

Indice

Prefazione	.....	XXV
Premessa	.....	XXVII
Introduzione	.....	XXIX
Simbologia	.....	XXXIII
Acronimi	.....	XXXIX

CAPITOLO 1 I materiali

1.1	INTRODUZIONE	1
1.2	LE CARATTERISTICHE DEL RINFORZO	2
1.2.1	Le principali fibre per compositi.....	7
1.2.1.1	Fibre di vetro.....	8
1.2.1.2	Fibre di carbonio.....	8
1.2.1.3	Fibre di arammide.....	9
1.2.1.4	Altre tipologie di fibre	10
1.2.2	Le matrici	11
1.2.2.1	Resine epossidiche.....	12
1.2.2.2	Resine poliestere.....	12
1.2.2.3	Altre tipologie di resine	13
1.2.3	Gli adesivi	14
1.2.4	I sistemi di rinforzo	16
1.3	QUANDO UTILIZZARE UN COMPOSITO	17
1.4	PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO DI RINFORZO	21
1.4.1	Come valutare l'effetto dell'azione di progetto E_d	22
1.4.2	Le proprietà dei materiali e dei prodotti.....	23
1.4.3	Come valutare la capacità di calcolo R_d per i vari prodotti.....	25
1.5	PROPRIETÀ DEI MATERIALI E DEI PRODOTTI E LEGAMI COSTITUTIVI.....	27
1.5.1	Caratteristiche dei materiali compositi	27
1.5.1.1	Equazioni costitutive del materiale composito: resistenza a trazione	30
1.5.1.1.1	Caratteristiche meccaniche dei sistemi preformati.....	32
1.5.1.1.2	Caratteristiche meccaniche dei sistemi impregnati in situ	33
1.5.1.1.3	Sistemi preimpregnati.....	35
1.5.2	Il Calcestruzzo.....	35
1.5.2.1	Caratteristiche del calcestruzzo	36
1.5.2.1.1	Resistenza a compressione	36

1.5.2.1.2	Resistenza a trazione	37
1.5.2.1.3	Modulo elastico	37
1.5.2.1.4	Coefficiente di Poisson.....	38
1.5.2.1.5	Coefficiente di dilatazione termica.....	38
1.5.2.2	Legami costitutivi σ - ϵ e resistenze di calcolo del calcestruzzo	38
1.5.2.2.1	Resistenza di calcolo a compressione	38
1.5.2.2.2	Resistenza di calcolo a trazione.....	39
1.5.2.2.3	Diagrammi di calcolo tensione-deformazione del calcestruzzo	
	in compressione.....	39
1.5.3	L'acciaio.....	40
1.5.3.1	Caratteristiche dell'acciaio	42
1.5.3.1.1	Resistenza a trazione	42
1.5.3.1.2	Tensione tangenziale di aderenza acciaio-calcestruzzo	43
1.5.3.1.3	Diagrammi di calcolo tensione-deformazione dell'acciaio	43
1.5.4	La muratura	44
1.5.4.1	Come ricavare la resistenza caratteristica a compressione	45
1.5.4.2	Come ricavare la resistenza caratteristica a taglio in assenza di tensioni normali.....	45
1.5.4.3	Come ricavare la resistenza caratteristica a taglio in presenza di..... tensioni normali	45
1.5.4.4	Moduli elastici secanti della muratura	46
1.5.4.5	Caratteristiche della muratura.....	47
1.5.4.5.1	Resistenze di progetto a compressione e a taglio	48
1.5.4.5.2	Diagrammi di calcolo tensione-deformazione muratura	48

CAPITOLO 2 La durabilità dei compositi

2.1	INTRODUZIONE	51
2.1.1	Le azioni ambientali.....	52
2.1.1.1	Effetti da ambiente alcalino (o acido).....	53
2.1.1.2	Effetti dell'umidità (acqua e soluzione salina)	53
2.1.1.3	Effetti di temperature estreme e cicli termici	53
2.1.1.4	Cicli di gelo e disgelo	54
2.1.1.5	Effetti delle radiazioni ultraviolette (UV).....	55
2.1.2	Modalità di carico	55
2.1.2.1	Effetti di viscosità e rilassamento	56
2.1.2.2	Effetti delle sollecitazioni cicliche.....	57
2.2	LA PROGETTAZIONE DELLA DURABILITÀ DEI SISTEMI COMPOSITI	57
2.2.1	La durabilità secondo le linee guida italiane (LG2009 e DT200).....	57
2.2.2	La durabilità secondo il <i>fib</i> n°14/2001	59
2.2.3	La durabilità secondo l'ACI 440.2R-02.....	60
2.2.4	La durabilità secondo la JSCE/2001	62
2.2.5	La durabilità secondo le linee guida australiane	62

2.2.6	La durabilità secondo le norme canadesi CHBDC/2006	62
2.2.7	La durabilità a confronto: LG2009 (e CNR DT-200/2004) vs CHBDC/2006	63
2.2.8	La durabilità: Conclusioni.....	63
CAPITOLO 3 L'incendio e le altre azioni eccezionali		
3.1	INCENDIO	66
3.1.1	Introduzione	66
3.1.2	Richieste di prestazione (resistenza).....	68
3.1.3	Criteri di progettazione "alle resistenze" secondo la NTC2008	70
3.1.4	Procedura di analisi della resistenza al fuoco secondo la NTC2008	70
3.1.4.1	Incendio di progetto.....	70
3.1.4.2	Analisi dell'evoluzione della temperatura	72
3.1.4.3	Analisi del comportamento meccanico.....	72
3.1.4.4	Verifiche di sicurezza	73
3.1.5	Capacità di resistenza al fuoco dei materiali coinvolti nel rinforzo.....	74
3.1.6	Reazione al fuoco: definizione.....	76
3.1.6.1	Reazione al fuoco dei materiali coinvolti nel rinforzo	77
3.1.7	Strategie di intervento	77
3.1.7.1	Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco secondo le linee guida italiane (LG2009 e DT200).....	78
3.1.7.2	Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco secondo il fib n°14/2001	80
3.1.7.3	Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco secondo l'ACI 440.2R-02 ..	81
3.1.7.4	Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco secondo la JSCE 2001	82
3.1.7.5	Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco secondo la..... CHBDC del 2006.....	83
3.1.8	Alternative progettuali	83
3.2	LE ALTRE AZIONI ECCEZIONALI.....	84
3.3	CONCLUSIONI E OSSERVAZIONI	85
CAPITOLO 4 L'aderenza con il substrato in calcestruzzo		
4.1	MECCANISMI DI ROTTURA PER DELAMINAZIONE NEL C.A.	88
4.2	LUNGHEZZA OTTIMALE DI ANCORAGGIO	92
4.3	MODELLI PER LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE.....	94
4.3.1	Modelli empirici.....	94
4.3.2	Modelli equazioni progettuali	95
4.3.3	Approccio secondo la meccanica della frattura coesiva (NLFM).....	95
4.3.3.1	Massima forza trasmissibile ed energia di frattura	96
4.3.3.2	Il legame di interfaccia bilineare	100
4.3.3.2.1	Grandezze principali per la conoscenza della legge bilineare del DT200	101
4.3.3.2.2	Andamento delle tensioni tangenziali all'interfaccia al crescere della forza applicata secondo la legge bilineare del DT200: caso di delaminazione di estremità.....	102

4.3.3.3	Altri approcci analitici presenti in letteratura secondo la meccanica della frattura.....	105
4.3.4	Verifiche di sicurezza nei confronti della delaminazione secondo la LG2009 (e il DT200).....	106
4.3.4.1	Verifica di sicurezza nei confronti della delaminazione: parametri fondamentali	106
4.3.4.2	Resistenza alla delaminazione di estremità per lo SLU: equazioni progettuali	108
4.3.4.2.1	Alcune considerazioni di natura sperimentale sulla resistenza alla delaminazione di estremità per lo SLU	110
4.3.4.3	Resistenza alla delaminazione per fessurazione intermedia indotta dalla flessione allo SLU: equazioni progettuali.....	111
4.3.4.3.1	Delaminazione per fessurazione intermedia per $s_{rm} > 2l_e$	113
4.3.4.3.2	Delaminazione per fessurazione intermedia per $s_{rm} < 2l_e$	113
4.3.4.3.3	Evidenze sperimentali che hanno portato alla taratura dei coefficienti per fessurazione in Modalità 2	114
4.3.4.4	Resistenza alla delaminazione nel rinforzo a taglio allo SLU.....	115
4.3.4.5	Verifica delle tensioni di interfaccia allo SLE.....	117
4.3.5	Verifiche di sicurezza nei confronti della delaminazione secondo le linee guida internazionali.....	118
4.3.5.1	Verifica alla delaminazione secondo il fib n°14 del 2001	119
4.3.5.1.1	Approccio n°1: Verifica dell'ancoraggio e limitazione della deformazione dell'FRP.....	119
4.3.5.1.2	Approccio n°2: Verifica dell'ancoraggio e limitazione della deformazione dell'FRP.....	121
4.3.5.1.3	Approccio n°3: Verifica dell'ancoraggio e della forza trasferibile tra FRP e calcestruzzo	123
4.3.5.1.4	Verifica dell'ancoraggio nel rinforzo a taglio	124
4.3.5.1.4.1	Considerazioni sulla lunghezza dell'incollaggio.....	126
4.3.5.2	Verifica alla delaminazione secondo l'ACI 440.2R/02.....	127
4.3.5.2.1	Verifica alla delaminazione nel rinforzo a flessione secondo l'ACI 440.2R-02.....	127
4.3.5.2.2	Verifica alla delaminazione nel rinforzo a taglio secondo l'ACI 440.2R-02.....	128
4.3.5.2.3	Indicazioni progettuali fornite dall'ACI 440.2R-02.....	130
4.3.5.3	Verifica alla delaminazione secondo la JSCE-2001	131
4.3.5.3.1	Verifica alla delaminazione di estremità secondo la JSCE-2001	131
4.3.5.3.2	Verifica alla delaminazione intermedia secondo la JSCE-2001	131
4.3.5.3.3	Metodi operativi secondo la JSCE-2001 per il calcolo della resistenza della sezione rinforzata a flessione.....	132
4.3.5.3.4	Verifica alla delaminazione nel rinforzo a taglio secondo la JSCE-2001	132
4.3.5.4	Verifica alla delaminazione secondo la Australian guideline-2006	134
4.3.5.4.1	Verifica alla delaminazione intermedia secondo la norma australiana/2006: resistenza di base alla delaminazione ricavata da trazione su provini	134

4.3.5.4.1.1	Equazioni progettuali generali per la verifica della delaminazione per IC: “Adelaide generic approach”	136
4.3.5.4.1.2	Equazioni progettuali generali per la verifica della delaminazione per IC: “Hong Kong approach”	137
4.3.5.4.1.3	Verifica alla delaminazione intermedia secondo la norma australiana/2006: resistenza alla delaminazione di una trave.....	137
4.3.5.4.2	Verifica alla delaminazione nel rinforzo a taglio di una trave per CDC	138
4.3.5.4.3	Verifica alla delaminazione nel rinforzo a taglio di una trave per SIC	138
4.3.5.4.4	Verifica alla delaminazione di estremità del rinforzo	140
4.3.5.5	Verifica alla delaminazione secondo la linea guida canadese: CHBDC-2006...	141
4.3.6	Conclusioni ed osservazioni.....	141
4.4	ESEMPIO	144

CAPITOLO 5 Il rinforzo a flessione di elementi in c.a.

5.1	ASSUNZIONI GENERALI.....	149
5.2	IL PROBLEMA DEL RINFORZO A FLESSIONE ALLO SLU	150
5.2.1	Stato della struttura all’atto del rinforzo	153
5.2.2	Resistenza di progetto a flessione semplice dell’elemento rinforzato con FRP: procedimento operativo delle linee guida italiane	154
5.2.3	Resistenza di progetto a pressoflessione dell’elemento rinforzato con FRP secondo le linee guida italiane: introduzione.....	157
5.2.3.1	Valutazione del momento resistente di progetto per pressoflessione con il legame costitutivo del calcestruzzo parabola-rettangolo.....	160
5.2.3.1.1	Rottura lato rinforzo	161
5.2.3.1.2	Rottura lato calcestruzzo	164
5.2.3.2	Valutazione del momento resistente di progetto per pressoflessione con il legame costitutivo del calcestruzzo triangolo-rettangolo	166
5.2.3.2.1	Rottura lato rinforzo	167
5.2.3.2.2	Rottura lato calcestruzzo	169
5.2.3.3	Valutazione del momento resistente di progetto per pressoflessione con il legame costitutivo del calcestruzzo “stress-block”.....	171
5.2.3.3.1	Rottura lato rinforzo	172
5.2.3.3.2	Rottura lato calcestruzzo	174
5.2.3.4	Valutazione del momento resistente di progetto per pressoflessione con il metodo semplificato del DT200 proposto in Appendice C	175
5.2.3.5	Indicazioni progettuali delle linee guida italiane contro il collasso per delaminazione di estremità	178
5.2.4	La duttilità di elementi inflessi secondo il DT200	179
5.3	IL RINFORZO A FLESSIONE SECONDO L’ACI 440.2R-02.....	180
5.3.1	Duttilità richiesta al rinforzo secondo l’ACI 440.2R-02.....	182
5.4	IL RINFORZO A FLESSIONE SECONDO IL <i>fib bulletin n°14</i>	182
5.4.1	La duttilità flessionale secondo il <i>fib n°14</i>	184
5.5	IL RINFORZO A FLESSIONE SECONDO IL JSCE-2001	185

5.6	IL RINFORZO A FLESSIONE SECONDO LA LINEA GUIDA AUSTRALIANA.....	185
5.6.1	Le filosofie di rinforzo a flessione con placcaggi longitudinali secondo la linea guida australiana	187
5.6.1.1	“Fully plated beam – anchorage approach”.....	187
5.6.1.2	“Partially plated beam – hinge approach”	188
5.7	ESEMPIO RINFORZO A FLESSIONE SECONDO LE LINEE GUIDA ITALIANE ...	188
5.7.1	M_{Rd} con calcestruzzo compresso plastico e acciaio teso snervato	190
5.7.2	M_{Rd} con calcestruzzo compresso plastico e acciaio compresso elastico.....	191
5.7.3	Calcolo del momento di primo snervamento della sezione non rinforzata.....	192
5.7.4	Valutazione della duttilità della sezione non rinforzata.....	193
5.7.5	Progetto del rinforzo a flessione tramite l’applicazione di FRP	194
5.7.5.1	Rottura FRP e calcestruzzo in campo elastico.....	195
5.7.5.2	Duttilità della sezione rinforzata.....	197

CAPITOLO 6 Il rinforzo a taglio di elementi in c.a.

6.1	INTRODUZIONE AL RINFORZO A TAGLIO CON FRP	200
6.1.1	Configurazioni del rinforzo.....	201
6.2	RESISTENZA DI PROGETTO A TAGLIO DELL’ELEMENTO RINFORZATO CON FRP SECONDO LE LINEE GUIDA ITALIANE.....	202
6.2.1	Resistenza efficace di progetto del rinforzo.....	205
6.2.2	Limitazioni e dettagli costruttivi	208
6.3	IL TRALICCIO RESISTENTE DI MOERSCH.....	209
6.3.1	Calcolo della forza e delle relative resistenze nelle bielle di calcestruzzo compresso e in quelle tese di acciaio e di FRP	210
6.3.1.1	Contributo resistente del c.a. dovuto ai meccanismi secondari secondo la NTC 2008	212
6.3.1.2	Limitazioni da imporre ai contributi del traliccio per ottenere le resistenze delle staffe e del calcestruzzo secondo la NTC2008	213
6.4	VALUTAZIONE DEL RINFORZO A TAGLIO SECONDO IL <i>fib</i> n°14-2001	215
6.4.1	Raccomandazioni progettuali del <i>fib</i> n°14 per il rinforzo a taglio.....	216
6.5	MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEL RINFORZO A TAGLIO SECONDO L’ACI 440.2R-02	217
6.6	MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEL RINFORZO A TAGLIO SECONDO LA JSCE-2001	220
6.6.1	I contributi del calcestruzzo compresso e delle staffe secondo la JSCE-2001	221
6.7	MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEL RINFORZO A TAGLIO SECONDO LA LINEA GUIDA AUSTRALIANA	222
6.7.1	Rinforzo con placcaggio longitudinale	222
6.7.2	Rinforzo con placcaggio trasversale: inclinato o verticale	223
6.8	CONCLUSIONI SUL RINFORZO A TAGLIO.....	225
6.9	ESEMPIO	226
6.9.1	Calcolo del taglio resistente di progetto.....	227
6.9.1.1	Contributo del calcestruzzo	228

6.9.1.2	Contributo delle staffe	228
6.9.1.3	Contributo del calcestruzzo d'anima	228
6.9.1.4	Taglio resistente della trave	228
6.9.2	Calcolo del taglio sollecitante per il rispetto della gerarchia delle resistenze	229
6.9.3	Calcolo del rinforzo a taglio.....	230
CAPITOLO 7 Il rinforzo a torsione di elementi in c.a.		
7.1	IL RINFORZO A TORSIONE CON FRP	234
7.1.1	Generalità	234
7.1.2	Configurazioni per il rinforzo a torsione.....	234
7.2	TRALICCIO DI MOERSCH SPAZIALE	235
7.3	RESISTENZA DI PROGETTO A TORSIONE SECONDO LA LG2009 E IL DT200 ..	238
7.3.1	Resistenza di progetto a torsione secondo le linee guida italiane	238
7.3.1.1	Limitazioni e dettagli costruttivi secondo le linee guida italiane	240
7.4	RESISTENZA DI PROGETTO A TORSIONE SECONDO IL <i>fib</i> n°14.....	241
7.5	CONCLUSIONI.....	242
7.6	ESEMPIO	242
7.6.1	Calcolo della sezione cava equivalente e dei contributi dei vari elementi componenti il traliccio resistente	243
7.6.2	Calcolo del torcente resistente della trave in c.a. non rinforzata	244
7.6.3	Calcolo del momento torcente resistente della trave in c.a. rinforzata	244
CAPITOLO 8 Il confinamento di elementi in c.a.		
8.1	GRANDEZZE FONDAMENTALI NEL DIMENSIONAMENTO DEL RINFORZO ...	248
8.1.1	Deformazione ultima effettiva circonferenziale	248
8.1.2	Pressione laterale di confinamento	249
8.1.3	Stato sferico di tensione	251
8.1.4	Parametri meccanici (del calcestruzzo) di interesse nel confinamento.....	252
8.2	IL CONFINAMENTO SECONDO LE LINEE GUIDA ITALIANE	252
8.2.1	Generalità	252
8.2.2	Stima della pressione laterale di confinamento secondo la LG2009 e il DT200	255
8.2.2.1	Sezione circolare.....	257
8.2.2.2	Sezioni quadrate o rettangolari	258
8.2.3	Resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato.....	260
8.2.4	Resistenza di progetto a pressoflessione dell'elemento confinato.....	263
8.3	IL CONFINAMENTO SECONDO IL <i>fib</i> n° 14.....	267
8.3.1	Pressione laterale effettiva di confinamento	267
8.3.1.1	Influenza della fasciatura parziale lungo l'elemento	267
8.3.1.2	Influenza dell'inclinazione delle fibre	268
8.3.1.3	Influenza della forma della sezione trasversale	269
8.3.2	Equazioni predittive "esatte" secondo il <i>fib</i> n°14	269

8.3.3	Equazioni predittive “approssimate” secondo il <i>fib</i> n°14	270
8.3.3.1	Formula pratica di Seible e al., [1995b]	270
8.3.3.2	Formula pratica di Spoelstra e Monti, [1999].....	271
8.3.4	Incremento della duttilità per mezzo del confinamento nelle applicazioni sismiche secondo il <i>fib</i> n°14	271
8.4	IL CONFINAMENTO SECONDO L’ACI 440.2R-02.....	273
8.4.1	Compressione assiale	273
8.4.1.1	Sezioni circolari	274
8.4.1.2	Sezioni rettangolari o quadrate	274
8.4.1.3	Stato limite di esercizio	274
8.4.2	Resistenza a trazione	275
8.4.3	Duttilità	275
8.4.3.1	Sezioni circolari	275
8.4.3.2	Sezioni rettangolari o quadrate	276
8.5	IL CONFINAMENTO SECONDO IL JSCE-2001	276
8.5.1	Sicurezza strutturale rispetto alle azioni sismiche: rapporto di duttilità di progetto per gli elementi	276
8.5.2	Modello di forze per gli elementi risanati	278
8.6	IL CONFINAMENTO SECONDO LA CHBDC	278
8.7	CONCLUSIONI.....	279
8.8	ESEMPIO SUL CONFINAMENTO DI ELEMENTI PREVALENTEMENTE COMPRESSI	280
8.8.1	Progetto del rinforzo di confinamento	281
8.8.2	Valutazione della pressione laterale per la configurazione discontinua	282
8.8.3	Valutazione della pressione laterale per la configurazione continua	283
8.8.4	Confronto tra le due applicazioni.....	283
8.9	ESEMPIO SUL CONFINAMENTO DI ELEMENTI PRESSOINFLESSI IN TERMINI DI RESISTENZA	284
8.9.1	M_{Rd} con calcestruzzo compresso elastico e acciaio teso snervato	285
8.9.2	Progetto del rinforzo in FRP	286
8.9.2.1	Valutazione degli effetti del confinamento.....	287
8.9.2.2	Valutazione del momento resistente della sezione rinforzata a pressoflessione	288
8.10	ESEMPIO SUL CONFINAMENTO DI ELEMENTI PRESSOINFLESSI IN TERMINI DI DUTTILITA’	288
8.11	VALUTAZIONE RESISTENZA ULTIMA DEL CALCESTRUZZO CONFINATO CON FRP – SVILUPPO STORICO	291
8.12	VALUTAZIONE LEGAME COSTITUTIVO DEL CALCESTRUZZO CONFINATO	292

CAPITOLO 9 Introduzione alla muratura

9.1	PROBLEMATICHE RELATIVE AGLI FRP SU MURATURE	298
9.2	CRITERI DI VERIFICA.....	298

9.3	IMPORTANZA DELLE IPOTESI DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE SUL COMPORTAMENTO DEL MATERIALE MURATURA	299
9.3.1	Resistenza e rigidezza infinite.....	300
9.3.2	Resistenza e rigidezza finite.....	301
9.4	RINFORZO DI MURATURE	302
9.4.1	Resistenza e rigidezza infinite.....	303
9.4.2	Resistenza e rigidezza finite.....	304

CAPITOLO 10 L'aderenza del composito con la muratura

10.1	PRINCIPI GENERALI	308
10.2	RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE RADENTE ALLO SLU	310
10.3	RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE IN PRESENZA DI AZIONE NORMALE AL PIANO DI ADESIONE	313
10.4	CONCLUSIONI ADERENZA	315
10.5	ESEMPIO DI CALCOLO ADERENZA SU PANNELLI MURARI.....	315
10.6	ESEMPIO DI CALCOLO ADERENZA SU SUPERFICI CURVE.....	317

CAPITOLO 11 Il rinforzo a pressoflessione di elementi in muratura ordinaria

11.1	RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI MASCHI MURARI	319
11.2	PRESSOFLESSIONE CON LEGAME ELASTICO PERFETTAMENTE PLASTICO	321
11.2.1	Rottura lato rinforzo.....	321
11.2.2	Rottura lato muratura	324
11.3	PRESSOFLESSIONE CON "STRESS-BLOCK"	325
11.3.1	Rottura lato muratura	326
11.4	RINFORZO A PRESSOFLESSIONE CON PIU' TESSUTI O CON LARGHEZZE "PARAGONABILI" ALL'ESTENSIONE DEL MASCHIO	327
11.5	RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI MASCHI MURARI PER AZIONI FUORI DAL PROPRIO PIANO.....	328
11.6	RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DI ARCHITRAVI E FASCE DI PIANO	329
11.6.1	Verifica dell'architrave	331
11.6.2	Verifica fascia di piano	332
11.7	CONCLUSIONI.....	334
11.8	ESEMPIO RINFORZO A FLESSIONE MASCHIO MURARIO	334
11.8.1	M_{Rd} della muratura ordinaria non rinforzata secondo il legame "triangolo-rettangolo"	336
11.8.2	M_{Rd} della muratura ordinaria non rinforzata secondo il legame "stress-block"	336
11.8.3	Valutazione della sezione rinforzata	337
11.8.3.1	Momento resistente della sezione rinforzata	338
11.9	ESEMPIO DI RINFORZO A FLESSIONE FASCIA DI PIANO	340
11.9.1	Calcolo del rinforzo a flessione con FRP della fascia di piano	341

11.10	RINFORZO DI UN ARCHITRAVE	342
11.11	RINFORZO DI UN MASCHIO MURARIO PER SOLLECITAZIONI FUORI DAL SUO PIANO.....	343

CAPITOLO 12 Il rinforzo a taglio di elementi in muratura ordinaria

12.1	RINFORZO A TAGLIO DEI MASCHI MURARI	345
12.1.1	Contributo resistente generato dall'attrito nella muratura	347
12.1.2	Calcolo della forza e delle relative resistenze nelle bielle di muratura compressa e nel composito nel caso di elementi snelli.....	350
12.1.3	Ipotesi alla base della trattazione per ricavare le formule contenute nelle linee guida italiane	352
12.1.4	Rinforzi a taglio lungo le diagonali.....	353
12.1.4.1	Rinforzi a taglio disposti lungo le diagonali del pannello in presenza di rinforzi a pressoflessione	354
12.1.4.2	Rinforzi a taglio disposti lungo le diagonali del pannello in assenza di rinforzi a pressoflessione	356
12.2	RINFORZO A TAGLIO DELLE FASCE DI PIANO.....	357
12.3	ESEMPIO DI RINFORZO A TAGLIO DI UN MASCHIO MURARIO.....	359
12.3.1	Calcolo del rinforzo a taglio.....	359
12.4	RINFORZO A TAGLIO DI UNA FASCIA DI PIANO.....	361
12.4.1	Calcolo del rinforzo a taglio della fascia di piano	362

CAPITOLO 13 Il confinamento di elementi in muratura ordinaria

13.1	INTRODUZIONE	365
13.1.1	Resistenza di progetto a compressione centrata dell'elemento confinato.....	367
13.1.1.1	Fattori necessari per la valutazione della resistenza di progetto a compressione centrata di colonne circolari confinate.....	369
13.1.1.2	Fattori necessari per la valutazione della resistenza di progetto a compressione centrata di colonne rettangolari confinate	372
13.2	ESEMPIO	376
13.2.1	Calcolo del quantitativo di rinforzo necessario per il confinamento	376

CAPITOLO 14 Il rinforzo di elementi strutturali in muratura ordinaria a semplice e doppia curvatura

14.1	INTRODUZIONE	379
14.2	ARCHI INSISTENTI SU IMPOSTE FISSE: SCHEMA AD ARCO.....	381
14.3	ARCHI INSISTENTI SU IMPOSTE CEDEVOLI: SCHEMA AD ARCO-PIEDRITTO	385
14.4	VOLTE A SEMPLICE CURVATURA: VOLTE A BOTTE.....	386
14.5	VOLTE A DOPPIA CURVATURA.....	388
14.5.1	Cupole	388
14.5.2	Volte a vela	392

CAPITOLO 15 L'azione sismica	
15.1	GENERALITÀ..... 393
15.2	LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA..... 393
15.2.1	Periodo di riferimento per l'azione sismica..... 393
15.2.2	La probabilità di superamento..... 394
15.2.3	Gli stati limite da verificare..... 395
15.3	PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE..... 397
15.3.1	Macrozonazione sismica..... 399
15.4	PROCEDURA DI CALCOLO..... 400
15.4.1	Esempio: calcolo del periodo di ritorno T_R 400
15.5	SITUAZIONI PARTICOLARI..... 401
15.5.1	Il T_R non ricade nei nove valori riportati nell'Appendice B..... 401
15.5.2	Il punto nel territorio non ricade nei nodi del reticolo di riferimento..... 402
15.6	CRITERI GENERALI DI CLASSIFICAZIONE..... 403
15.7	RISPOSTA SISMICA LOCALE: MICROZONAZIONE SISMICA..... 404
15.7.1	Modifica del moto sismico proveniente dal substrato causata da condizioni geologiche, geomorfologiche, tettoniche e geotecniche locali..... 404
15.8	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO..... 406
15.9	CLASSIFICAZIONE DEI SUOLI STRATIFICATI..... 410
15.10	CONDIZIONI TOPOGRAFICHE..... 410
15.11	CALCOLO DELLO SPETTRO DI RISPOSTA DELL'AZIONE ORIZZONTALE..... 411
15.11.1	Amplificazione stratigrafica..... 413
15.11.2	Amplificazione topografica..... 415
15.11.3	Esempio..... 415
15.12	CALCOLO DELLO SPETTRO ELASTICO IN ACCELERAZIONE DELLA COMPONENTE VERTICALE..... 417
15.12.1	Esempio..... 417
15.13	SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO IN SPOSTAMENTO DELLE COMPONENTI ORIZZONTALI..... 418
15.13.1	Esempio..... 419
CAPITOLO 16 Stati limite e criteri di verifica per gli edifici esistenti in c.a.	
16.1	LA DUTTILITÀ E LA GERARCHIA DELLE RESISTENZE NELLE STRUTTURE IN C.A. 421
16.1.1	Come attuare la gerarchia delle resistenze in edifici esistenti in c.a. 422
16.1.1.1	Gerarchia delle resistenze a livello dei materiali costituenti: acciaio/calcestruzzo..... 423
16.1.1.1.1	Requisiti dell'acciaio per la gerarchia delle resistenze a livello dei materiali costituenti..... 423
16.1.1.2	Gerarchia delle resistenze negli elementi: duttili/fragili→flessione/taglio..... 424
16.1.1.3	Gerarchia delle resistenze della struttura intelaiata: travi/pilastri..... 424
16.1.1.4	Gerarchia delle resistenze della struttura intelaiata: pilastri/fondazione..... 424

16.1.2	I vari livelli di duttilità	425
16.1.2.1	Duttilità del materiale	425
16.1.2.2	Duttilità della sezione	425
16.1.2.3	Duttilità dell'elemento	426
16.1.2.4	Duttilità della struttura.....	427
16.2	VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'AZIONE SISMICA SUGLI ELEMENTI STRUTTURALI DI EDIFICI IN C.A.	427
16.3	VALUTAZIONE DELLA CAPACITA' DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI.....	428
16.4	I CRITERI DI VERIFICA DEL C.A. PER CIASCUNO STATO LIMITE.....	428

CAPITOLO 17 Le informazioni necessarie per la valutazione delle strutture esistenti in c.a.

17.1	INTRODUZIONE: I DATI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE	431
17.2	EDIFICI IN CEMENTO ARMATO: GENERALITÀ	432
17.3	I DATI RICHIESTI PER GLI EDIFICI IN CALCESTRUZZO ARMATO	432
17.4	I LIVELLI DI CONOSCENZA	433
17.5	LA GEOMETRIA DELL'EDIFICIO	436
17.6	I DETTAGLI COSTRUTTIVI.....	436
17.7	LE PROPRIETA' DEI MATERIALI	437

CAPITOLO 18 I metodi di analisi e le condizioni di applicabilità per le strutture in c.a.

18.1	IL FATTORE DI STRUTTURA	441
18.2	LA SCELTA DELLE RESISTENZE DI CALCOLO	444
18.3	I METODI DI ANALISI STRUTTURALE SECONDO LA NTC 2008	444
18.4	INTRODUZIONE AI CONCETTI BASE DELL'ANALISI DINAMICA MODALE: FREQUENZE PROPRIE E MODI PROPRI DI VIBRARE	446
18.4.1	Introduzione	446
18.4.2	Analisi modale	446
18.4.3	Analisi della risposta ad un'eccitazione sismica.....	449
18.4.3.1	Determinazione della domanda in analisi temporali ("Time History").....	451
18.4.3.2	Determinazione della domanda tramite lo spettro di risposta	453
18.4.3.2.1	Condizioni di applicabilità delle analisi con spettro elastico	456
18.4.3.2.2	Introduzione alle analisi lineari con spettro di progetto	462
18.5	ANALISI STATICA LINEARE.....	463
18.6	DIFFERENZE ED ANALOGIE TRA L'ANALISI DINAMICA MODALE E LA STATICA LINEARE	466
18.7	ANALISI STATICA NON LINEARE	467
18.7.1	Profili di carico.....	469
18.7.2	Basi della procedura e determinazione degli effetti.....	472

CAPITOLO 19 Le verifiche di sicurezza al termine dell'analisi di strutture in c.a.	
19.1	INTRODUZIONE.....477
19.2	LE VERIFICHE DI SICUREZZA NELL'ANALISI CON SPETTRO ELASTICO 478
19.2.1	Valutazione della domanda degli elementi duttili..... 478
19.2.1.1	Metodo operativo per stabilire la domanda degli elementi duttili..... 479
19.2.2	Valutazione della domanda degli elementi fragili 479
19.2.3	Valutazione della capacità 480
19.2.3.1	Elementi/meccanismi duttili 480
19.2.3.2	Elementi/meccanismi fragili 481
19.2.3.3	Capacità per i vari stati limite..... 481
19.3	LE VERIFICHE DI SICUREZZA NELL'ANALISI CON SPETTRO RIDOTTO 481
19.3.1	Definizione della domanda degli elementi duttili e fragili 482
19.3.2	Definizione della capacità degli elementi duttili e fragili 482
19.3.2.1	Capacità per i vari stati limite..... 483
19.4	LE VERIFICHE DI SICUREZZA NELL'ANALISI STATICA NON LINEARE..... 483
19.4.1	Definizione della domanda degli elementi duttili 484
19.4.2	Definizione della domanda degli elementi fragili..... 484
19.4.3	Definizione della capacità degli elementi/meccanismi duttili e fragili..... 485
19.5	SINTESI DEI CRITERI DI ANALISI E DI VERIFICA DELLA SICUREZZA 485
19.6	MODELLI DI CAPACITA' 486
19.6.1	Elementi/meccanismi duttili (Travi, pilastri e pareti) 486
19.6.1.1	Alcune considerazioni sulla capacità allo Stato Limite di Esercizio..... 489
19.6.1.2	Alcune considerazioni sulla capacità allo Stato Limite Ultimo..... 490
19.6.2	Elementi/meccanismi fragili (Taglio travi e pilastri)..... 492
19.6.3	Elementi/meccanismi fragili (Nodi travi-pilastro) 493
CAPITOLO 20 Il progetto del rinforzo delle strutture in c.a. sotto azioni sismiche	
20.1	CRITERI DI INTERVENTO..... 497
20.2	INTERVENTI SU STRUTTURE IN C.A. 498
20.2.1	Strategie tecniche e sistemi di intervento secondo la NTC2008..... 499
20.2.2	STRATEGIE DI GESTIONE 502
20.3	ADEGUAMENTO SISMICO CON MATERIALI COMPOSITI SECONDO LA NTC2008 502
20.4	INTERVENTI IN ZONA SISMICA CON I MATERIALI COMPOSITI SU STRUTTURE IN C.A. 503
20.4.1	Principi generali di intervento per le linee guida italiane 503
20.4.1.1	Obiettivi della progettazione..... 503
20.4.1.2	Criteri per la scelta dell'intervento con FRP 503
20.4.2	Strategie di intervento 504

20.4.2.1	Eliminazione dei meccanismi di collasso di tipo fragile	505
20.4.2.2	Eliminazione dei meccanismi di collasso di piano	507
20.4.2.3	Incremento della capacità deformativa globale di una struttura	508
20.4.2.4	Incremento della capacità deformativa locale degli elementi	508
20.4.2.4.1	Applicazione del criterio della gerarchia delle resistenze	509
20.5	VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E SISTEMI DI ADEGUAMENTO CON I MATERIALI COMPOSITI	510
20.5.1	Elementi e meccanismi duttili	510
20.5.1.1	Pressoflessione	510
20.5.1.2	Rotazione rispetto alla corda	511
20.5.2	Elementi e meccanismi fragili	512
20.5.2.1	Taglio	512
20.5.2.2	Zone di sovrapposizione	513
20.5.2.3	Svergolamento delle barre longitudinali	513
20.5.2.4	Nodi	514

CAPITOLO 21 Adeguamento sismico di una struttura in c.a. con analisi statica non lineare e FRP

21.1	INQUADRAMENTO STORICO DELLA STRUTTURA	517
21.2	INDAGINI VOLTE ALLA CONOSCENZA DEL MANUFATTO	517
21.3	ANALISI DEI CARICHI	522
21.3.1	Solaio di piano	522
21.3.2	Solaio di sottotetto	523
21.3.3	Solaio di copertura	523
21.3.4	Scala	524
21.3.4.1	Pianerottolo scala	524
21.3.4.2	Rampa scala	524
21.3.5	Tamponature	525
21.4	AZIONE SISMICA	525
21.4.1	Spettri di progetto allo SLU: Condizioni di sottosuolo e topografiche	526
21.5	COMBINAZIONE DI CARICO	528
21.6	MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA	530
21.6.1	Modellazione dei solai e della scala	531
21.6.2	Modellazione della fondazione	531
21.6.3	Presenza dell'eccentricità accidentale	531
21.6.4	Regolarità in pianta e in altezza	531
21.7	VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA TRAMITE ANALISI STATICA NON LINEARE	533
21.7.1	Conoscenza dei periodi propri strutturali tramite analisi modale	533
21.7.2	Calcolo delle distribuzioni di forze per l'analisi statica non lineare	534
21.7.3	Impostazione delle cerniere plastiche	536

21.7.3.1	Valutazione della curvatura di primo snervamento e calcolo di θ_y	538
21.7.3.2	Valutazione della curvatura ultima	539
21.7.4	Determinazione della curva di capacità bilineare equivalente di un oscillatore semplice	540
21.7.5	Determinazione della domanda in termini di spostamento	541
21.8	LE VERIFICHE DI SICUREZZA DELLA STRUTTURA ESISTENTE IN C.A.	546
21.8.1	Verifiche degli elementi/meccanismi duttili	546
21.8.2	Verifiche degli elementi/meccanismi fragili: verifica a taglio	552
21.8.3	Verifiche degli elementi/meccanismi fragili: nodi trave-pilastro	556
21.9	ADEGUAMENTO SISMICO DELLA STRUTTURA IN C.A.	557
21.9.1	Proprietà dei materiali compositi adoperati nell'adeguamento per gli elementi duttili e fragili a taglio	559
21.9.1.1	Valutazione degli effetti del confinamento	559
21.9.2	Analisi pushover della struttura rinforzata	560
21.9.3	Verifiche degli elementi/meccanismi duttili della struttura rinforzata	565
21.9.4	Verifiche degli elementi/meccanismi duttili della struttura rinforzata: rinforzo a taglio	570
21.9.5	Verifiche degli elementi/meccanismi fragili della struttura rinforzata: rinforzo biella tesa nodi travi-pilastro non confinati	573

CAPITOLO 22 Stati limite e criteri di verifica per gli edifici esistenti in muratura

22.1	INTRODUZIONE	577
22.2	MECCANISMI DI COLLASSO NEL PIANO E FUORI DAL PIANO	578
22.3	COMPORTAMENTO SISMICO GLOBALE DELL'EDIFICIO IN MURATURA E MECCANISMI LOCALI	578
22.4	MECCANISMI DI RISPOSTA DEI MASCHI MURARI E DELLE FASCE DI PIANO	580
22.5	VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'AZIONE SISMICA SUGLI ELEMENTI STRUTTURALI DI EDIFICI IN MURATURA	581
22.6	VALUTAZIONE DELLE CAPACITÀ DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI	582
22.7	I CRITERI DI VERIFICA PER CIASCUNO STATO LIMITE	583

CAPITOLO 23 Le informazioni necessarie per la valutazione delle strutture esistenti in muratura

23.1	INTRODUZIONE	585
23.2	CRITERI GENERALI	585
23.3	I LIVELLI DI CONOSCENZA DELLE STRUTTURE IN MURATURA	586
23.4	LA GEOMETRIA DELL'EDIFICIO	587
23.5	I DETTAGLI COSTRUTTIVI	588
23.6	LE PROPRIETÀ DEI MATERIALI	589
23.7	TIPOLOGIE DI MURATURE E RELATIVI PARAMETRI MECCANICI	591

CAPITOLO 24 I metodi di analisi per le strutture in muratura	
24.1	INTRODUZIONE 595
24.2	I CRITERI DI MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA IN MURATURA PER ANALISI DI TIPO GLOBALE 595
24.3	LE ANALISI DI TIPO GLOBALE 601
24.3.1	Analisi dinamica modale: valutazione della domanda 601
24.3.1.1	Analisi per azioni ortogonali al piano della parete 602
24.3.1.2	Stima del periodo fondamentale di una parete muraria 604
24.3.2	Analisi statica lineare: valutazione della domanda 604
24.3.3	Analisi statica non lineare: valutazione della capacità 605
24.4	I CRITERI DI MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA IN MURATURA PER ANALISI DI TIPO LOCALE 608
24.4.1	La valutazione della capacità 612
24.4.1.1	Analisi cinematica lineare 612
24.4.1.2	Analisi cinematica non lineare 615
24.4.2	Descrizione dei possibili meccanismi di collasso fuori dal piano 618
24.4.2.1	Meccanismi di ribaltamento semplice 618
24.4.2.2	Meccanismi per flessione della striscia muraria verticale 619
24.4.2.3	Meccanismi per flessione della striscia muraria orizzontale 620
24.4.2.4	Meccanismi per ribaltamento composto 622
24.4.3	Descrizione dei possibili meccanismi di collasso nel piano 624
CAPITOLO 25 Le verifiche di sicurezza al termine delle analisi di strutture in muratura	
25.1	INTRODUZIONE ALLE VERIFICHE RELATIVE ALLE ANALISI GLOBALI 625
25.1.1	Verifiche di sicurezza per le analisi lineari 625
25.1.1.1	Pressoflessione nel piano del maschio murario (SLU) 626
25.1.1.2	Taglio-scorrimento nel piano del maschio murario (SLU) 627
25.1.1.3	Taglio per fessurazione diagonale nel piano del maschio murario (SLU) 628
25.1.1.4	Pressoflessione fuori piano del maschio murario (SLU) 629
25.1.1.5	Verifica delle travi di accoppiamento (SLU) 629
25.1.1.6	Verifica degli spostamenti d'interpiano con lo SLE 631
25.1.2	Verifiche di sicurezza per l'analisi statica non lineare 631
25.2	VERIFICHE DI SICUREZZA PER LE ANALISI DI TIPO LOCALE 633
25.2.1	Verifiche di sicurezza per le analisi cinematiche lineari 633
25.2.1.1	Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV): verifica semplificata con fattore di struttura q 633
25.2.1.2	Stato Limite di Danno (SLD) 634
25.2.2	Verifiche di sicurezza per le analisi cinematiche non lineari 635
25.2.2.1	Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV): verifica mediante spettro di capacità 635
25.2.2.2	Stato Limite di Danno (SLD) 637

CAPITOLO 26		Il progetto del rinforzo delle strutture in muratura ordinaria sotto azioni sismiche	
26.1	INTRODUZIONE		639
26.2	CRITERI E TIPI DI INTERVENTO		639
26.3	PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO CON FRP IN ZONA SISMICA SECONDO LE LINEE GUIDA NAZIONALI.....		641
26.3.1	Obiettivi della progettazione.....		641
26.3.2	Criteri per la scelta dell'intervento con FRP.....		641
26.4	TIPOLOGIE DI INTERVENTO RICHIAMATE NELLA CIRCOLARE n°617 E INDIRIZZABILI ALLE LINEE GUIDA		644
26.4.1	Interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti: fusione di tecniche tradizionali e materiali innovativi		645
26.4.2	Interventi sugli archi e sulle volte: fusione di tecniche tradizionali e materiali innovativi		650
26.4.3	Interventi sui solai.....		650
26.4.4	Interventi che modificano la distribuzione degli elementi verticali resistenti		655
26.4.5	Interventi tesi ad incrementare la resistenza dei maschi murari		655
26.4.6	Interventi su pilastri e colonne		661
26.4.7	Realizzazione di giunti sismici		661
CAPITOLO 27		Adeguamento sismico di una struttura in muratura ordinaria con analisi statica non lineare e FRP	
27.1	INQUADRAMENTO STORICO DELLA STRUTTURA.....		663
27.2	INDAGINI VOLTE ALLA CONOSCENZA DEL MANUFATTO		663
27.3	ANALISI DEI CARICHI.....		665
27.3.1	Solaio di piano		668
27.3.2	Solaio di sottotetto		668
27.3.3	Solaio di copertura		669
27.3.4	Scala.....		669
27.3.4.1	Pianerottolo scala.....		669
27.3.4.2	Rampa scala		670
27.4	AZIONE SISMICA.....		670
27.4.1	Spettri di progetto allo SLU: Condizioni di sottosuolo e topografiche.....		672
27.5	COMBINAZIONE DI CARICO.....		673
27.6	MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA.....		675
27.6.1	Modellazione dei solai e della scala.....		675
27.6.2	Modellazione della fondazione		676
27.6.3	Presenza dell'eccentricità accidentale.....		676
27.6.4	Regolarità in pianta e in altezza		676
27.7	VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA TRAMITE ANALISI STATICA NON LINEARE		678

27.7.1	Determinazione della curva di capacità bilineare equivalente di un oscillatore semplice	679
27.7.2	Determinazione della domanda in termini di spostamento	681
27.7.3	Le verifiche di sicurezza della struttura (non rinforzata)	681
27.8	ADEGUAMENTO SISMICO DELLA STRUTTURA IN MURATURA	686
27.9	ANALISI CINEMATICA DEI POSSIBILI MECCANISMI NELLA STRUTTURA	691
27.9.1	Ribaltamento del frontone di copertura	691
27.9.2	Possibili interventi volti a inibire il meccanismo	693
27.9.3	Meccanismo di ribaltamento semplice della parete	694
27.9.3.1	Analisi dei carichi	694
27.9.3.2	Analisi cinematica lineare	695
27.9.3.3	Verifica di sicurezza dell'analisi cinematica lineare per lo SLV	696
27.9.4	Analisi cinematica non lineare	697
27.9.4.1	Valutazione dello spostamento in testa corrispondente ad $\alpha=0$	697
27.9.4.2	Valutazione della curva di capacità (oscillatore equivalente)	699
27.9.4.3	Verifica allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita	700
27.9.5	Intervento di consolidamento	702
Bibliografia	.....	705