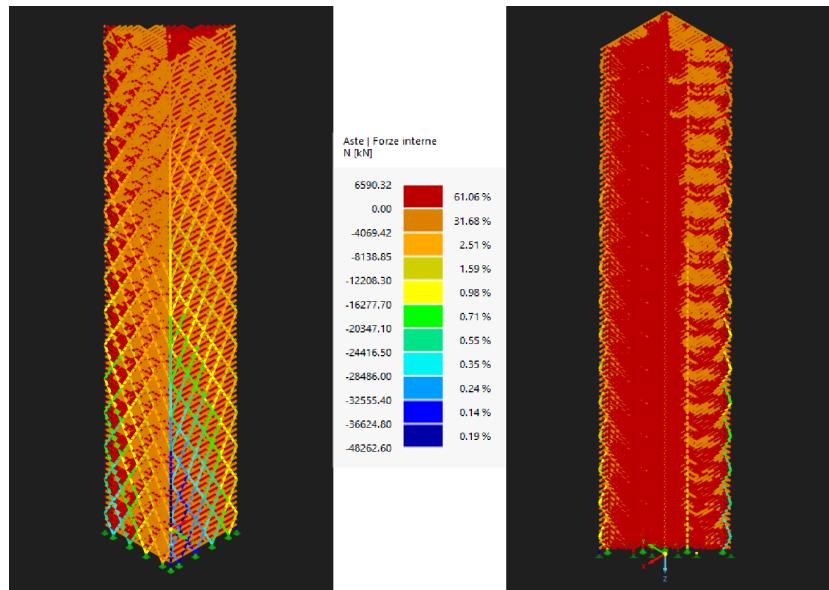


Figura 319: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 4

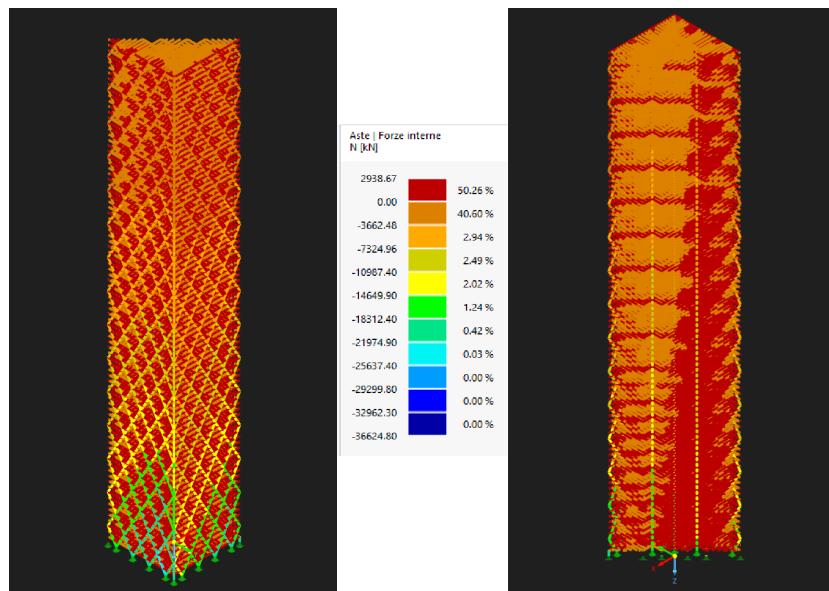


Figura 320: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 4

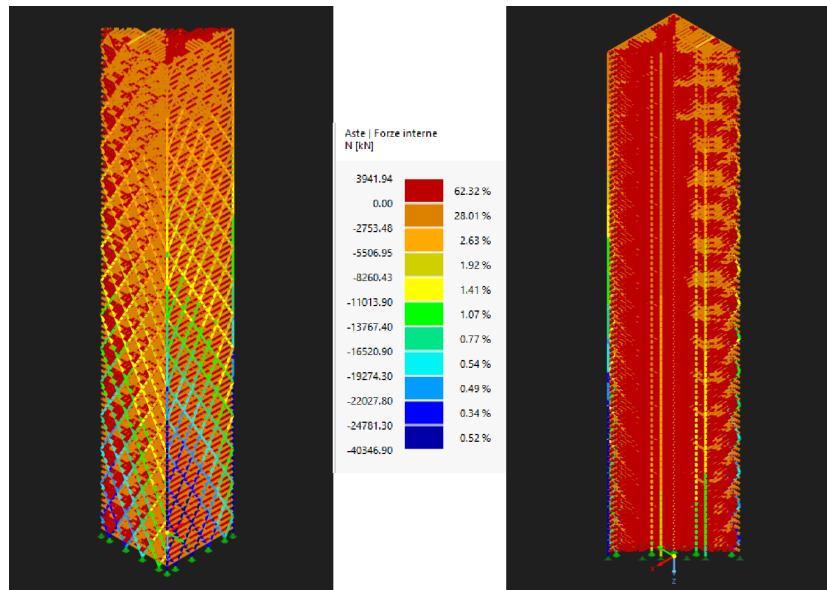


Figura 321: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti

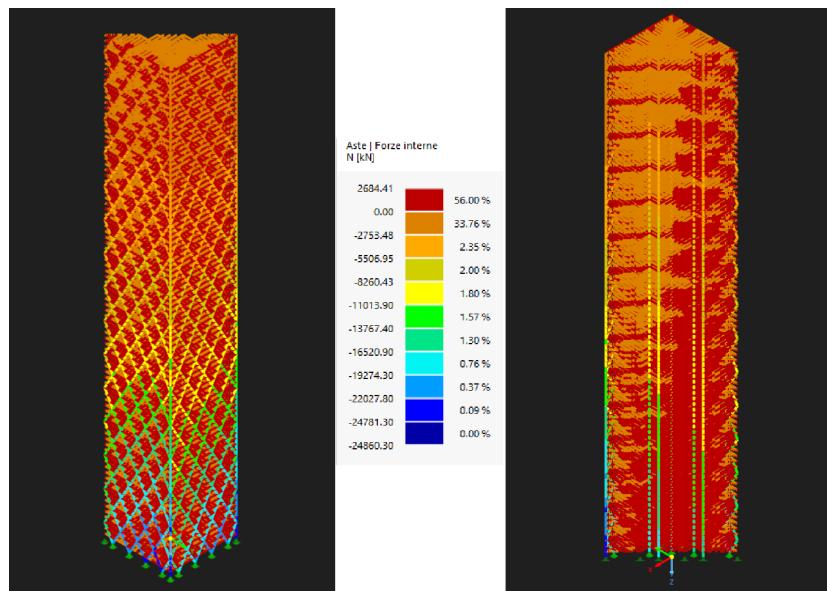


Figura 322: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti

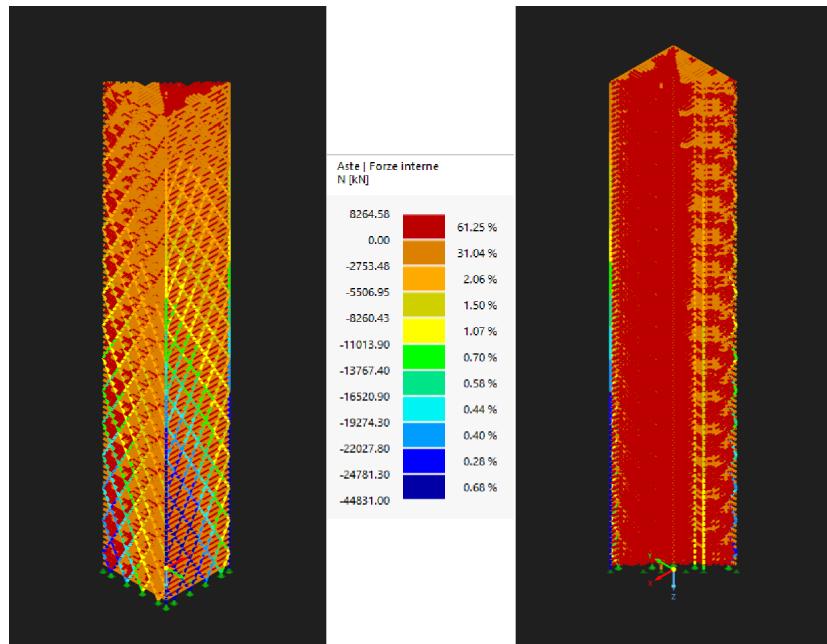


Figura 323: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti

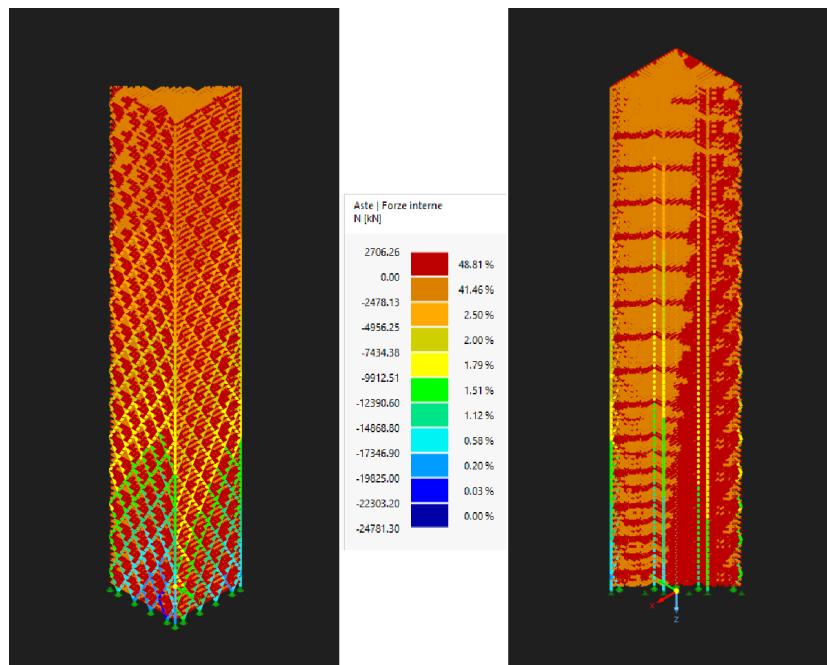


Figura 324: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti

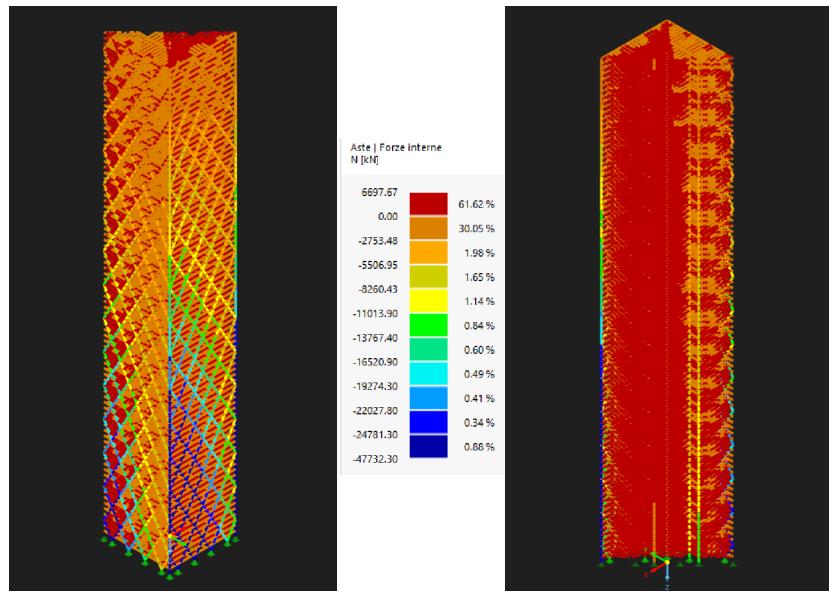


Figura 325: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti

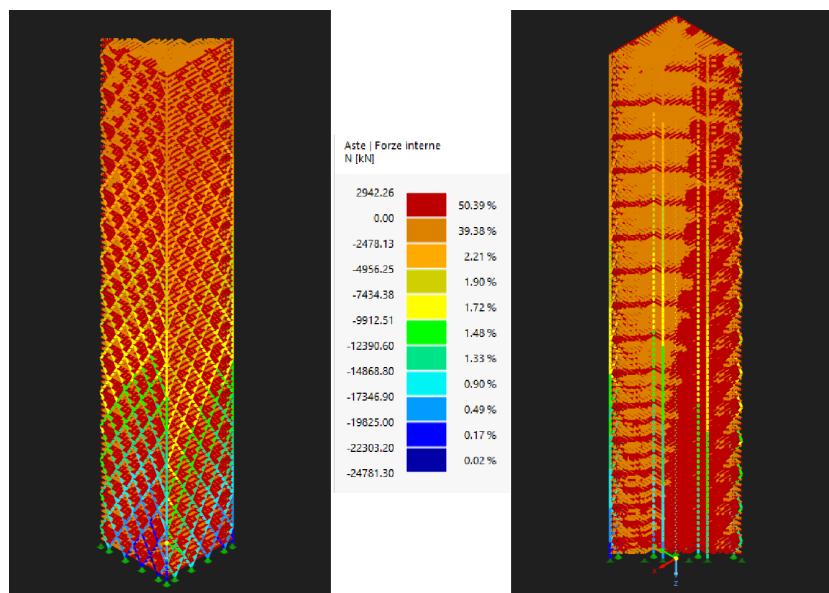


Figura 326: Diagramma a bande di colori combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti

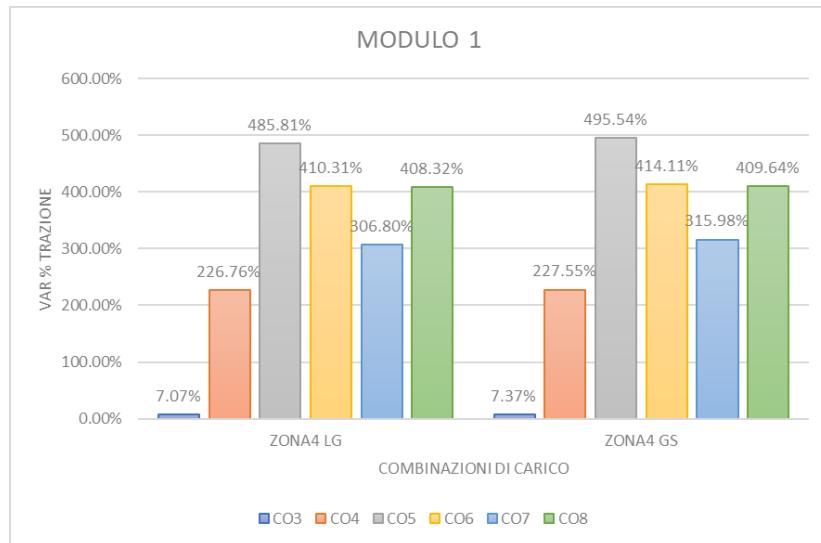


Figura 327: Variazione % trazione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 4

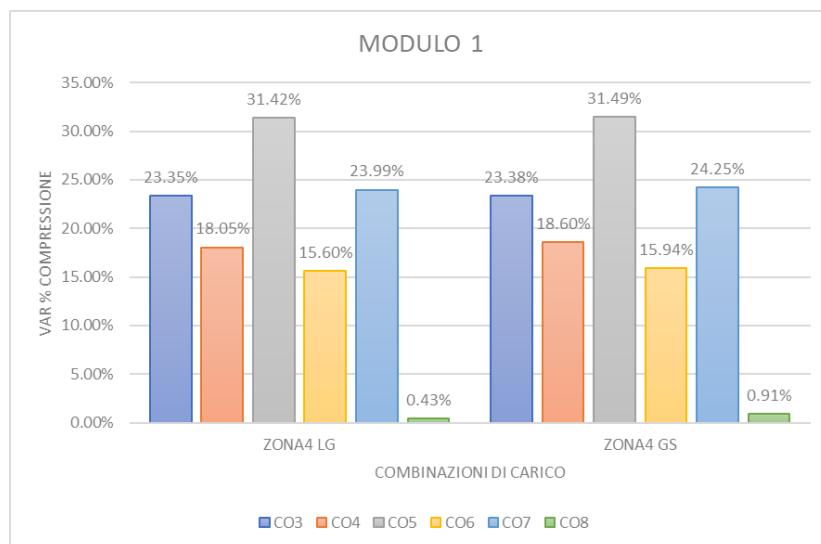


Figura 328: Variazione % compressione del Modulo 1 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 4

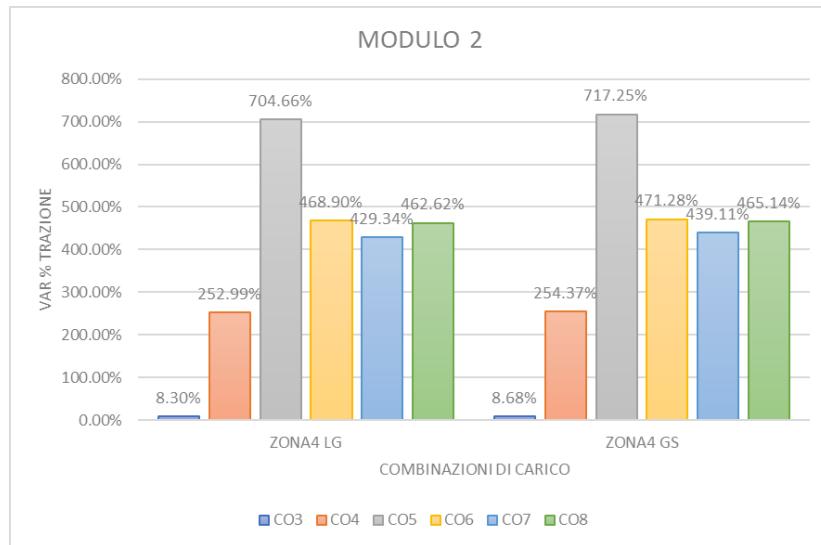


Figura 329: Variazione % trazione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, 18.469 kN; Zona 4

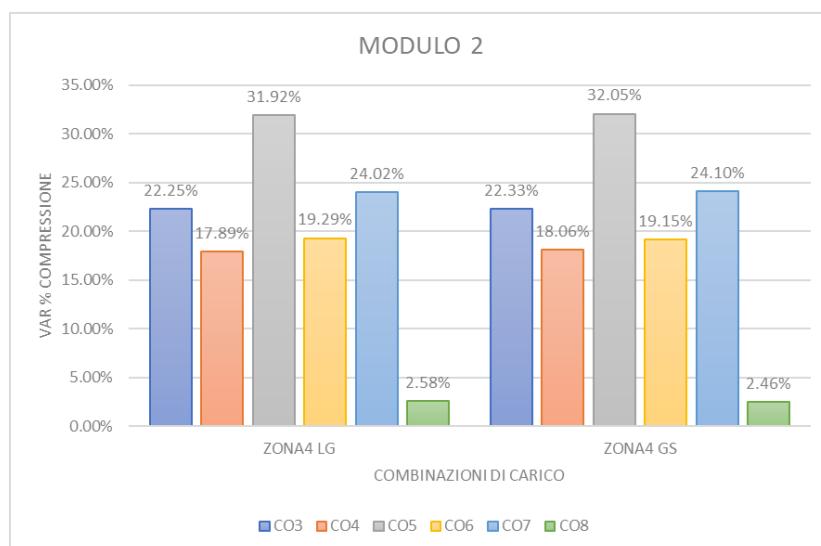


Figura 330: Variazione % compressione del Modulo 2 rispetto alla media dei carichi statici, -6765.65 kN; Zona 4

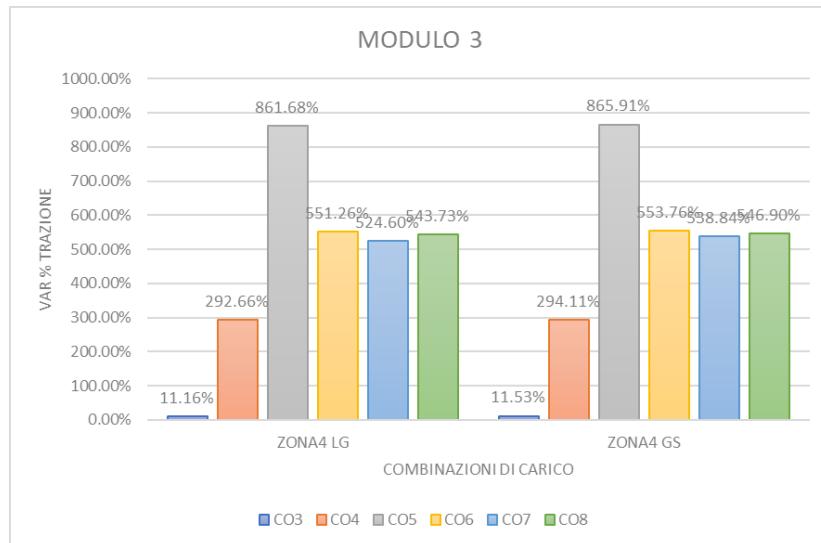


Figura 331: Variazione % trazione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, 16.389 kN; Zona 4

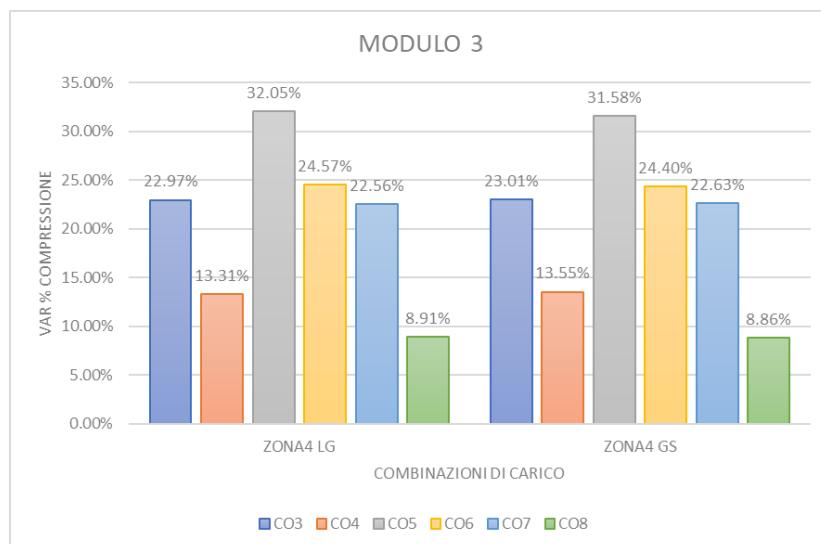


Figura 332: Variazione % compressione del Modulo 3 rispetto alla media dei carichi statici, -6070.442 kN; Zona 4

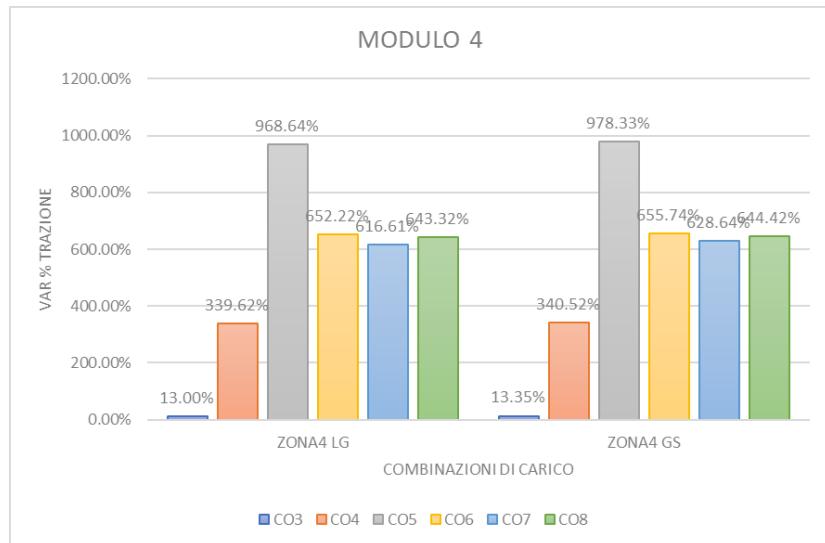


Figura 333: Variazione % trazione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, 14.449 kN; Zona 4

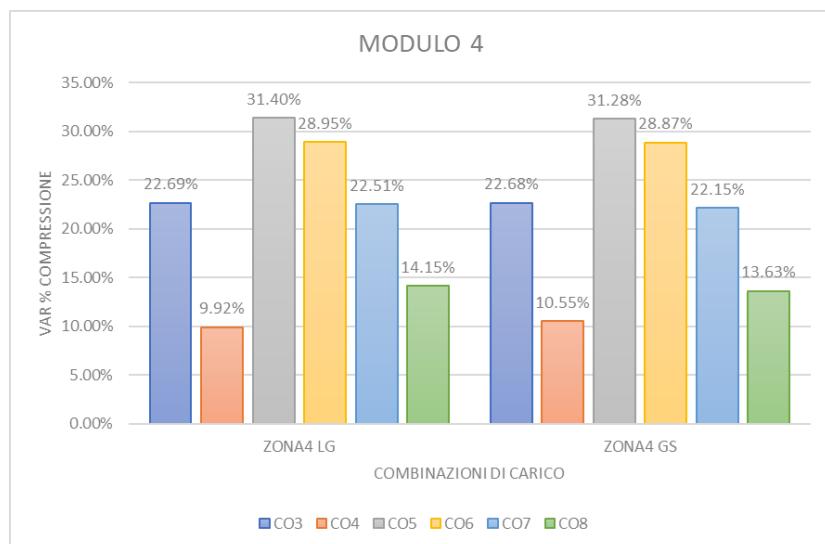


Figura 334: Variazione % compressione del Modulo 4 rispetto alla media dei carichi statici, -5386.302 kN; Zona 4

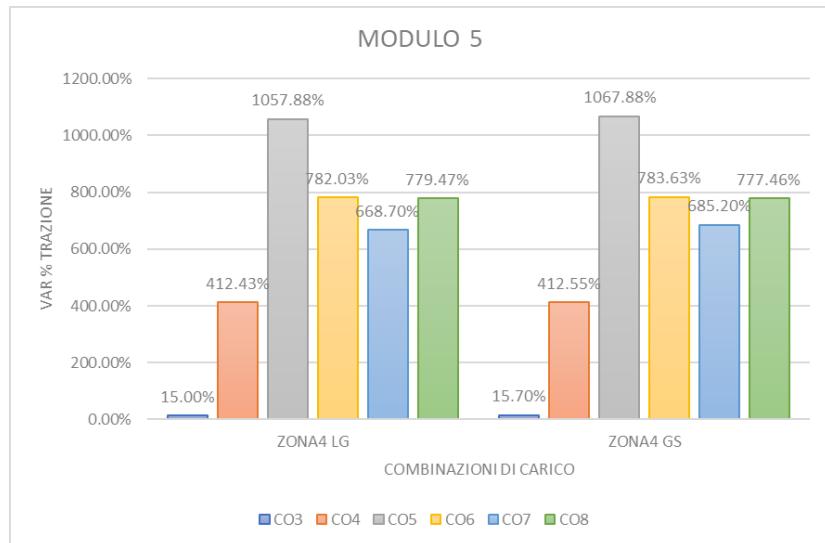


Figura 335: Variazione % trazione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, 12.564 kN; Zona 4

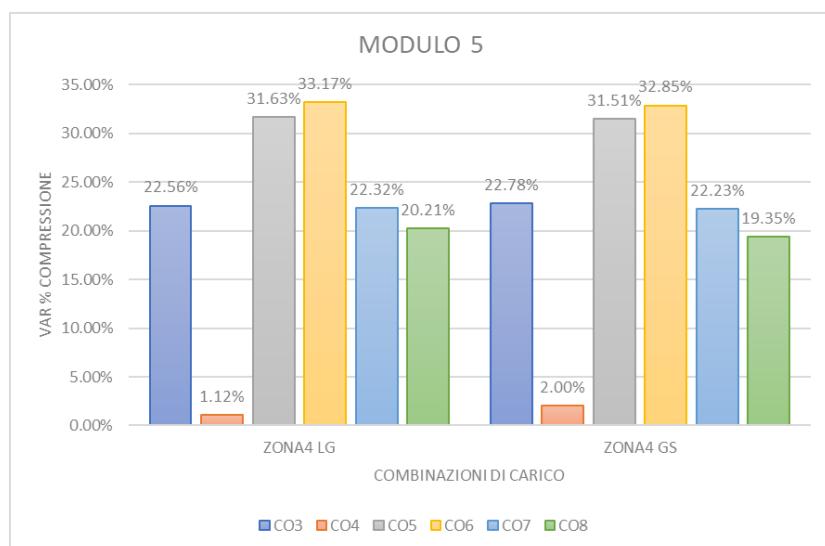


Figura 336: Variazione % compressione del Modulo 5 rispetto alla media dei carichi statici, -4774-796 kN; Zona 4

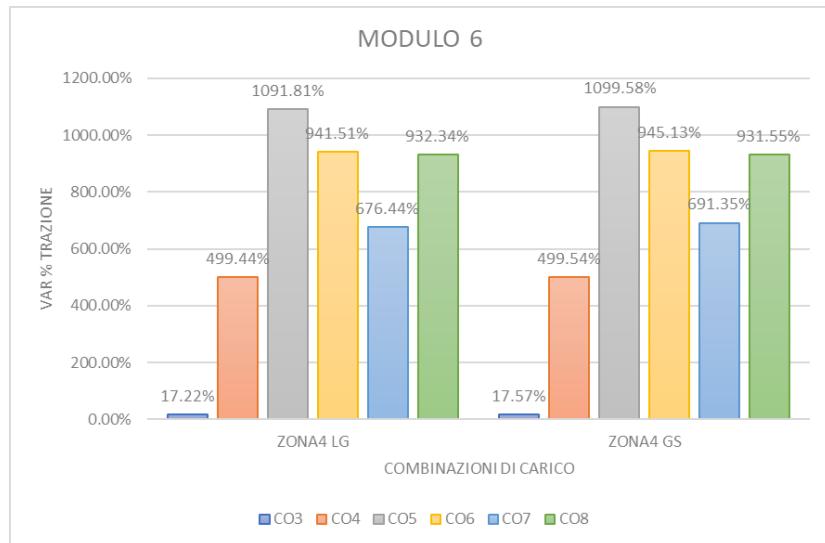


Figura 337: Variazione % trazione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, 10.868 kN; Zona 4

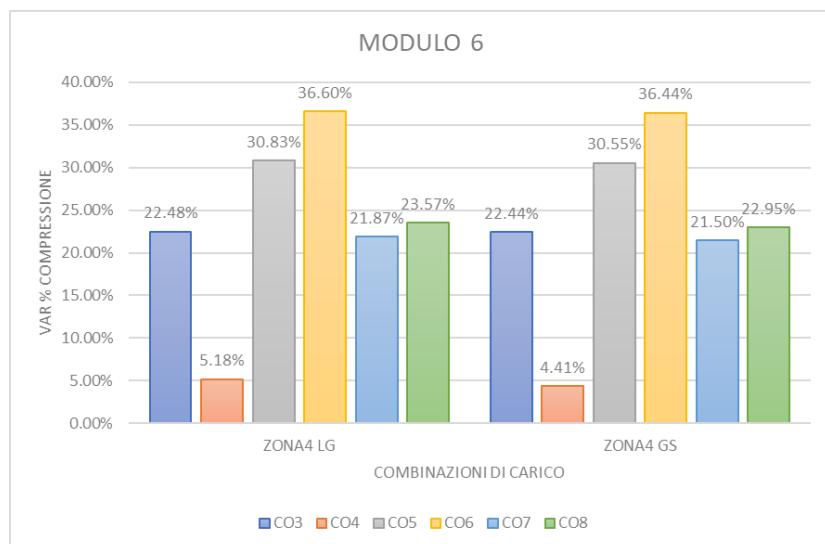


Figura 338: Variazione % compressione del Modulo 6 rispetto alla media dei carichi statici, -4179.814 kN; Zona 4

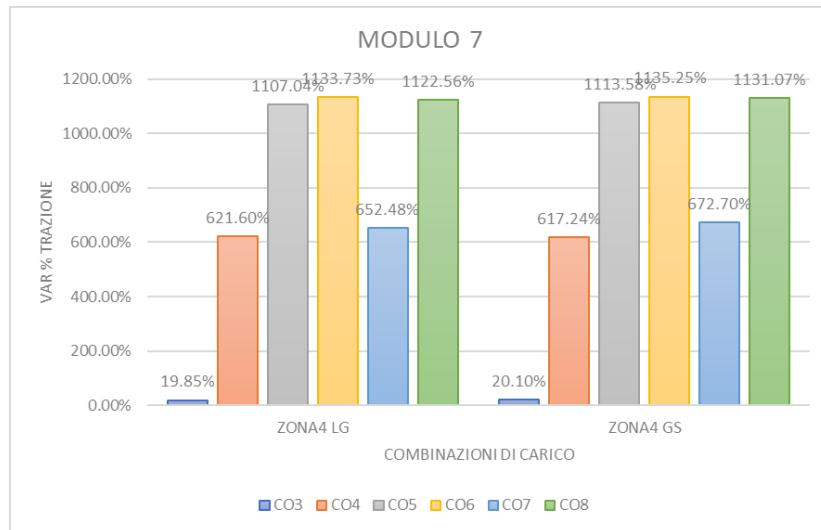


Figura 339: Variazione % trazione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, 9.395 kN; Zona 4

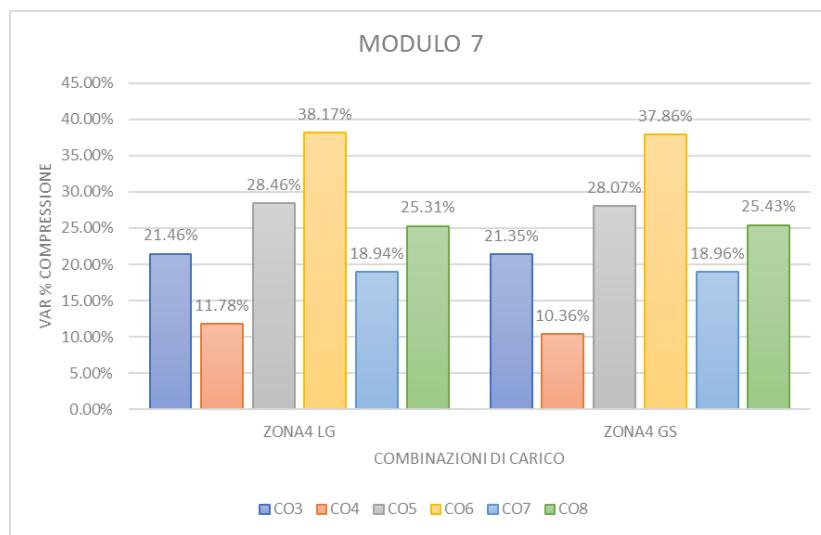


Figura 340: Variazione % compressione del Modulo 7 rispetto alla media dei carichi statici, -3531.725 kN; Zona 4

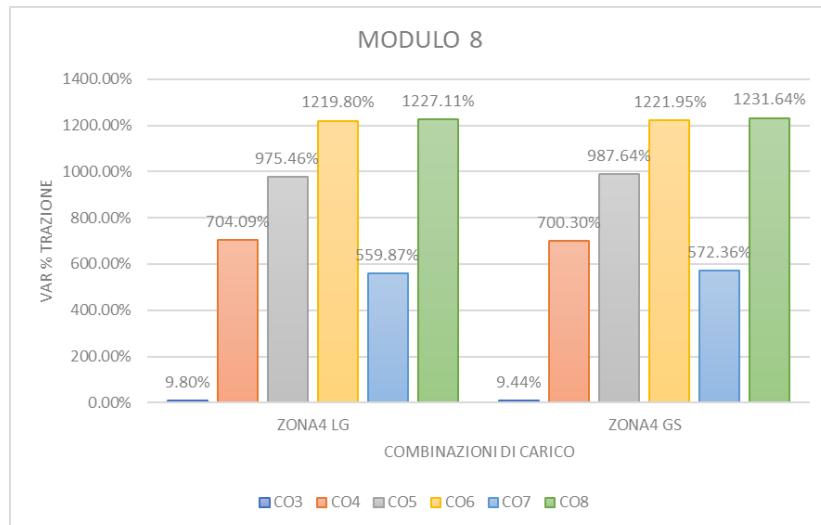


Figura 341: Variazione % trazione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, 8.396 kN; Zona 4

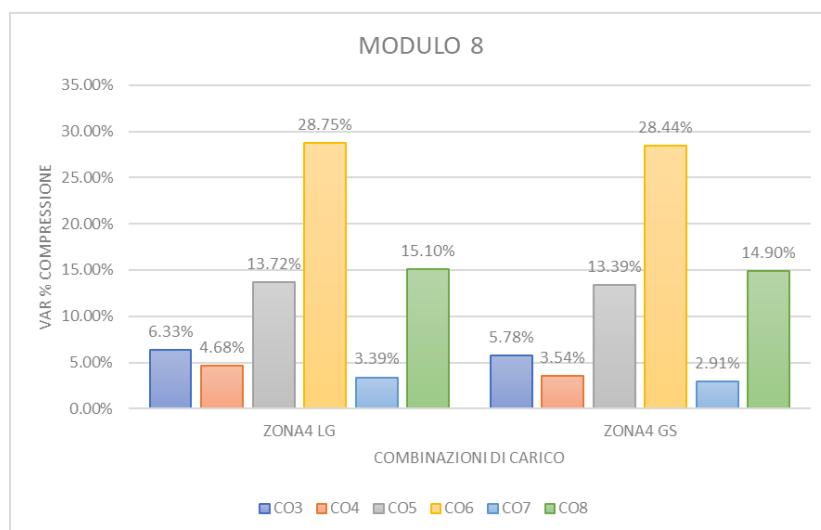


Figura 342: Variazione % compressione del Modulo 8 rispetto alla media dei carichi statici, -2528.914 kN; Zona 4

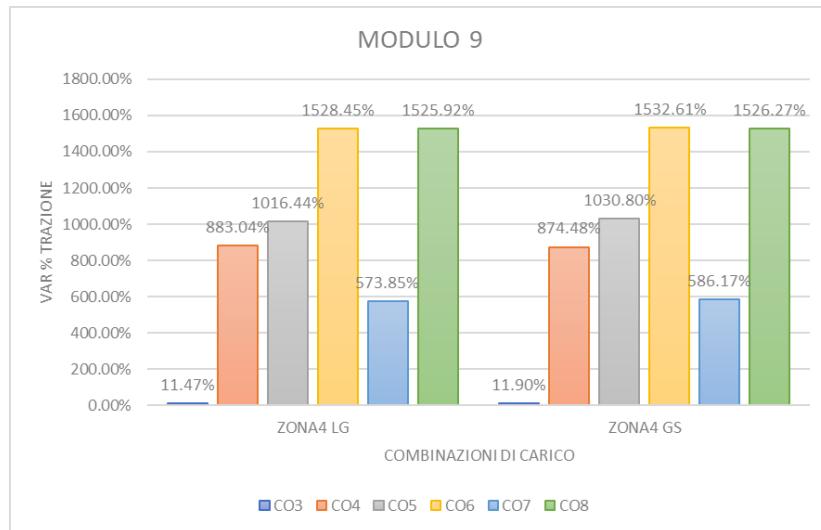


Figura 343: Variazione % trazione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, 7.299 kN; Zona 4

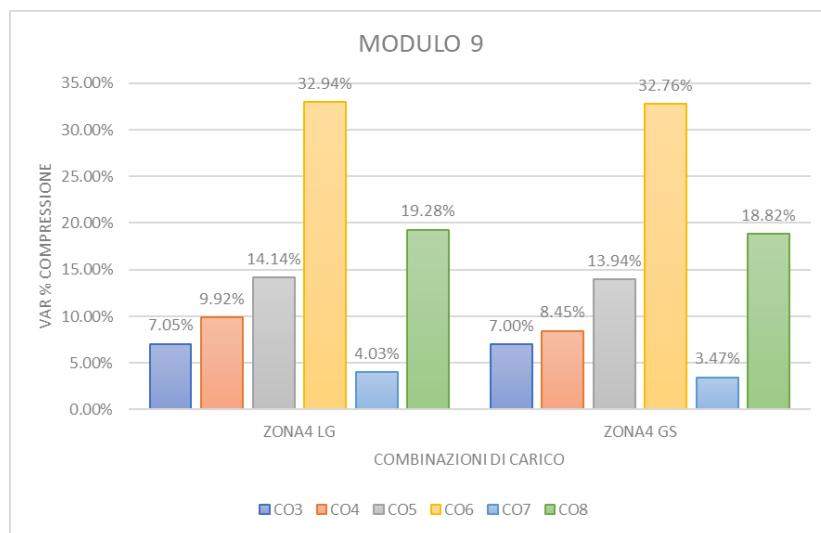


Figura 344: Variazione % compressione del Modulo 9 rispetto alla media dei carichi statici, -2217.615 kN; Zona 4

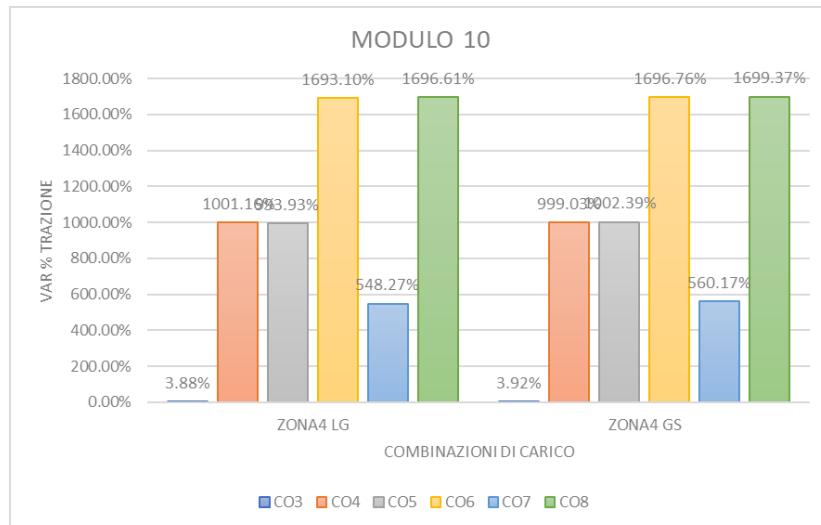


Figura 345: Variazione % trazione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, 6.737 kN; Zona 4

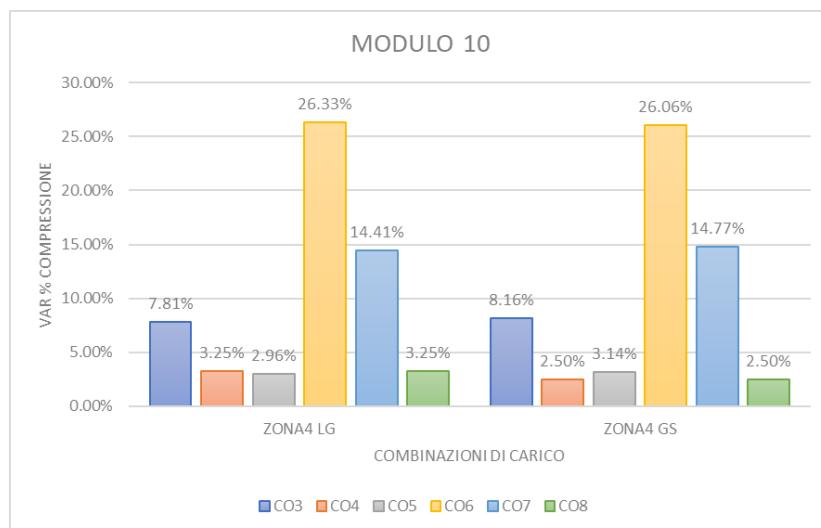


Figura 346: Variazione % compressione del Modulo 10 rispetto alla media dei carichi statici, -1616.439 kN; Zona 4

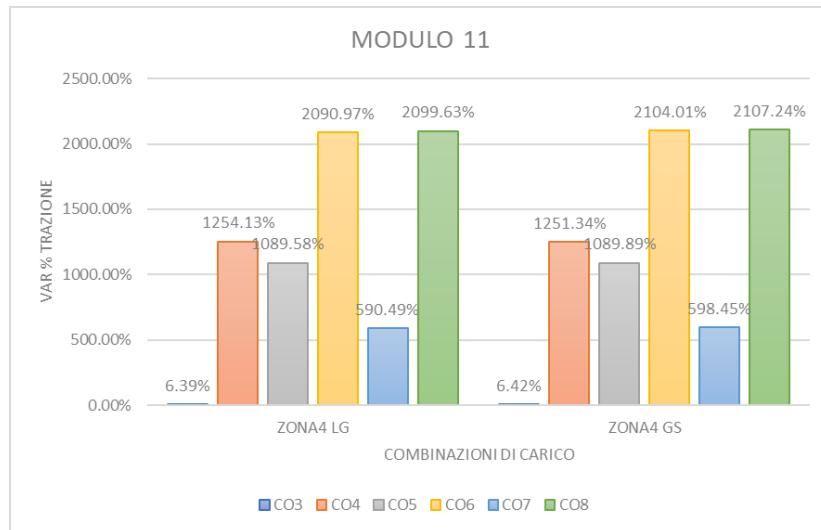


Figura 347: Variazione % trazione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, 5.542 kN; Zona 4

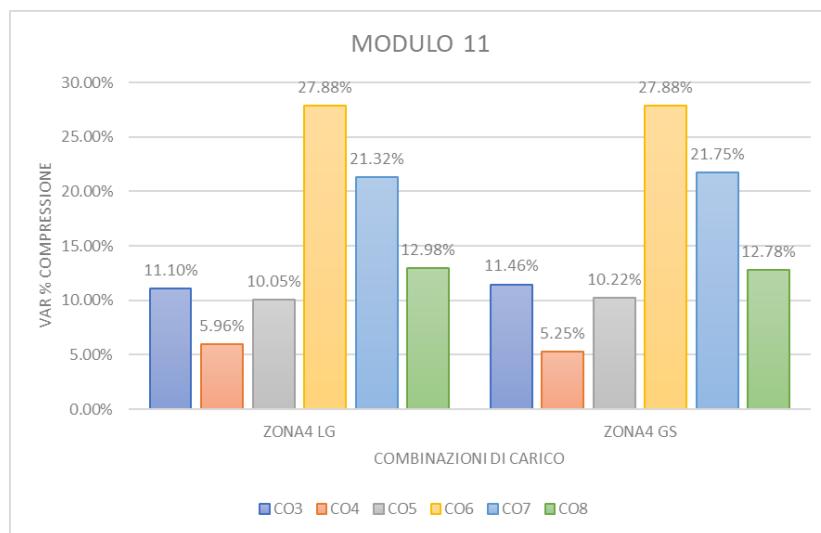


Figura 348: Variazione % compressione del Modulo 11 rispetto alla media dei carichi statici, -1293.297 kN; Zona 4

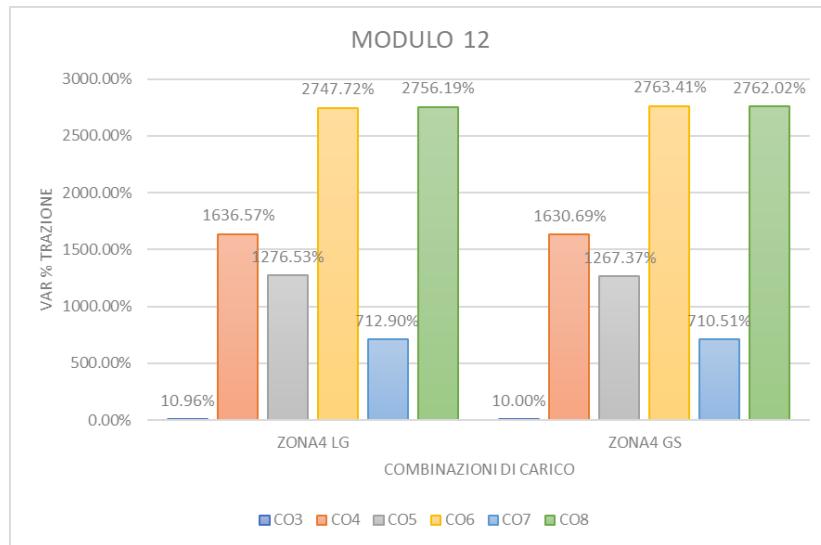


Figura 349: Variazione % trazione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, 4.245 kN; Zona 4

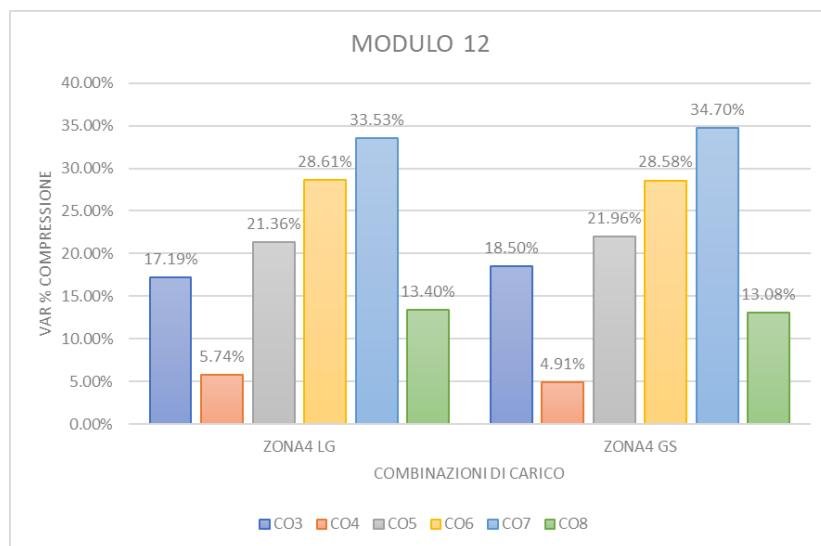


Figura 350: Variazione % compressione del Modulo 12 rispetto alla media dei carichi statici, -983.055 kN; Zona 4

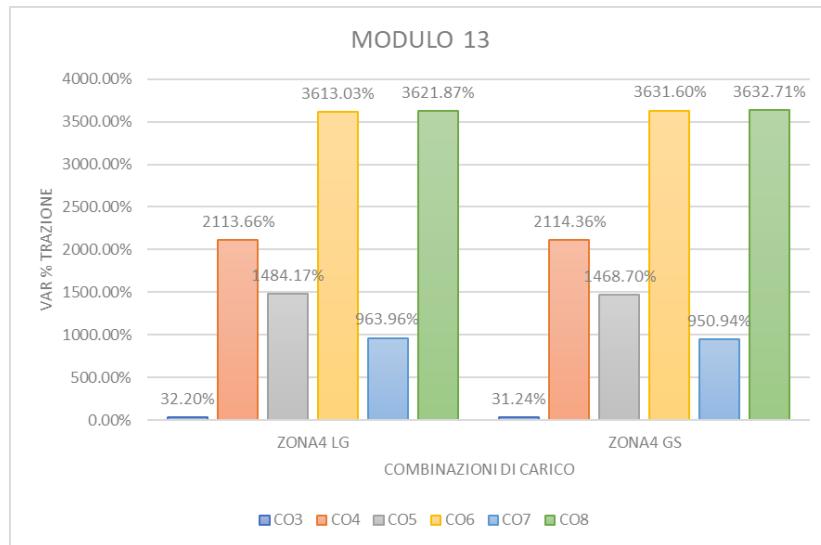


Figura 351: Variazione % trazione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, 3.401 kN; Zona 4

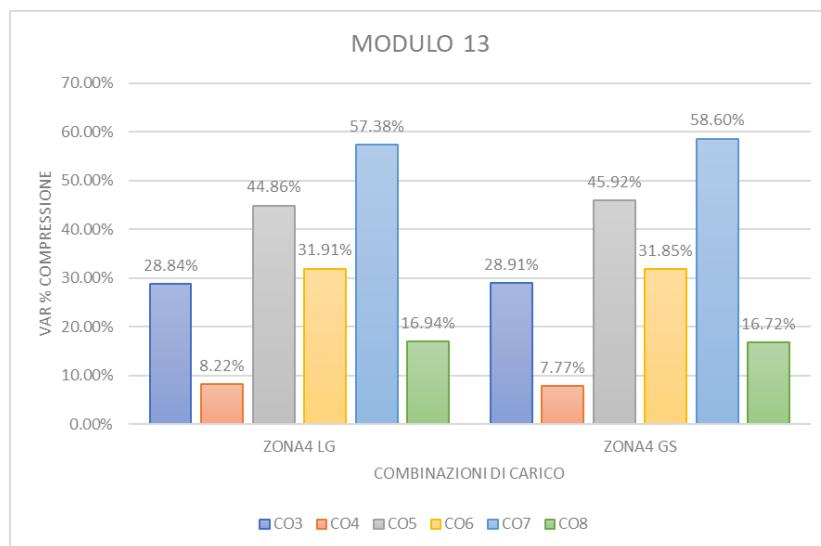


Figura 352: Variazione % compressione del Modulo 13 rispetto alla media dei carichi statici, -684.734 kN; Zona 4

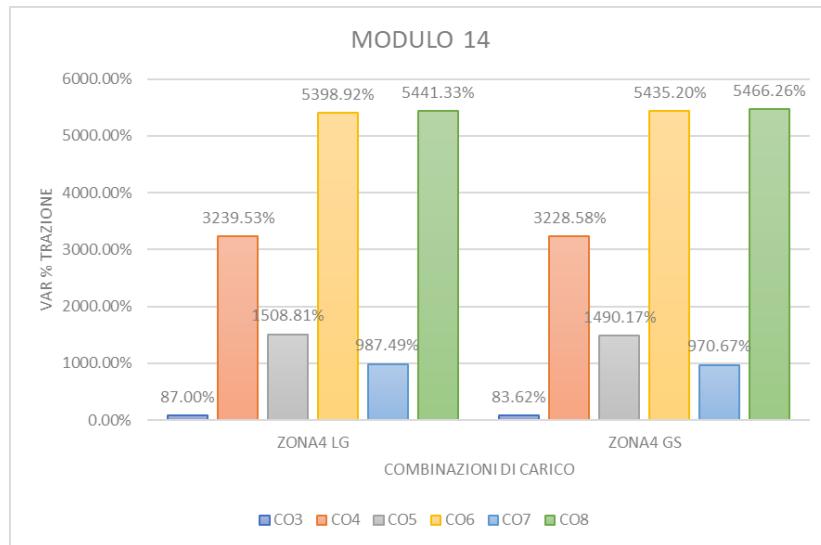


Figura 353: Variazione % trazione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, 2.271 kN; Zona 4

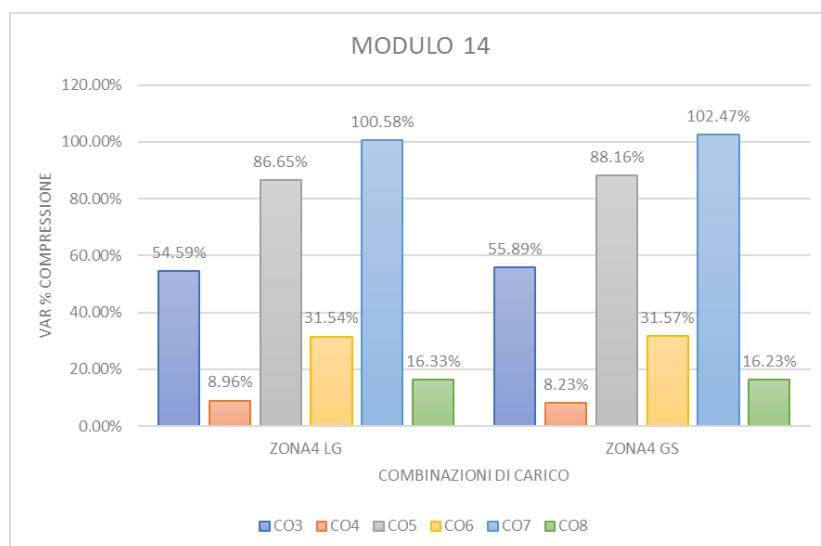


Figura 354: Variazione % compressione del Modulo 14 rispetto alla media dei carichi statici, -401.080 kN; Zona 4

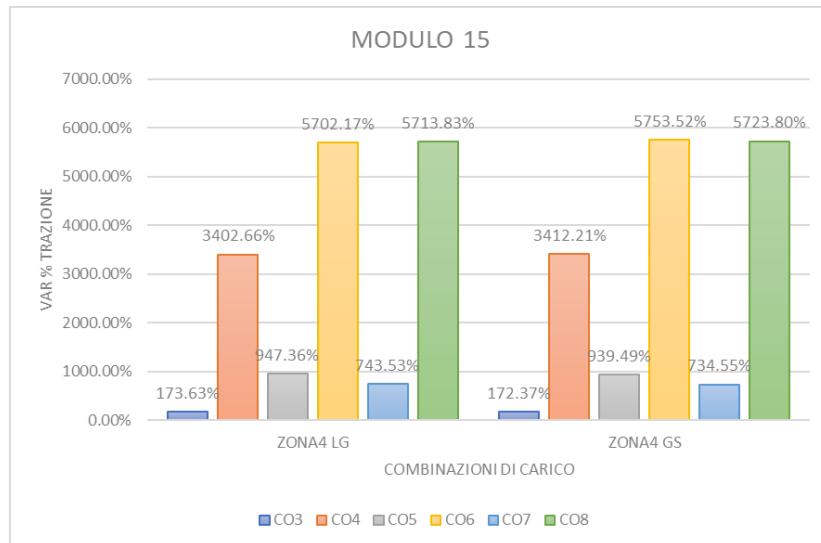


Figura 355: Variazione % trazione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, 2.269 kN; Zona 4

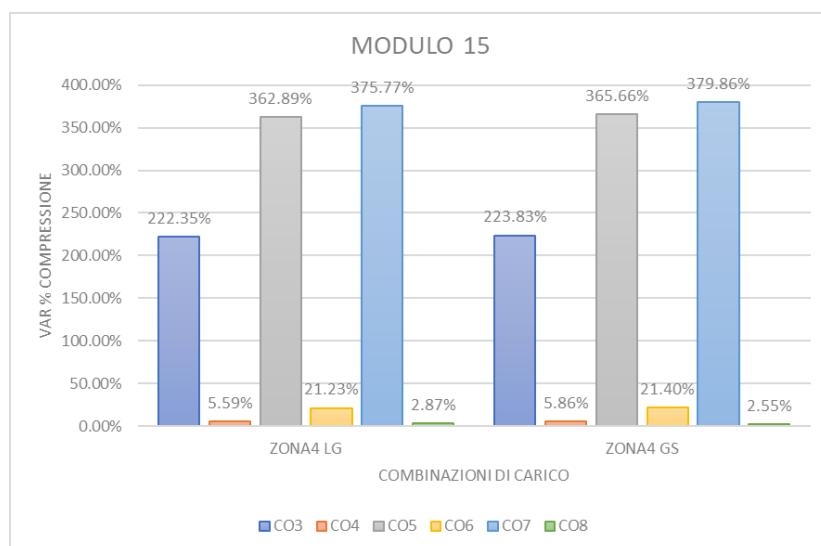


Figura 356: Variazione % compressione del Modulo 15 rispetto alla media dei carichi statici, -119.021 kN; Zona 4

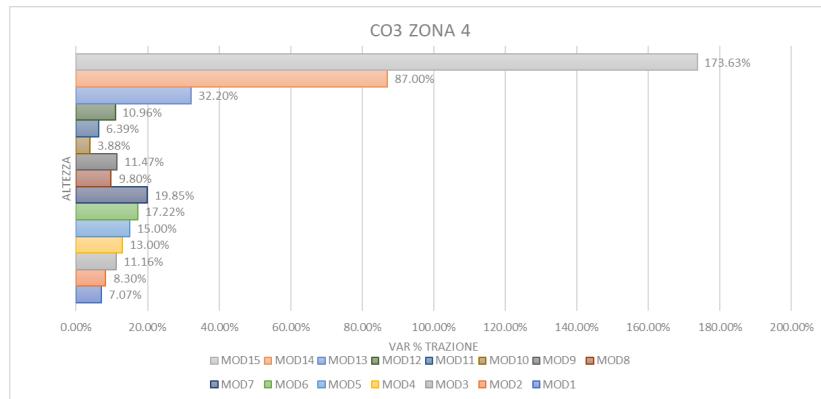


Figura 357: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 4

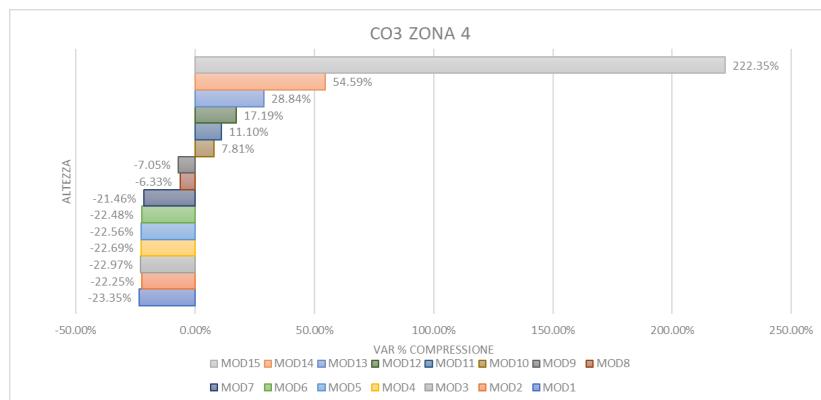


Figura 358: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 4

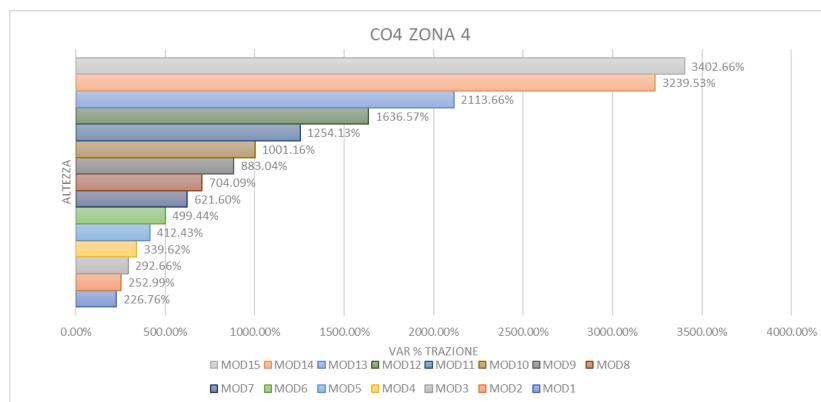


Figura 359: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 4

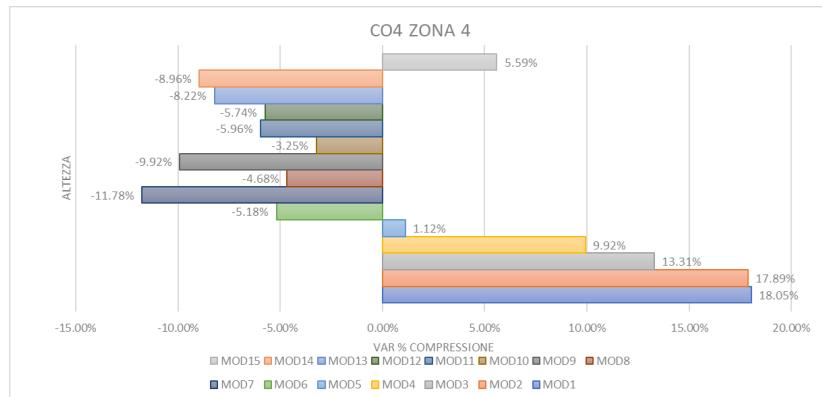


Figura 360: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 4

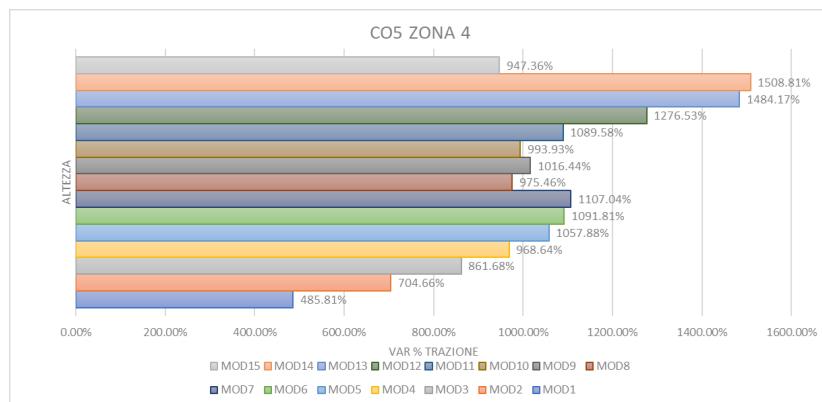


Figura 361: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 4

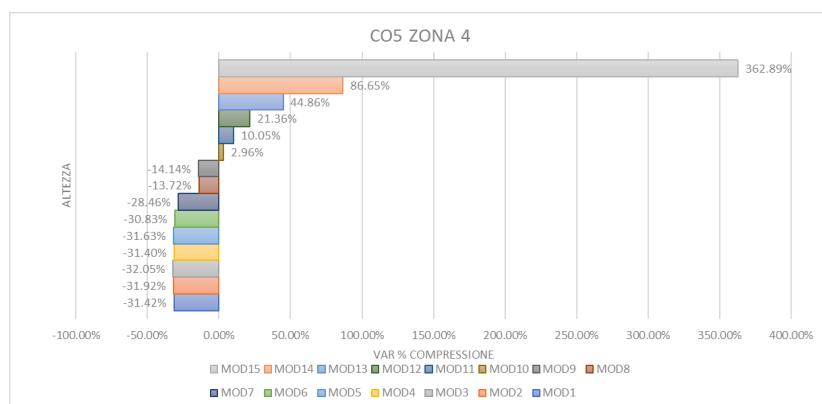


Figura 362: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 4

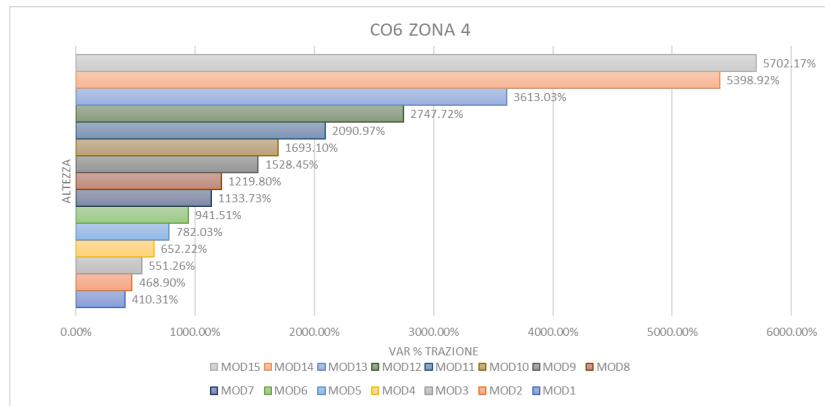


Figura 363: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 4

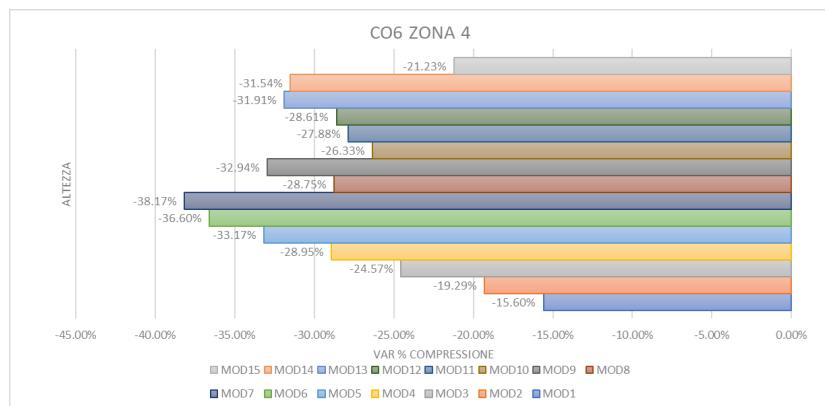


Figura 364: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 4

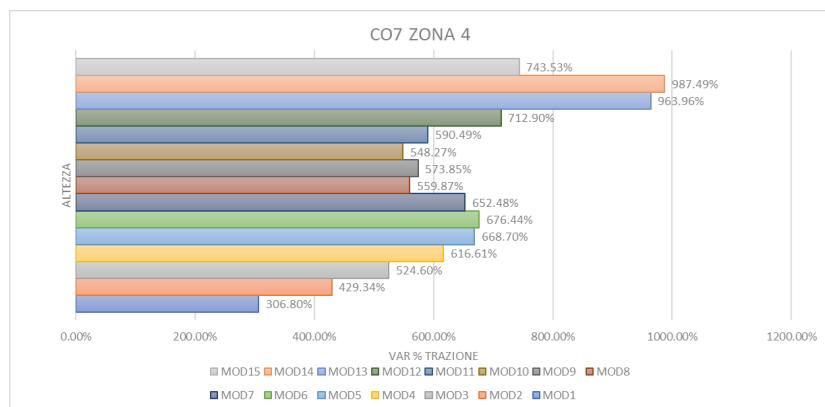


Figura 365: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 4

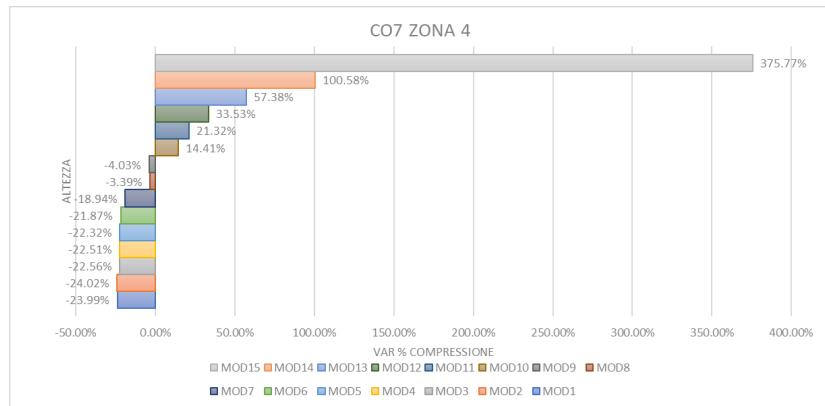


Figura 366: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 4

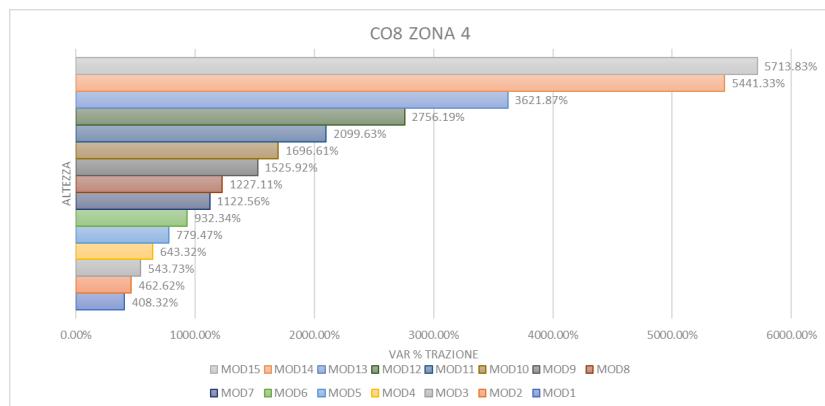


Figura 367: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 4

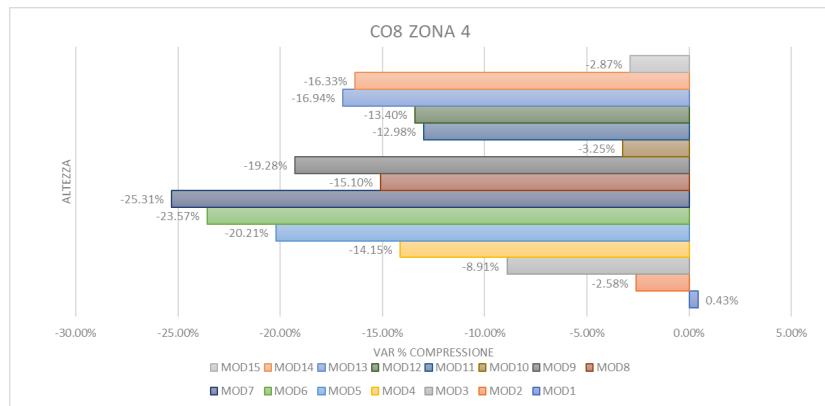


Figura 368: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 4

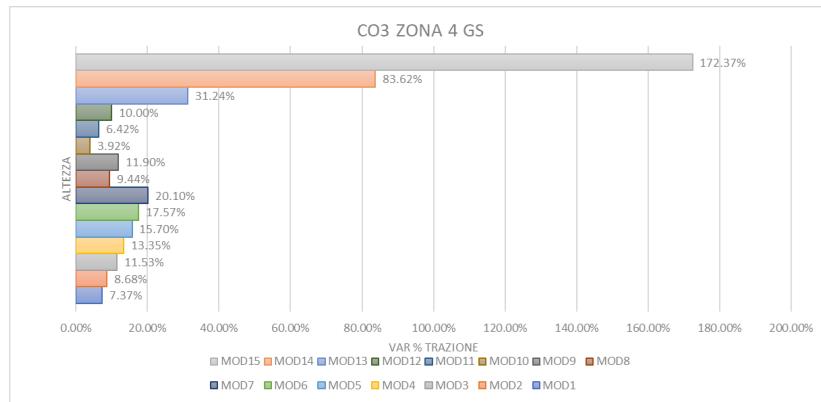


Figura 369: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti

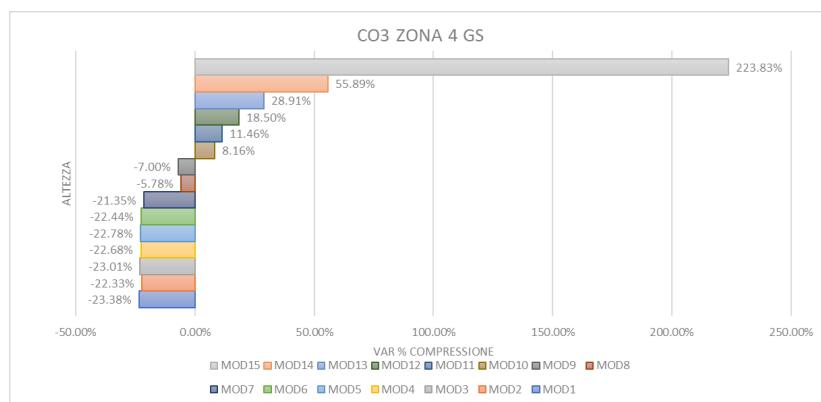


Figura 370: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti

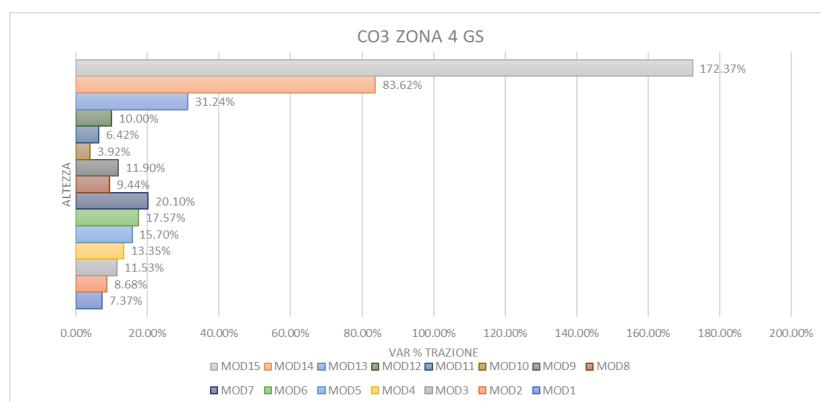


Figura 371: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti

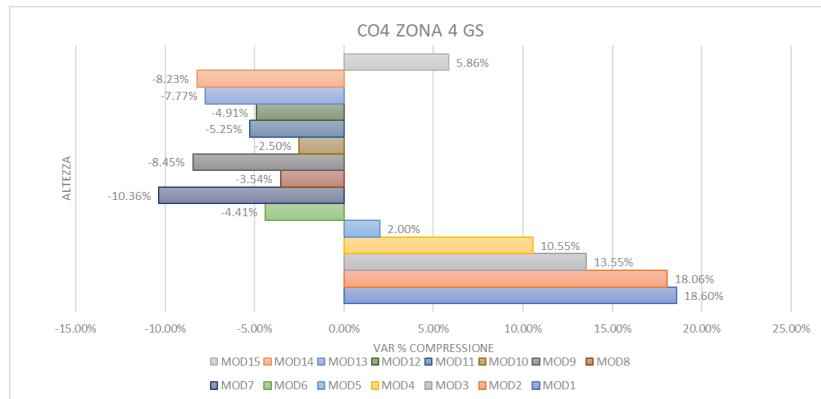


Figura 372: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti

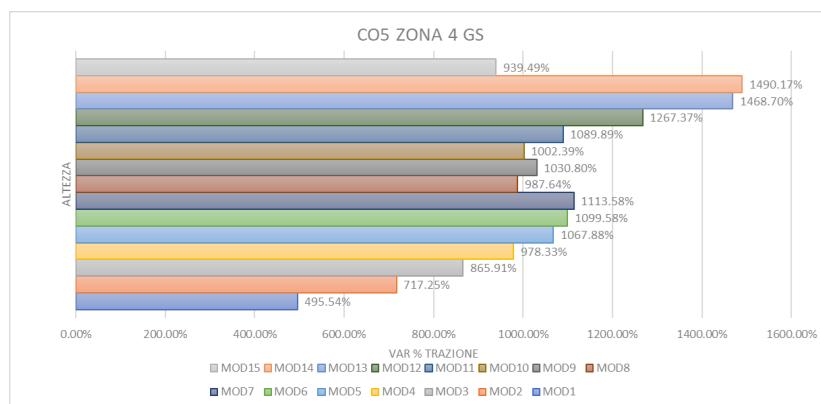


Figura 373: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti

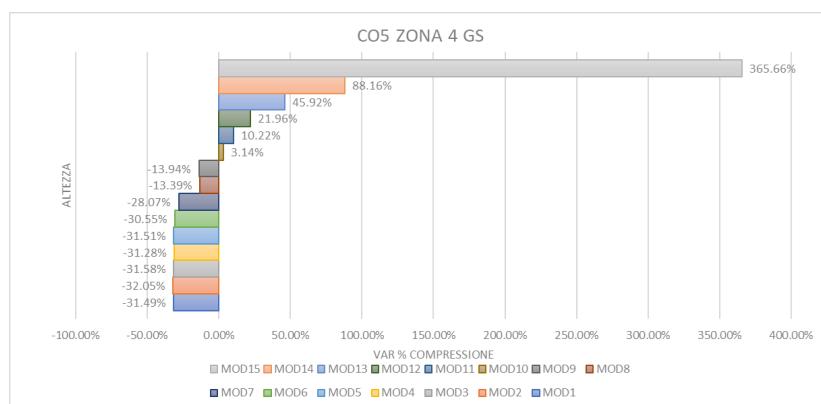


Figura 374: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti

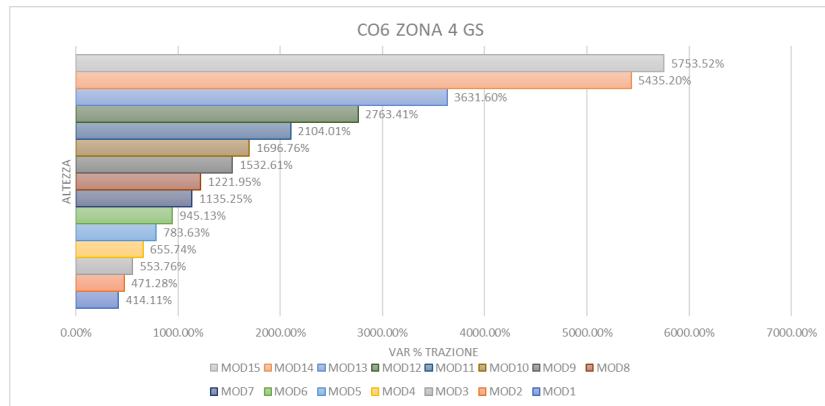


Figura 375: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti

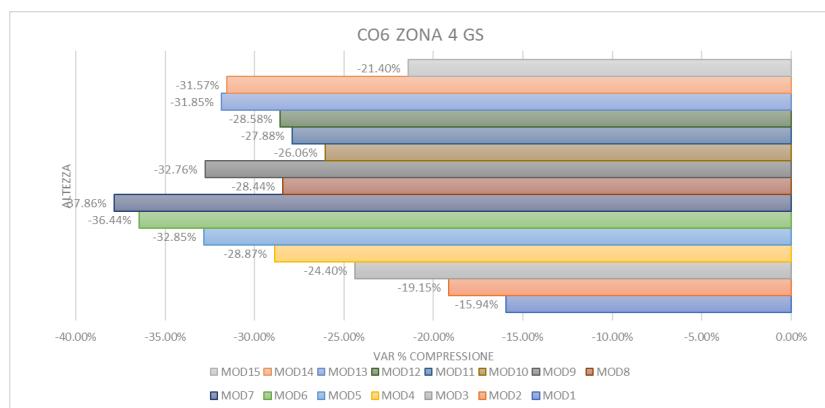


Figura 376: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti

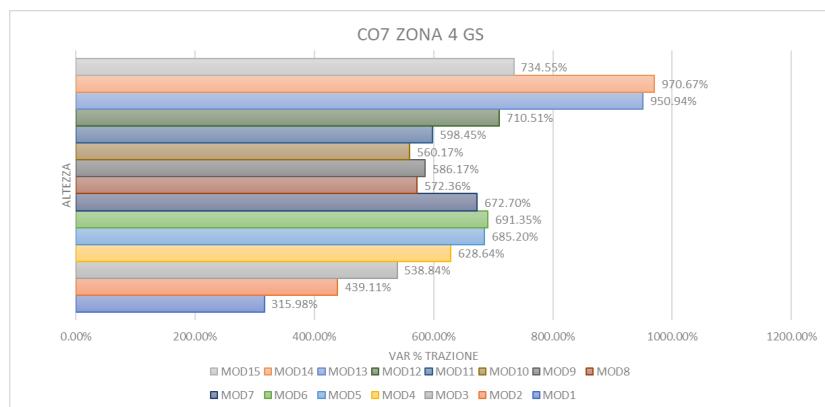


Figura 377: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti

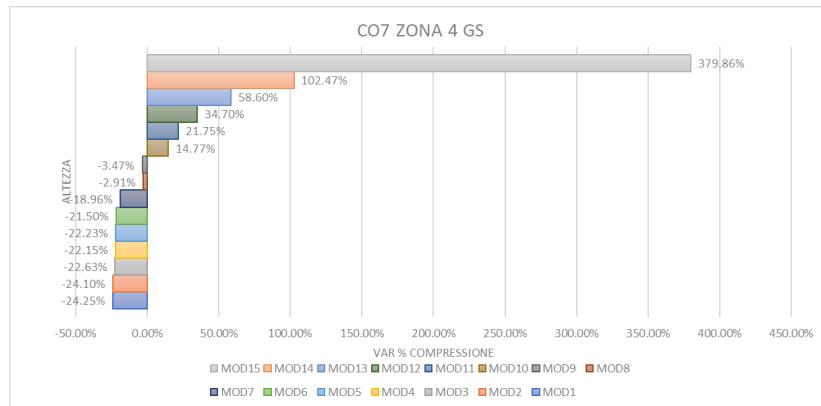


Figura 378: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti

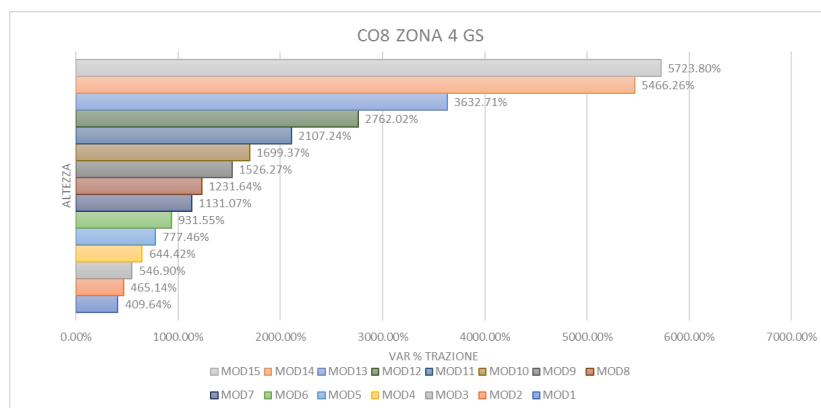


Figura 379: Andamento variazione % trazione della combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti

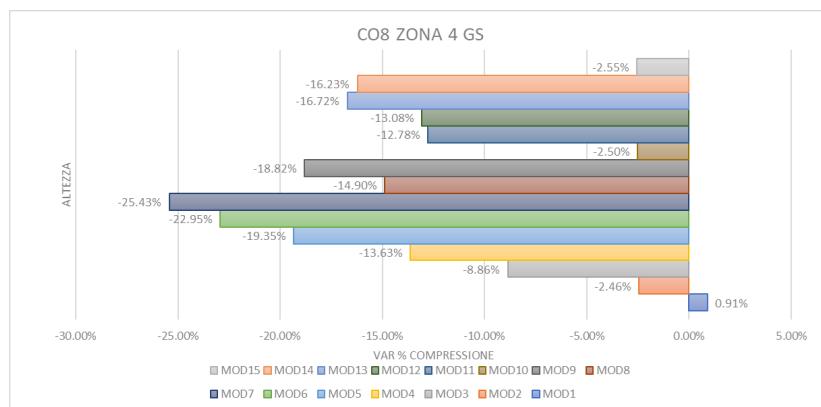


Figura 380: Andamento variazione % compressione della combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti

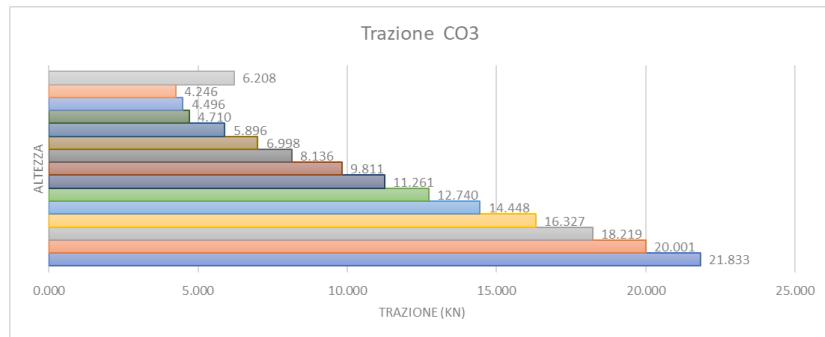


Figura 381: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 4

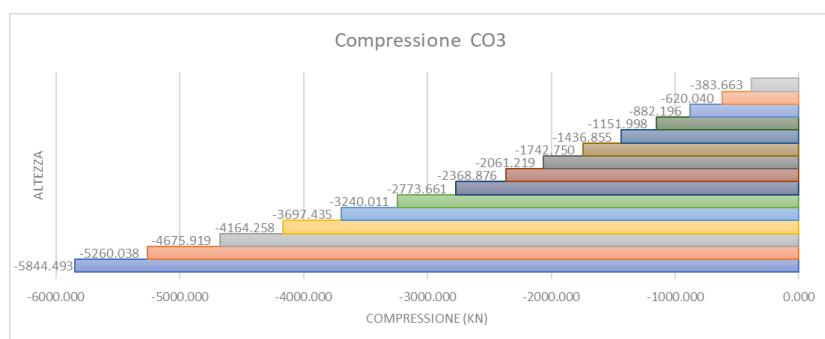


Figura 382: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 4

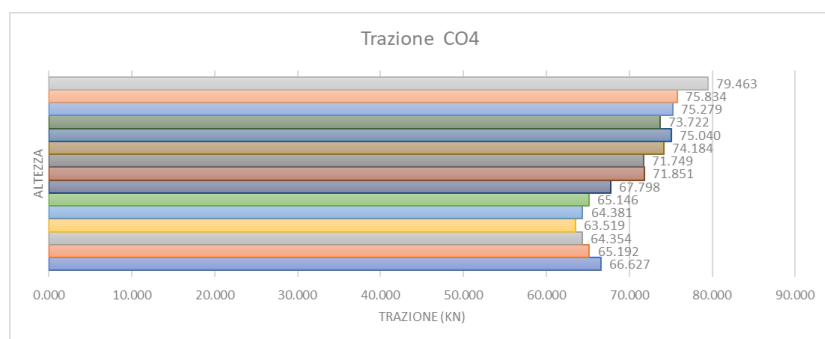


Figura 383: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 4

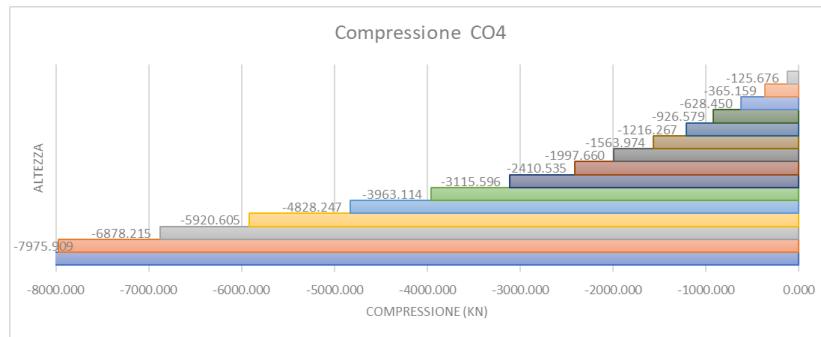


Figura 384: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 4

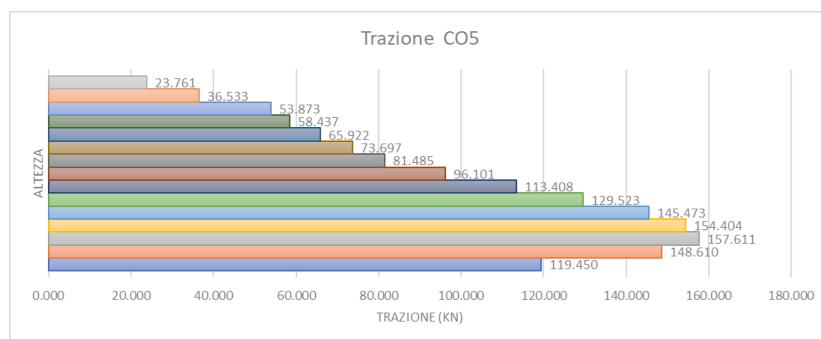


Figura 385: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 4

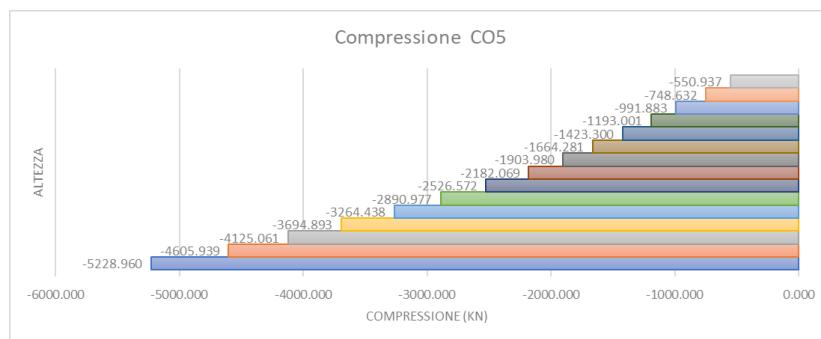


Figura 386: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 4

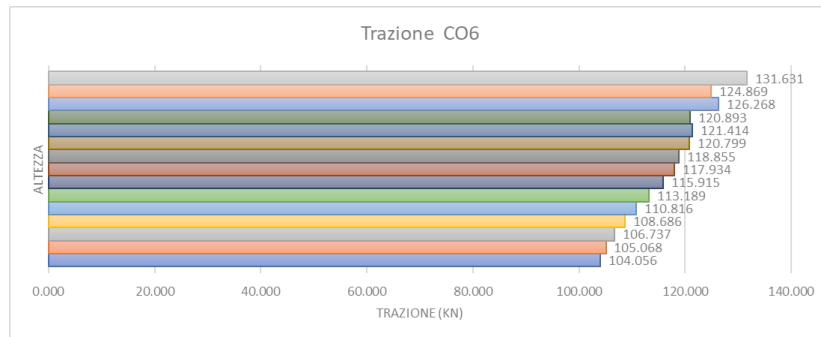


Figura 387: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 4

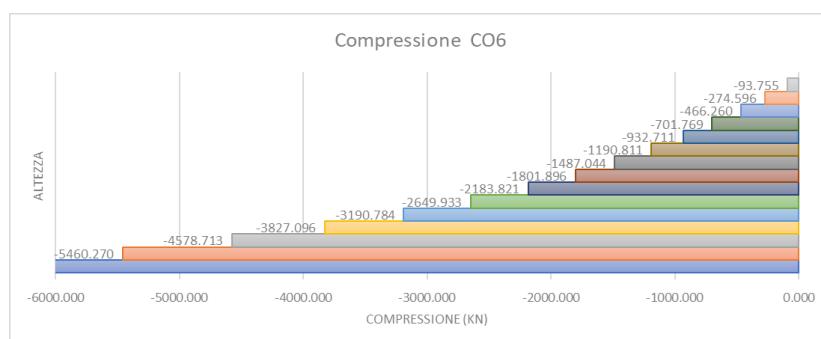


Figura 388: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 4

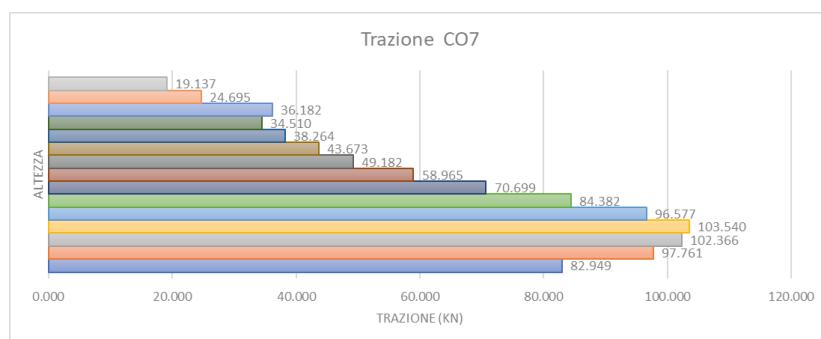


Figura 389: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 4

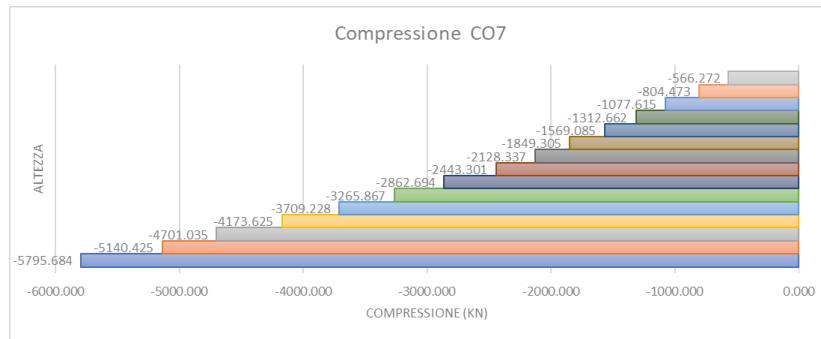


Figura 390: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 4

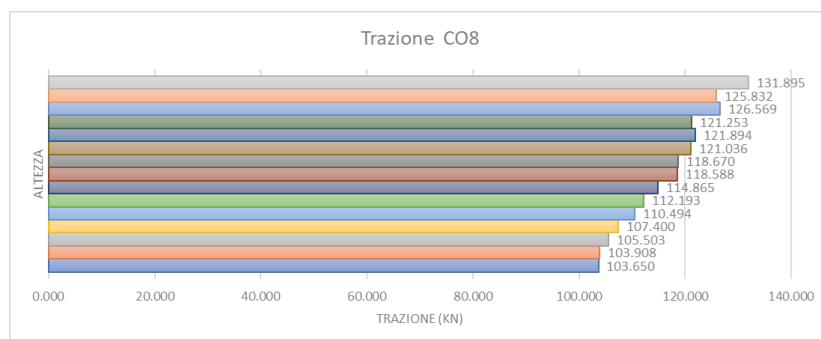


Figura 391: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 4

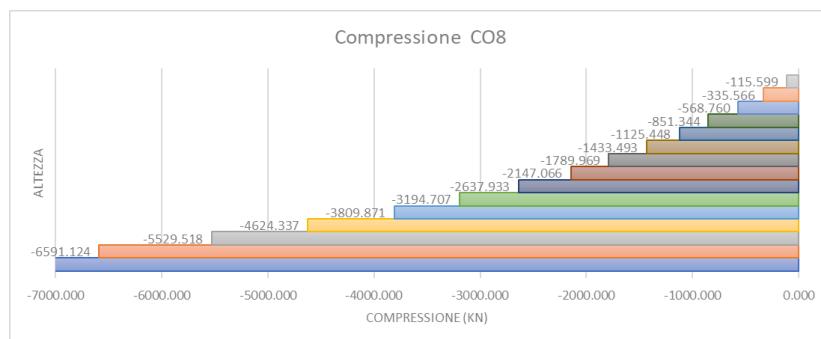


Figura 392: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 4

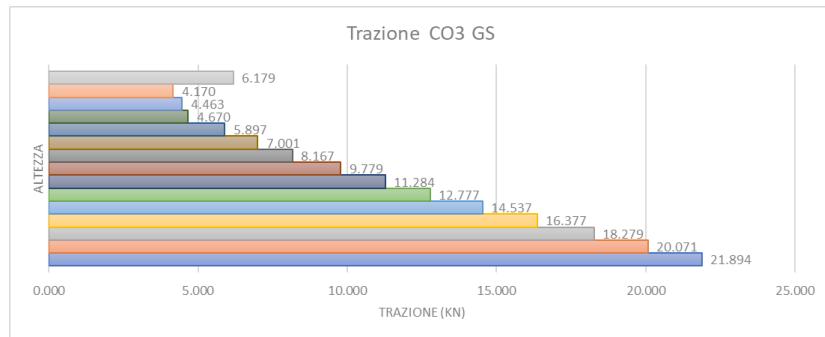


Figura 393: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti

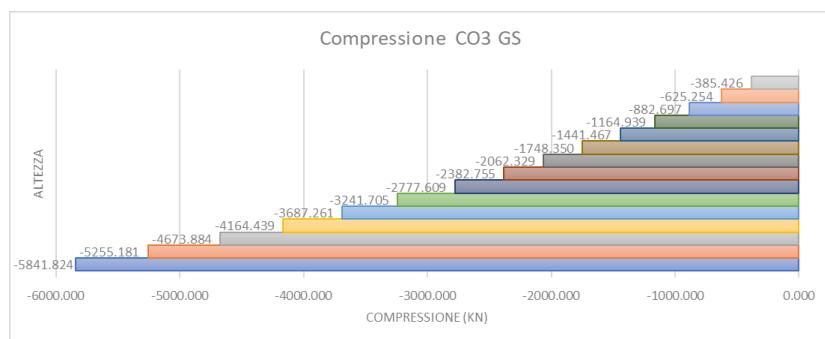


Figura 394: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO3, Zona 4 grandi spostamenti

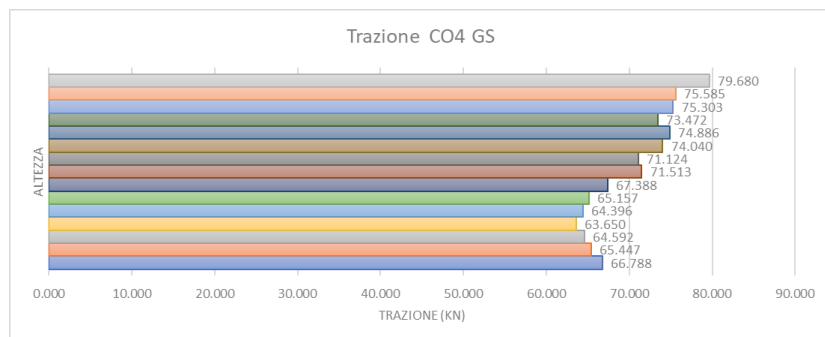


Figura 395: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti

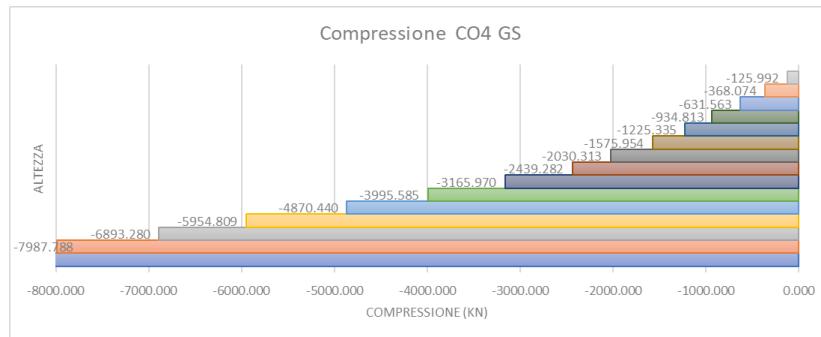


Figura 396: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO4, Zona 4 grandi spostamenti

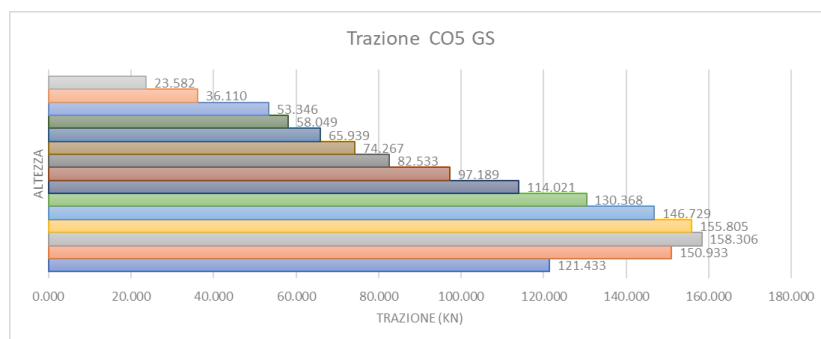


Figura 397: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti

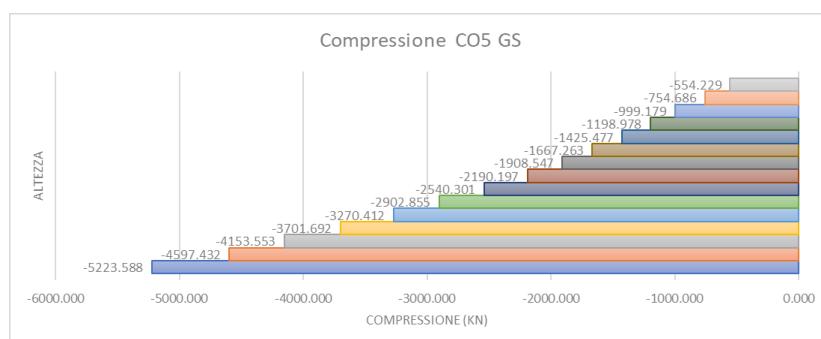


Figura 398: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO5, Zona 4 grandi spostamenti

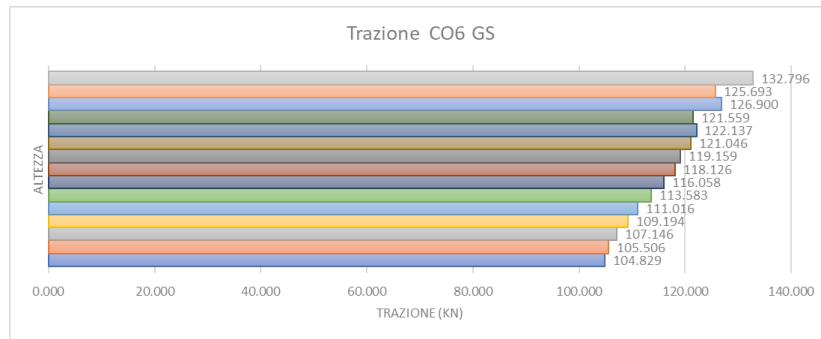


Figura 399: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti

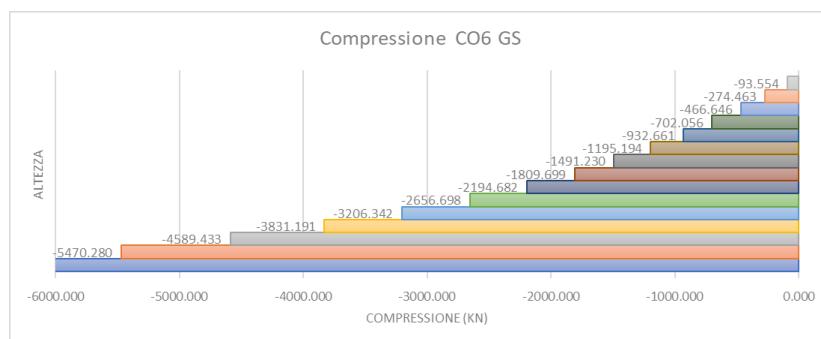


Figura 400: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO6, Zona 4 grandi spostamenti

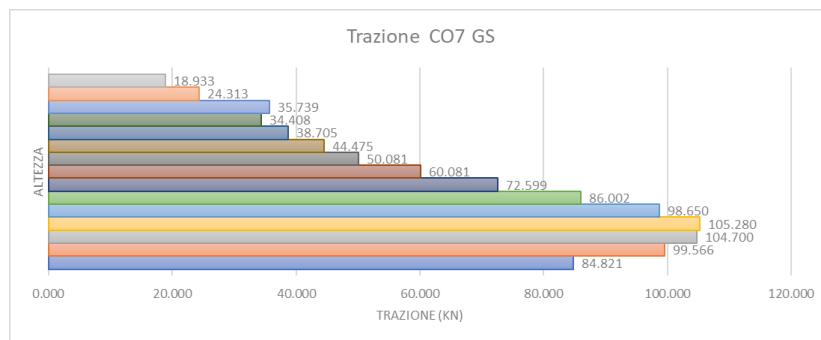


Figura 401: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti

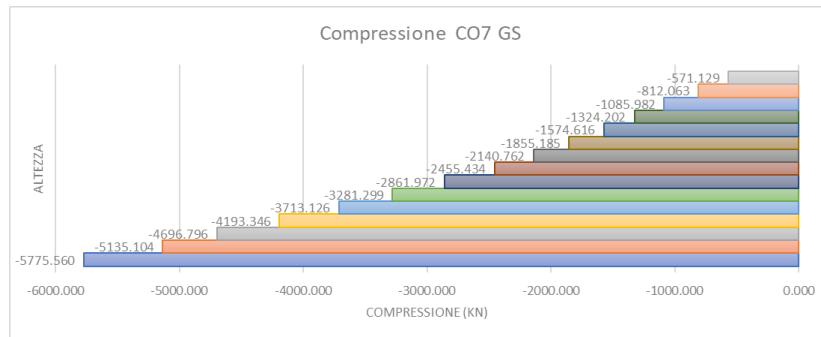


Figura 402: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO7, Zona 4 grandi spostamenti

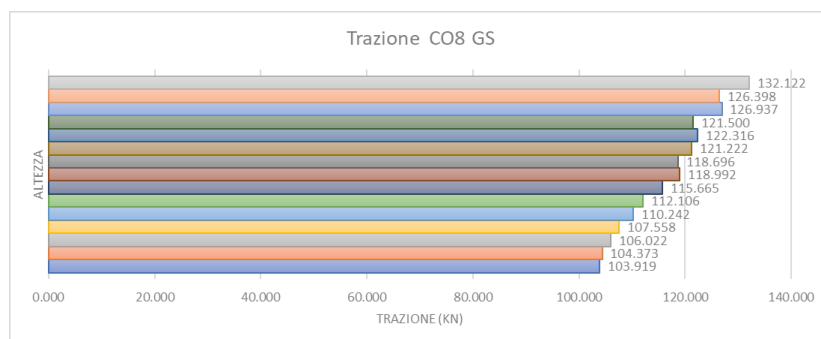


Figura 403: Andamento della trazione nella combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti

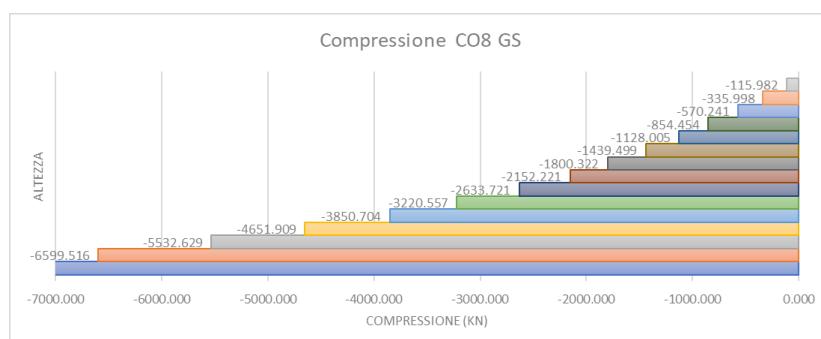


Figura 404: Andamento della compressione nella combinazione di carico CO8, Zona 4 grandi spostamenti