

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

D.I.C.A.M. Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

Diagnostica e Sperimentazione delle Strutture M

**“INDAGINE TEORICA E SPERIMENTALE
SULL’ADERENZA DI BARRE IN FRP NEL
CALCESTRUZZO”**

CANDIDATO:
Luca Lo Conte

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Giovanni Pascale

CORRELATORE
Dott. Ing. Christian Pierini

Anno Accademico 2013/14

Sessione II

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. I MATERIALI COMPOSITI	3
2.1. Cenni storici	3
2.2. Principali caratteristiche dei materiali compositi	7
2.3. Componenti e tecniche di produzione dei materiali compositi	12
2.3.1. Fibre dei compositi FRP	15
2.3.1.1. Fibre di vetro	18
2.3.1.2. Fibre di carbonio	20
2.3.1.3. Fibre aramidiche	22
2.3.1.4. Fibre di basalto	25
2.3.2. Matrici dei compositi FRP	27
2.3.2.1. Resine epossidiche	28
2.3.2.2. Resine poliestere	29
2.3.2.3. Altri tipi di resine	30
2.3.3. Adesivi	31
2.3.4. Tecniche di produzione	33
2.3.4.1. Pultrusione	33
2.3.4.2. Stampaggio a compressione con controstampo rigido ... 35	
2.3.4.3. Laminazione	35
2.3.4.4. Wet lay-up	37
2.4. Campi di applicazione	38
3. BARRE IN FRP	43
3.1. Processi di produzione e tipologie di barre in FRP	43

3.2.	Caratteristiche delle barre in FRP	46
3.2.1.	Proprietà meccaniche	46
3.2.2.	Proprietà chimico-fisiche	46
4.	L'ADERENZA DELLE BARRE IN FRP NEL CALCESTRUZZO .	49
4.1.	I principali meccanismi del fenomeno dell'aderenza	50
4.2.	Descrizione del fenomeno dell'aderenza per le barre in acciaio .	55
4.3.	Descrizione del fenomeno dell'aderenza per le barre in FRP	58
4.4.	Principali variabili da cui dipende il fenomeno dell'aderenza	62
4.5.	Il fenomeno dell'aderenza: differenza tra barre in acciaio e barre in FRP	67
4.6.	Modelli proposti in letteratura per descrivere l'aderenza	69
4.6.1.	Modello di Eligehausen, Popov, Bertero (BPE Model - 1983): barre in acciaio.....	69
4.6.2.	Modello di Malvar (1994): barre in FRP.....	72
4.6.3.	Modello di Cosenza, Manfredi, Realfonzo (CMR Model - 1995): barre in FRP.....	74
4.6.4.	Variazione del modello BPE (Modified BPE Model - 1996): barre in FRP	75
5.	INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI	77
5.1.	Pull-Out Test - Normativa	77
5.2.	Splitting Test - Normativa.....	81
5.3.	Materiali utilizzati.....	83
5.3.1.	Calcestruzzo	83
5.3.2.	Barre	84
5.4.	Confezionamento dei provini	88

5.4.1.	1° Confezionamento - 03/09/2014.....	91
5.4.2.	2° Confezionamento - 04/09/2014.....	93
5.4.3.	3° Confezionamento - 05/09/2014.....	94
5.4.4.	4° Confezionamento - 06/09/2014.....	96
5.5.	Strumentazione di prova.....	98
6.	ESECUZIONE DELLE PROVE	103
6.1.	Barre nervate ϕ 10 Acciaio – CLS2 (P1C2BAN10).....	107
6.2.	Barre nervate ϕ 10 CFRP – CLS2 (P2C2BCN10).....	111
6.3.	Barre nervate ϕ 10 Acciaio – CLS1 (P3C1BAN10).....	114
6.4.	Barre nervate ϕ 10 CFRP – CLS1 (P4C1BCN10).....	117
6.5.	Barre lisce ϕ 10 Acciaio – CLS1 (P5C1BAL10).....	121
6.6.	Barre lisce ϕ 10 CFRP – CLS1 (P6C1BCL10).....	124
6.7.	Barre nervate ϕ 12 Acciaio – CLS1 (P7C1BAN12).....	127
6.8.	Barre nervate ϕ 12 CFRP – CLS1 (P8C1BCN12).....	130
6.9.	Barre nervate ϕ 10 Acciaio – CLS1 (Split.) (P9C1BAN10S) ..	133
6.10.	Barre nervate ϕ 10 CFRP – CLS1 (Split.) (P10C1BCN10S)	136
6.11.	Raccolta dei dati.....	139
7.	ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI	151
8.	CONCLUSIONI	173
9.	ALLEGATI	175
10.	BIBLIOGRAFIA	179

Indice delle Figure:

Figura 1. Sistemi preformati	7
Figura 2. Sistemi impregnati in situ.....	8
Figura 3. Sistemi Preimpregnati	8
Figura 4. Legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito.....	9
Figura 5. Assi di riferimento per lamine unidirezionali	13
Figura 6. Rappresentazione schematica delle fasi costituenti il composito	14
Figura 7. Tipologie di fibre	16
Figura 8. Fibra di vetro, tessuto in fibra di vetro, barre in fibra di vetro.....	19
Figura 9. Filati di carbonio, tessuto in fibra di carbonio, lamina in fibra di carbonio, barre in fibra di carbonio	21
Figura 10. Fibra di aramide, filato di aramide, tessuto in fibra di aramide	23
Figura 11. Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale.....	24
Figura 12. Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: i valori del modulo e della resistenza sono rapportati alla densità (valori specifici).....	24
Figura 13. Roccia basaltica, filato di basalto.....	26
Figura 14. Barre in fibra di basalto.....	27
Figura 15. Resina epossidica	27
Figura 16. Confronto fra le diverse tipologie di frattura	32
Figura 17. Schema di funzionamento della pultrusione con impregnazione a bagno di resina.....	34
Figura 18. Rappresentazione del sistema per laminazione.....	36
Figura 19. Formatura per contatto manuale.....	37
Figura 20. Rinforzo volta a crociera con tessuto CFRP	38
Figura 21. Rinforzo a flessione di travetti di solaio con lamine in CFRP	39
Figura 22. Confinamento pilastri con tessuto in CFRP	39
Figura 23. Rinforzo a taglio di travi con tessuto in CFRP	40
Figura 24. Sostituzione armatura d'acciaio con griglia di barre GFRP in una struttura marina.....	40

Figura 25. Solette da ponte con armatura in GFRP.....	42
Figura 26. Barre e staffe in GFRP	42
Figura 27. Tipologie di barre di FRP presenti in commercio.....	45
Figura 28. Coefficienti di dilatazione termica.....	48
Figura 29. Fessurazione indotta dalle tensioni circonferenziali	48
Figura 30. Microfessure trasversali (a), tensioni longitudinali di trazione all'apice della nervatura (b).....	50
Figura 31. Cunei di conglomerato a monte della nervatura (a), spinte radiali da essi esercitate (b), fessure trasversali e longitudinali da spacco (c)	51
Figura 32. Schema del collasso locale dell'aderenza: collasso per incontrollata apertura della fessura da spacco ("splitting") (a), collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo ("pull-out") (b).....	52
Figura 33. Azioni di confinamento sulla barra ancorata: azione dell'armatura trasversale e del calcestruzzo (a), azione della pressione esterna (b).....	52
Figura 34. Distribuzione delle tensioni circonferenziali: comportamento elastico (1), comportamento parzialmente fessurato-elastico (2), comportamento plastico (3).....	53
Figura 35. Legame delle tensioni di aderenza-scorrimento per le barre d'acciaio (a), scorrimento relativo della barra (slip) (b)	55
Figura 36. Legame delle tensioni di aderenza-scorrimento per le barre in FRP	59
Figura 37. Posizione della barra in FRP durante il getto.....	64
Figura 38. Distribuzione delle tensioni normali in una barra in FRP sottoposta ad un carico assiale.....	66
Figura 39. Relazione analitica tensione tangenziale-scorrimento (carico monotono)	70
Figura 40. Modified BPE Model.....	75
Figura 41. Pull-Out Test Set-Up.....	78
Figura 42. Posizione della barra nel Pull-Out Test	79
Figura 43. Posizione dei sensori LVDT sulla faccia superiore del provino....	79
Figura 44. Posizione dei sensori LVDT sulla faccia inferiore del provino	80
Figura 45. Posizione della barra nello Splitting Test	81

Figura 46. Posizione dei sensori LVDT sulla faccia superiore del provino	82
Figura 47. Barre in acciaio: lisce $\Phi 10$, nervate $\Phi 10$, nervate $\Phi 12$	84
Figura 48. Geometria della nervatura della barra in acciaio.....	85
Figura 49. Barre in fibra di carbonio: lisce $\Phi 10$, nervate $\Phi 10$, nervate $\Phi 12$..	86
Figura 50. Deformazione delle barre in fibra di carbonio	87
Figura 51. Caratteristiche geometriche e tecniche delle barre in fibra di carbonio	87
Figura 52. Casseforme in legno e posizionamento delle barre.....	88
Figura 53. Casseforme in legno e posizionamento delle barre.....	89
Figura 54. Isolamento della parte superiore della barra con tubo in PVC.....	90
Figura 55. 1° Confezionamento – barre nervate $\Phi 10$ CLS2	91
Figura 56. 1° Confezionamento – barre nervate $\Phi 10$ CLS2: costipamento e cubetti di prova	92
Figura 57. 1° Confezionamento: costipamento dei cubetti di prova	93
Figura 58. 2° Confezionamento– barre nervate $\Phi 10$ CLS1	93
Figura 59. 2° Confezionamento – barre nervate $\Phi 10$ CLS2	94
Figura 60. 3° Confezionamento – barre lisce $\Phi 10$ CLS2.....	95
Figura 61. 4° Confezionamento – barre nervate $\Phi 10$ CLS2 per prismi (splitting)	96
Figura 62. 4° Confezionamento – barre nervate $\Phi 12$ CLS2 per cubetti (pull- out) e barre nervate $\Phi 10$ CLS2 per prismi (splitting).....	97
Figura 63. Macchina di prova.....	98
Figura 64. LVDT a variazione di induttanza WA10	99
Figura 65. Trasduttore di spostamento a variazione di resistenza CE5.....	99
Figura 66. Posizionamento TdS "at the end"	100
Figura 67. Posizionamento LVDT nella parte inferiore	101
Figura 68. Sistema di acquisizione	102
Figura 69. Provini	103
Figura 70. Provini e dettagli delle estremità del cubo di calcestruzzo	104
Figura 71. Telaio in acciaio collegato alla macchina di prova	105
Figura 72. Componenti del telaio: piatto inferiore (di contrasto) e piatto superiore	106

Figura 73. Componenti del telaio: parete laterale e supporto per gli LVDT inferiori.....	106
Figura 74. Prova P1C2BAN10 – 17/09/14.....	107
Figura 75. Dettaglio inferiore prova P1C2BAN10 – 17/09/14	108
Figura 76. Prova P1C2BAN10 – 17/09/14.....	108
Figura 77. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P1C2BAN10 – 17/09/14.....	109
Figura 78. Barra estratta prova P1C2BAN10 – 17/09/14	109
Figura 79. Prova P2C2BCN10 – 17/09/14.....	111
Figura 80. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P2C2BCN10 – 17/09/14.....	112
Figura 81. Barra estratta prova P2C2BCN10 – 17/09/14.....	112
Figura 82. Prova P3C1BAN10 – 18/09/14.....	114
Figura 83. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P3C1BAN10 – 18/09/14.....	115
Figura 84. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo lato inferiore prova P3C1BAN10 – 18/09/14	115
Figura 85. Barra estratta prova P3C1BAN10 – 18/09/14	116
Figura 86. Prova P4C1BCN10 – 18/09/14.....	117
Figura 87. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P4C1BCN10 – 18/09/14.....	118
Figura 88. Barra estratta prova P4C1BCN10 – 18/09/14.....	118
Figura 89. Dettaglio della barra estratta: distacco del filamento in fibra di carbonio che avvolgeva la barra - prova P4C1BCN10 – 18/09/14	119
Figura 90. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo “at the end” prova P4C1BCN10 – 18/09/14.....	119
Figura 91. Prova P5C1BAL10 – 19/09/14	121
Figura 92. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P5C1BAL10 – 19/09/14.....	122
Figura 93. Barra estratta prova P5C1BAL10 – 19/09/14.....	122
Figura 94. Dettaglio della barra estratta prova P5C1BAL10 – 19/09/14.....	123
Figura 95. Prova P6C1BCL10 – 19/09/14	124

Figura 96. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P6C1BCL10 – 19/09/14.....	125
Figura 97. Barra estratta prova P6C1BCL10 – 19/09/14	125
Figura 98. Dettaglio della barra estratta prova P6C1BCL10 – 19/09/14	126
Figura 99. Prova P7C1BAN12 – 22/09/14.....	127
Figura 100. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P7C1BAN12 – 22/09/14.....	128
Figura 101. Barra estratta prova P7C1BAN12 – 22/09/14.....	128
Figura 102. Prova P8C1BCN12 – 22/09/14	130
Figura 103. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P8C1BCN12 – 22/09/14.....	131
Figura 104. Barra estratta prova P8C1BCN12 – 22/09/14.....	131
Figura 105. Dettaglio della barra estratta: distacco del filamento di fibra di carbonio che avvolgeva la barra e parti di questa attaccati al calcestruzzo - prova P8C1BCN12 – 22/09/14.....	132
Figura 106. Prova P9C1BAN10S – 22/09/14.....	133
Figura 107. Propagazione della fessurazione da Splitting Prova P9C1BAN10S – 22/09/14.....	134
Figura 108. Fessurazione da Splitting prova P9C1BAN10S – 22/09/14	134
Figura 109. Provino spaccato a metà: frantumazione dei denti di calcestruzzo P9C1BAN10S – 22/09/14	135
Figura 110. Propagazione fessure da Splitting prova P9C1BAN10S – 22/09/14	135
Figura 111. Prova P10C1BCN10S – 22/09/14.....	136
Figura 112. Propagazione delle fessure da Splitting - prova P10C1BCN10S – 22/09/14.....	137
Figura 113. Rottura provino per Splitting e dettaglio della barra estratta prova P10C1BCN10S – 22/09/14.....	137
Figura 114. Prova P10C1BCN10S – 22/09/14.....	138
Figura 115. P2C2BCN10 – Modellazione dati sperimentali – CMR Model – Malvar Model – Modified BPE Model	162

Figura 116. P2C2BCN10 – Modellazione dati sperimentali – confronto fra i tre modelli per l'intero tratto e per il tratto iniziale	163
Figura 117. P4C1BCN10 – Modellazione dati sperimentali – CMR Model – Malvar Model – Modified BPE Model	164
Figura 118. P4C1BCN10 – Modellazione dati sperimentali – confronto fra i tre modelli per l'intero tratto e per il tratto iniziale	165
Figura 119. P6C1BCL10 – Modellazione dati sperimentali – CMR Model – Malvar Model – Modified BPE Model	166
Figura 120. P6C1BCL10 – Modellazione dati sperimentali – confronto fra i tre modelli per l'intero tratto e per il tratto iniziale	167
Figura 121. P8C1BCN12 – Modellazione dati sperimentali – CMR Model – Malvar Model – Modified BPE Model	168
Figura 122. P8C1BCN12 – Modellazione dati sperimentali – confronto fra i tre modelli per l'intero tratto e per il tratto iniziale	169

1. INTRODUZIONE

L'interesse scientifico verso le applicazioni innovative degli FRP per la riabilitazione strutturale da un lato, e la peculiarità del patrimonio edilizio italiano ampiamente variegato dall'altro, hanno attirato negli ultimi anni l'interesse di numerosi ricercatori operanti nei settori della Meccanica delle Strutture, delle Costruzioni, della Riabilitazione Strutturale e dell'Ingegneria Sismica.

I materiali compositi, oggetto di questa tesi, sono materiali costituiti da matrici polimeriche e da fibre generalmente lunghe continue di carbonio, vetro, basalto o aramide, comunemente denominati FRP, acronimo di *Fiber Reinforced Polymers*.

Dal punto di vista costitutivo tali materiali sono eterogenei ed anisotropi e presentano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino a rottura. Oltre alle svariate ed ormai consolidate applicazioni nel campo dell'ingegneria aeronautica, navale e meccanica, essi trovano largo impiego nella riabilitazione e nel consolidamento delle strutture civili. I vantaggi degli FRP sono molteplici: leggerezza, elevate proprietà meccaniche e caratteristiche anticorrosive.

Oggi il mercato degli FRP in Italia ha assunto dimensioni notevoli, tali da rendere tale tecnologia ormai consolidata. Negli ultimi quindici anni l'impiego di materiali FRP nel settore edile si è sempre più diffuso, permettendo anche un sensibile ridimensionamento dei costi degli interventi, inizialmente particolarmente elevati, oggi giorno decisamente più accessibili.

I compositi per il rinforzo strutturale sono disponibili in diverse geometrie: dalle lamine e barre pultruse, caratterizzate da una disposizione unidirezionale delle fibre ed utilizzate preferibilmente per placcare superfici regolari, ai tessuti bidirezionali facilmente adattabili alla forma dell'elemento strutturale rinforzato.

In particolare in questa tesi sono trattate le barre in FRP, disponibili in commercio per l'impiego come armature lente di getti di calcestruzzo, e sono

costituite da fibre di vetro (GFRP), di carbonio (CFRP), di arammide (AFRP) o di basalto immerse in resine sia termoindurenti che termoplastiche. Una delle peculiari caratteristiche delle barre in FRP è quella di non essere suscettibili ai fenomeni di corrosione. Questo rende tale impiego particolarmente vantaggioso in svariate situazioni. Le proprietà delle barre in FRP, quali prestazioni ad elevate temperature, resistenza alla corrosione, proprietà dielettriche, infiammabilità e conducibilità termica, sono funzione delle caratteristiche dei componenti.

L'aderenza tra barre fibrorinforzate e calcestruzzo è una chiave fondamentale per comprendere al meglio l'azione composita di strutture rinforzate o armate in FRP. Deve essere mobilitata una certa aderenza tra la barra e calcestruzzo per trasferire gli sforzi da un corpo all'altro. Poiché il materiale composito è anisotropo, in direzione longitudinale le proprietà meccaniche sono governate da quelle delle fibre, mentre in direzione trasversale dalla resina. La matrice presenta in genere resistenze più basse di quella a compressione del calcestruzzo, cosicché il meccanismo di aderenza risulta diverso da quello sviluppato dalle tradizionali barre in acciaio.

In questa tesi viene sviluppata appunto un'indagine sperimentale sul fenomeno dell'aderenza di barre in acciaio e barre in CFRP (fibra di carbonio) nel calcestruzzo, cercando di capire come cambia il fenomeno al variare dei parametri da cui dipende principalmente l'aderenza, come ad esempio la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo, il diametro e la deformazione superficiale della barra e la posizione di questa nel provino di calcestruzzo. Sono state quindi realizzate delle prove di *pull-out*, ovvero delle prove di estrazione di barre da provini di calcestruzzo, per determinare le tensioni tangenziali d'aderenza in funzione dello scorrimento locale della barra (*local bond-slip*). Infine sono stati calibrati, sui risultati delle prove sperimentali, i tre modelli analitici più noti in letteratura che descrivono il fenomeno dell'aderenza delle barre in FRP nel calcestruzzo, ovvero quello di Malvar (1994), il CMR Model (1995) e il Modified BPE Model (1996).

2. I MATERIALI COMPOSITI

I materiali compositi, oggetto di questa tesi, sono materiali costituiti da matrici polimeriche e da fibre generalmente lunghe continue di carbonio, vetro, o aramide, comunemente denominati FRP, acronimo di *Fiber Reinforced Polymers*.

Dal punto di vista costitutivo, tali materiali sono eterogenei ed anisotropi e presentano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino a rottura. Oltre alle svariate ed ormai consolidate applicazioni nel campo dell'ingegneria aeronautica, navale e meccanica, essi trovano largo impiego nella riabilitazione e nel consolidamento delle strutture civili. I vantaggi degli FRP sono molteplici: leggerezza, elevate proprietà meccaniche, caratteristiche anticorrosive.

2.1. Cenni storici

La fibra di carbonio fu creata per la prima volta nel 1958 dal Dr. Roger Bacon, presso il *Parma Technical Center* in Ohio, con un processo di realizzazione estremamente oneroso e complesso. Ma l'aver individuato un materiale con caratteristiche meccaniche e fisiche così eccezionalmente elevate, spinse subito l'industria a trovare un processo di realizzazione su vasta scala più economico, così nel 1969 venne realizzato il primo tessuto di carbonio esistente al mondo.

I materiali compositi fibrosi a matrice polimerica sono stati sviluppati fin dai primi anni '60 per applicazione nell'industria navale, meccanica ed aerospaziale.

Nei primi anni '80 alcuni ricercatori giapponesi ed americani iniziarono degli studi alternativi alla tecnica del "beton plaquè" (rinforzi di strutture con utilizzo di piatti di acciaio) per incrementare la resistenza a flessione di travi utilizzando, invece, tessuti in fibra di vetro o di carbonio. Negli anni '90 molte Università ed Enti di Ricerca intrapresero studi e sperimentazioni, mentre sul mercato furono introdotti i primi sistemi di rinforzo con FRP. Furono

individuare diverse tecnologie di rinforzo di elementi inflessi ma anche per il rinforzo di elementi compressi e per quelli sottoposti a taglio.

Con la comparsa di prodotti commerciali iniziarono anche le applicazioni in cantiere: il Giappone fu il paese che per primo passò dalla fase di ricerca a quella commerciale su larga scala. In Italia le prime applicazioni furono eseguite nella seconda metà degli anni '90. In tal modo cominciarono a svilupparsi anche documenti guida per il calcolo di rinforzi con l'utilizzo di materiali compositi. La prima normativa internazionale per l'uso di questi prodotti nel settore delle costruzioni fu pubblicata nel 2001 dall' American Concrete Institute (ACI Committee 440) sotto forma di due distinti documenti. Il primo relativo alla progettazione di conglomerati armati con barre non metalliche, il secondo per la progettazioni di riparazioni e rinforzi di strutture in c.a. e in c.a.p. con tessuti o piatti incollati all'esterno.

Quasi contemporaneamente il Comitato CEB-FIP 9.3 pubblicò una raccomandazione per l'impiego degli FRP nella riparazione e nel rinforzo di strutture in c.a. e in c.a.p. e nel 2005 il Consiglio Nazionale delle Ricerche Comitato DT 200 pubblicò una raccomandazione per l'impiego degli FRP anche per il rinforzo delle strutture in muratura.

Da allora si è assistito ad un rapido sviluppo della tecnologia, spinto ovviamente dagli attori principali del processo edilizio.

Oggi il mercato degli FRP in Italia ha assunto dimensioni notevoli, tali da rendere tale tecnologia ormai consolidata. Negli ultimi quindici anni l'impiego di materiali FRP nel settore edile si è sempre più diffuso, permettendo anche un sensibile ridimensionamento dei costi degli interventi, inizialmente particolarmente elevati, oggi giorno decisamente accessibili.

Di seguito viene illustrata una scaletta cronologica [13] in cui sono rappresentate le nascite dei diversi comitati ed istituzioni internazionali, con relativi documenti guida, e gli avvenimenti più importanti in questo campo:

2. I MATERIALI COMPOSITI

1818	1849	1887
Viene fondata a Londra la <i>Institution of Civil Engineers</i>	Primi rinforzi in calcestruzzo	Viene fondata in Canada la <i>Canadian society for Civil Engineering</i> (CSCE)
1904	1910	1941
Viene fondata negli USA la <i>American Concrete Institute</i> (ACI)	Viene pubblicata la prima normativa sugli edifici (ACI)	Viene pubblicata la prima edizione dell' ACI 318
1953	1964	1970s
Viene fondato il Comitato Europeo per il Calcestruzzo (CEB)	Viene pubblicata la prima raccomandazione del CEB	Vengono usati i primi rinforzi in FRP
1987	1991	1992
<i>The Japan Society of Civil Engineers</i> (JSCE) stabilisce un comitato sui materiali rinforzati con fibre continue Viene stabilito un comitato tecnico sugli FRP dal CSCE	CSCE pubblica una prima relazione sugli FRP ACI fonda il comitato 440 sui materiali fibro-rinforzati a matrice polimerica per rinforzi del calcestruzzo interni ed esterni	La JSCE pubblica una relazione <i>state of the art</i> sugli FRP
1996	1998	2000
Viene fondata la <i>International Federation for Structural Concret</i> (FIB) La JSCE pubblica una serie di raccomandazioni di progetto sui rinforzi strutturali con FRP	La CSCE pubblica una serie di raccomandazioni di progetto sui rinforzi strutturali con FRP di ponti	<i>Fib</i> pubblica il bollettino 10 sull'aderenza del rinforzo (un capitolo è dedicato al legame di aderenza delle barre in FRP)

2. I MATERIALI COMPOSITI

2001	2002	2003
<i>Fib</i> pubblica il bollettino 14 sui rinforzi esterni in FRP	<i>ACI committe 440</i> pubblica la prima versione delle raccomandazioni di progetto di rinforzi esterni in FRP (440.2R)	<i>ACI committe 440</i> pubblica la seconda versione delle raccomandazioni di progetto di rinforzi interni in FRP (440.1R)
2004	2006	2008
<i>ACI committe 440</i> pubblica ACI 440.3R (Guide test methods) e ACI 440.4R (Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons)	Il consiglio nazionale delle ricerche (CNR) pubblica le Istruzioni italiane per la progettazione di rinforzi strutturali interni con FRP (CNR-DT 203/2006)	<i>ACI committe 440</i> pubblica la seconda versione delle raccomandazioni di progetto di rinforzi esterni in FRP (440.2R)
Il consiglio nazionale delle ricerche (CNR) pubblica le Istruzioni italiane per la progettazione di rinforzi strutturali esterni con FRP (CNR-DT 200/2004)	<i>ACI committe 440</i> pubblica la terza versione delle raccomandazioni di progetto di rinforzi interni in FRP (440.1R)	
2009	2012	2013
L'assemblea Generale Consiglio Superiore LL PP pubblica le Linee Guida per la Progettazione di rinforzi strutturali mediante FRP	Il consiglio nazionale delle ricerche (CNR) pubblica la versione preliminare delle Istruzioni italiane per la progettazione di rinforzi strutturali esterni con FRP (CNR-DT 200R1/2012)	Il consiglio nazionale delle ricerche (CNR) pubblica la versione definitiva delle Istruzioni italiane per la progettazione di rinforzi strutturali esterni con FRP (CNR-DT 200R1/2013)

2.2. Principali caratteristiche dei materiali compositi

I compositi per il rinforzo strutturale sono disponibili in diverse geometrie: dalle lamine e barre pultruse, caratterizzate da una disposizione unidirezionale delle fibre ed utilizzate preferibilmente per placcare superfici regolari, ai tessuti bidirezionali, facilmente adattabili alla forma dell'elemento strutturale rinforzato. Gli FRP risultano competitivi in tutti quei casi in cui sia necessario limitare l'impatto estetico sulla struttura originaria o garantire un'adeguata reversibilità dell'intervento (edifici di interesse storico o artistico), ovvero quando la limitatezza dello spazio a disposizione renderebbe difficile il ricorso a tecniche tradizionali.

Esistono sul mercato anche altri tipi di materiali compositi, differenti per la natura della matrice (matrice inorganica) o delle fibre (fibre discontinue o continue ma costituite da materiali differenti, come ad esempio l'acciaio, il basalto, il P.B.O.).

Dal punto di vista morfologico, i sistemi di rinforzo realizzati con materiali FRP sono distinti in:

- sistemi preformati (*pre cured systems*), costituiti da componenti di varia forma (lamine, nastri, barre o altro) preparati in stabilimento mediante pultrusione, o altri processi produttivi di comprovata validità tecnologica, ed incollati o immersi nell'elemento strutturale da rinforzare;



Figura 1. Sistemi preformati

- sistemi impregnati *in situ* (es. *wet lay-up systems*), costituiti da fogli o tessuti di fibre uni o multi-direzionali impregnati con una resina che

può fungere anche da adesivo con il substrato interessato (es. calcestruzzo, muratura, ...);

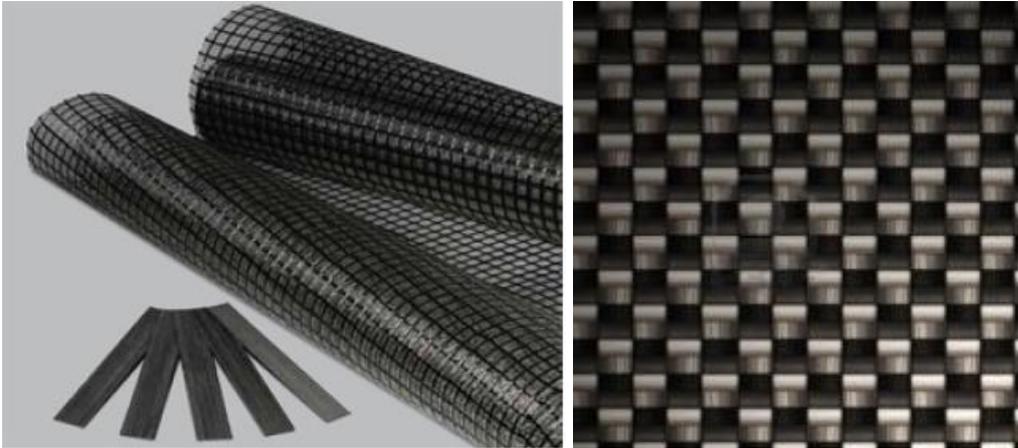


Figura 2. Sistemi impregnati in situ

- sistemi preimpregnati (*prepreg systems*), costituiti da fogli o tessuti di fibre uni o multi-direzionali preimpregnati con resina parzialmente polimerizzata ed incollati al substrato da rinforzare con (o senza) l'uso di resine aggiuntive.



Figura 3. Sistemi Preimpregnati

Dal punto di vista meccanico i suddetti sistemi sono classificati in base ai valori del modulo elastico e della tensione di rottura. Tali grandezze, valutate in regime di trazione uniassiale nella direzione delle fibre, devono essere riferite, nel caso dei sistemi di rinforzo preformati, all'unità di superficie complessiva del composito FRP (fibre e matrice); nel caso invece dei sistemi realizzati *in situ*, all'area delle sole fibre secche del composito. I valori del

modulo elastico e della resistenza a trazione devono risultare opportunamente stabili nei confronti del degrado indotto sul composito FRP da azioni ambientali.

Nei compositi fibrorinforzati le fibre svolgono il ruolo di elementi portanti sia in termini di resistenza che di rigidità. La matrice, oltre a proteggere le fibre, funge da mezzo di trasferimento degli sforzi tra fibra e fibra ed eventualmente tra queste e l'elemento strutturale da rinforzare. Nella maggioranza dei casi i compositi sono costituiti da fibre caratterizzate da resistenza e rigidità elevate, nonché da valori della deformazione a rottura inferiori a quelli della matrice. In Figura sono rappresentati qualitativamente i legami costitutivi di un materiale fibro-rinforzato unidirezionale e delle sue fasi costituenti: matrice e fibre:

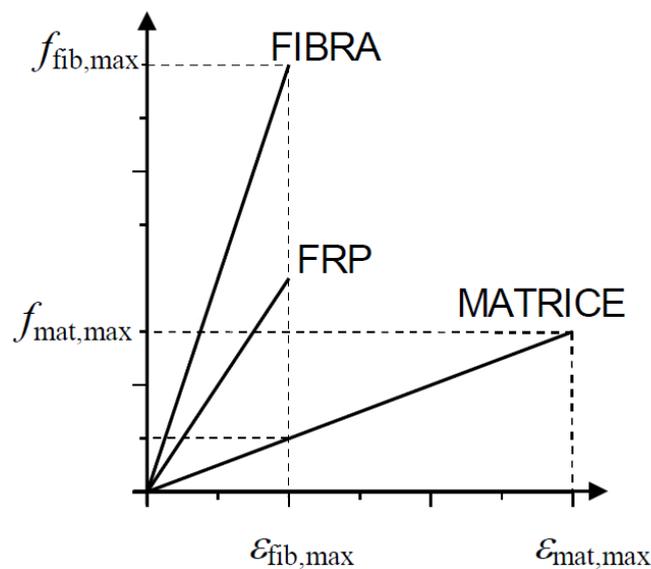


Figura 4. Legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito

Il composito mostra rispetto alle fibre una rigidità inferiore ma la medesima deformazione a rottura, $\epsilon_{fib,max}$. Infatti, una volta superata tale deformazione, diviene impossibile il trasferimento degli sforzi dalla matrice alle fibre.

Oltre all'utilizzo degli FRP come placcaggio di strutture in calcestruzzo, muratura, legno ed acciaio esistenti, è una pratica molto diffusa anche l'impiego di barre di FRP come armatura di getti di calcestruzzo, al posto dell'acciaio. Dal punto di vista teorico non emergono differenze concettuali rispetto alla tradizionale teoria del calcestruzzo armato con barre d'acciaio. Ciò

2. I MATERIALI COMPOSITI

che soprattutto va tenuto in conto è il diverso comportamento meccanico degli FRP, il cui legame costitutivo è essenzialmente elastico lineare fino a rottura.

La peculiare caratteristica degli FRP di non essere suscettibili ai fenomeni di corrosione rende tale impiego particolarmente vantaggioso in svariate situazioni.

Rispetto alle tecniche tradizionali di rinforzo/ripristino delle strutture, numerosi sono i vantaggi che l'impiego di materiali FRP garantisce:

- *elevatissime prestazioni meccaniche*: basta pensare che la resistenza caratteristica a trazione di un tessuto in carbonio supera tranquillamente valori dell'ordine dei 2500 MPa, con moduli elastici fino ad oltre i 390 GPa. Nella Tabella seguente sono riassunte le caratteristiche prestazionali dei materiali da costruzione più diffusi:

	Modulo di elasticità normale E	Resistenza a trazione	Deformazione a rottura	Densità
	Gpa	Mpa	%	g/cm³
Acciaio da costruzione	206	250-450 (snervamento) 350-600 (rottura)	20-30	7,8
Calcestruzzo	20-30	2-8*	0,01-0,5*	2,2-2,5
Fibre di carbonio alto modulo	390-760	2400-3400	0,5-0,8	1,8
Fibre di carbonio alta resistenza	240-280	4100-5100	1,6-1,73	1,8
Fibre di vetro	72-80	3445	4,08	2,5-2,6
Fibre aramidiche	60-150	3500-3800	1,9-5,5	1,4
Fibre PBO	290	5800	2	1,5-1,6
Fibre di basalto	84-87	4000-4300	2-3,1	2,65-2,8
Matrice polimerica	2.7-3.6	40-80	1,4-5,2	1,1-1,2
Matrice inorganica	6	3,5 (a 28 gg.)	0,35	1,8

* *Calcestruzzi fibrerinfornati*

- *rapidità di esecuzione dell'intervento*: l'utilizzo di FRP permette di

eseguire rinforzi di strutture in modo rapido, non richiedendo lunghi tempi di preparazione, di messa in opera e di messa in carico;

- *non invasività dell'intervento*: permettono interventi eseguiti in modo non invasivo per le strutture, senza cioè andare ad incrementare significativamente l'ingombro delle strutture stesse. Basti pensare ad esempio di dover effettuare rinforzi su travi o solai in un edificio a qualunque destinazione d'uso, ed appare evidente che l'impiego di FRP consenta di non perdere costosa volumetria. E' infatti fondamentale realizzare un intervento di rinforzo senza un aumento della sezione della struttura stessa, quindi ad esempio senza una riduzione significativa delle altezze libere o della volumetria degli ambienti;
- *leggerezza dei materiali di rinforzo*: un tessuto di carbonio che normalmente si può applicare per interventi di rinforzo di strutture ha un peso di circa 300 grammi per metro quadrato; questo evidenzia come si possano eseguire interventi di consolidamento senza andare ad incrementare i carichi permanenti alla struttura che si vuole andare a rinforzare;
- *pulizia dell'intervento*: un intervento di rinforzo con FRP risulta un intervento pulito anche dal punto di vista applicativo, senza creare gli elevati disagi che usualmente presentano gli interventi tradizionali, quali ad esempio i ringrossi di strutture.

Per loro specifica natura i prodotti FRP sono anisotropi e tendenzialmente elastici lineari in trazione fino a rottura. Contrariamente all'acciaio non esiste duttilità, isotropia e plasticità. Questo significa che la resistenza a compressione degli FRP è molto modesta, che se una fibra è tagliata o forata in un punto si perde il suo contributo alla resistenza per tutta la sua lunghezza; inoltre non esiste trasferimento tensionale tra una fibra posta in direzione longitudinale ed un'altra posta nella direzione trasversale. Tutti i prodotti FRP non possono essere saldati, quindi il collegamento tra uno strato e l'altro avviene per mezzo di una resina; infine tutti i prodotti FRP, tranne i tessuti prima di essere impregnati, non si possono piegare in cantiere perché vi è il

rischio della rottura fragile nel tempo, a causa del *creep* che si manifesta nel polimero che impregna le fibre.

Chiaramente, come per tutti i materiali da costruzione, anche per i prodotti compositi fibrosi si deve prevedere l'esecuzione di prove di cantiere per verificare la rispondenza del prodotto con le certificazioni fornite dal produttore e con le richieste del progettista.

2.3. Componenti e tecniche di produzione dei materiali compositi

Si definisce composito un materiale costituito da più componenti, ognuna caratterizzata da una propria identità chimica, che interagendo tra di loro riescono a fornire proprietà fisico-meccaniche diverse da quelle ottenibili da ogni singolo componente. Nel caso specifico degli FRP è possibile individuare principalmente due fasi:

- *la fase fibrosa*, costituita da filamenti di piccolissimo diametro che presentano resistenze e rigidità elevate e che consentono quindi di sopportare elevate sollecitazioni;
- *la fase matrice*, che ha principalmente la funzione di avvolgere la fase fibrosa, dare forma e geometria al materiale e trasferire le sollecitazioni della struttura da rinforzare alla fase fibrosa; da tale fase dipendono molte altre caratteristiche dei materiali, quali la resistenza alle temperature e la durabilità. Tale matrice può essere realizzata in fase produttiva, ad esempio per i compositi quali laminati e barre, o realizzata in sito, ad esempio per tessuti e reti

I laminati sono materiali costituiti da strati di qualche decimo di millimetro di spessore (detti lamine) sovrapposti tra loro. Nel caso più semplice, le fibre sono contenute esclusivamente nel piano della lamina (non sono presenti fibre disposte perpendicolarmente a tale piano). Esiste anche una particolare classe di compositi multistrato, detti laminati ibridi, in cui le singole lamine sono composte da fibre di natura differente (ad es. compositi a matrice epossidica

con fibre sia di carbonio che aramidiche per ottenere un composito rigido e tenace) o da materiali differenti (ad es. i compositi a strati alternati di resina epossidica con fibre aramidiche e di alluminio).

Il principale vantaggio dei laminati è rappresentato dalla massima libertà nella disposizione delle fibre, pur essendo ovviamente richiesto un controllo sistematico sulle scelte operate e quindi sulle proprietà del materiale composito.

Le lamine sono in generale dei materiali anisotropi e conseguentemente la descrizione delle loro proprietà meccaniche dipende dalla scelta del sistema di riferimento. Di solito gli assi del riferimento vengono fatti coincidere con quelli di simmetria del materiale (o assi naturali). In Figura è illustrato il caso di un rinforzo unidirezionale.

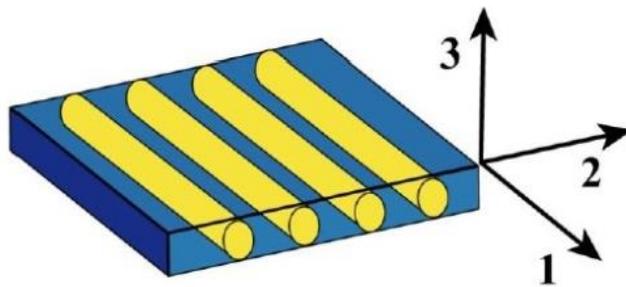


Figura 5. Assi di riferimento per lamine unidirezionali

Il rapporto tra i valori delle proprietà di un materiale composito nelle diverse direzioni è detto grado di anisotropia.

I materiali compositi possono essere più resistenti e, almeno nel caso dei compositi a fibra di carbonio, più rigidi dei materiali da costruzione tradizionali. Conseguentemente, quando per uno specifico progetto, il peso della struttura diventa rilevante, i compositi possono risultare molto attrattivi grazie alla loro minore densità. La resistenza specifica (resistenza/densità) dei compositi può assumere valori fino a quattro volte superiori rispetto a quelli esibiti dai materiali tradizionali; il loro modulo di elasticità normale specifico (modulo/densità) fino al doppio. Ciò significa che, a parità di rigidezza, una struttura di materiale composito può arrivare a pesare circa la metà di un'altra

realizzata con un materiale da costruzione tradizionale.

La natura delle fasi che costituiscono il composito contribuisce in maniera determinante alla formazione delle proprietà finali del materiale. Tuttavia, per ottenere un composito ad elevata resistenza meccanica, non è sufficiente utilizzare fibre “resistenti”: è anche indispensabile garantire una buona adesione tra la matrice ed il rinforzo.

L’adesione viene di solito promossa mediante l’impiego di un terzo componente, che, applicato in strato molto sottile sulla superficie delle fibre, la rende compatibile con la matrice organica. Tale trattamento superficiale del rinforzo comporta la presenza di una terza fase intermedia tra la matrice e le fibre, detta interfaccia o interfase. L’interfaccia consiste normalmente in uno strato molto sottile (spesso monoatomico), localizzato alla superficie del rinforzo, le cui caratteristiche, pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali del composito, sono tuttavia fondamentali per il successo del sistema complessivo nelle applicazioni strutturali.

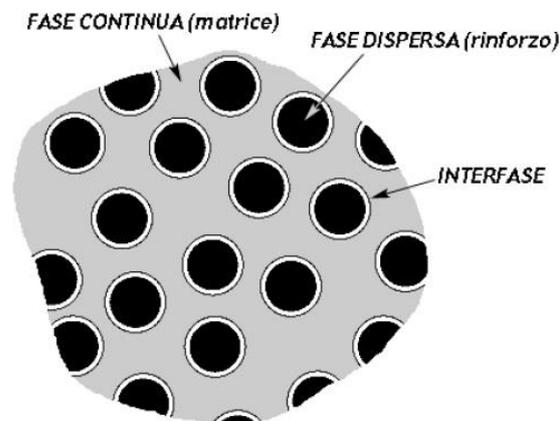


Figura 6. Rappresentazione schematica delle fasi costituenti il composito

Anche se il dettaglio dei meccanismi chimico-fisici che determinano l’adesione tra fibra e matrice è delegato al produttore del materiale, non va dimenticato che la mancanza di adesione tra fibre e matrice è una delle cause principali di cedimento strutturale dei materiali compositi.

2.3.1. Fibre dei compositi FRP

Le fibre più usate per la produzione di materiali compositi FRP sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche. Oltre a queste si stanno diffondendo sempre più anche fibre vegetali (lino, canapa, juta) e minerali, tra cui soprattutto quella di basalto. La particolare geometria filiforme, ancorché molto versatile per la realizzazione dei compositi, conferisce a tali materiali caratteristiche di rigidità e di resistenza molto più elevate di quelle possedute dagli stessi materiali quando siano utilizzati in configurazione tridimensionale: ciò è dovuto alla minore densità di difetti che tipicamente compete alla configurazione monodimensionale rispetto a quest'ultima.

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente. Per tale motivo esse sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni-sono:

- *filamento (monofilament)*: elemento base con dimensioni di circa 10 μm di diametro;
- *cavo di filatura (tow)*: è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), praticamente senza torsione, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- *filo o filato (spun yarn)*: filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- *filo assemblato (roving)*: fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

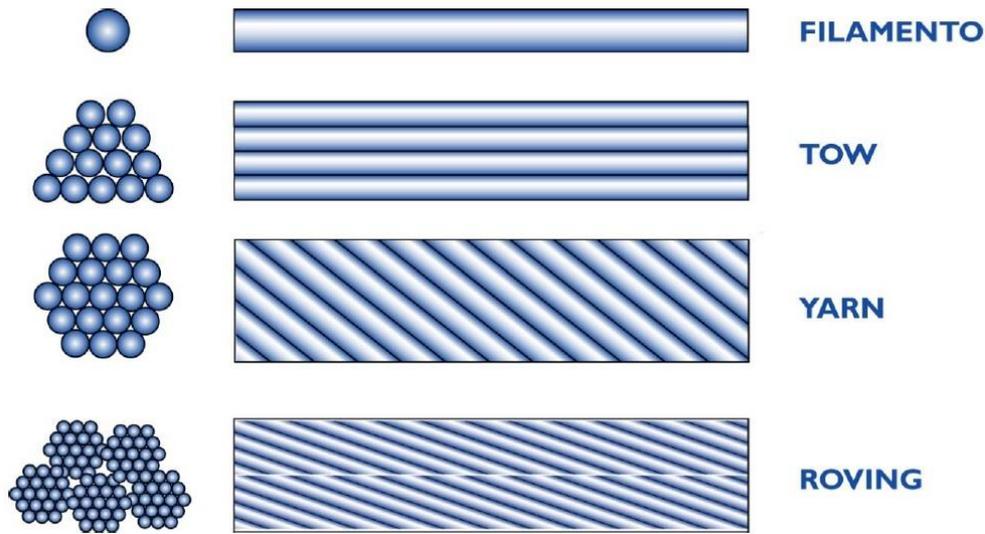


Figura 7. Tipologie di fibre

Combinando insieme alcune centinaia di *tows* o *yarns* si ottiene il *tape*, in cui i *tows* o gli *yarns* possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto.

La classificazione delle fibre è mutuata direttamente da quella tradizionalmente utilizzata per le fibre tessili.

I filamenti costituenti i filati sono caratterizzati essenzialmente dalla composizione chimica e dalla massa per unità di lunghezza. L'unità di misura della massa lineare o titolo (massa per unità di lunghezza) secondo la norma ISO 1144:1973(E) è il Tex, equivalente a 1 g per km di fibra. Un'altra unità di misura di massa lineare, ormai obsoleta, è il denaro (*denier*), che equivale a 0.111 Tex.

La designazione tecnica delle fibre di vetro viene effettuata secondo le norme ISO 1139:1973(E) e ISO 2078:1993(E) e consta dei seguenti elementi:

- una lettera che identifica il tipo di vetro utilizzato;
- una seconda lettera che indica il tipo di fibra utilizzato:
 - C (iniziale di “Continuo”, per i filamenti);
 - D (iniziale di “Discontinuo”, per le fibre discontinue);
- un numero che indica il diametro nominale (in μm) del filamento;
- un numero, separato da uno spazio, che indica la massa lineare della

fibra in Tex;

- il senso e il valore di torsione, espresso in giri/m (opzionale);
- il numero di fili costituenti i ritorti (opzionale);
- un codice del produttore contenente tutte quelle informazioni, non codificate, ritenute indispensabili per caratterizzare il prodotto (opzionale).

Alcuni filati (*yarn*), comunemente usati per i compositi strutturali, corrispondono alla sigla EC5 10 x 2, a base di vetro E, oppure alla sigla SC5 4 x 2, a base di vetro S.

Per le fibre di carbonio si è soliti classificare i filati in termini di “k” dove il simbolo k sta per “migliaia”: ad esempio un filato da 1k sarà costituito da 1000 filamenti (66.6 Tex), uno da 3k (200 Tex) ne conterrà 3000, ecc. Valori tipici sono: 0.5k, 1k, 3k, 6k, 12k, 18k, 24k, 48k.

Oltre che in forma di *yarn* o di *roving*, le fibre sono anche disponibili commercialmente in composizioni opportunamente arrangiate in modo da formare una grande varietà di tessuti (*fabric*). In tal caso la disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Nei tessuti si distingue una direzione principale, detta ordito (*warp*), ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (*weft*).

2.3.1.1. Fibre di vetro

Sono fibre comunemente usate in campo navale ed industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte. Si caratterizzano per la loro elevata resistenza.

Il vetro è composto principalmente da silice (SiO_2) in struttura tetraedrica (SiO_4). Sono aggiunti in varie proporzioni ossidi di alluminio ed altri ioni metallici per facilitare le operazioni di lavorazione o per modificare alcune proprietà (ad esempio le fibre di vetro S rispetto alle E esibiscono una resistenza a trazione più elevata).

Nelle sue linee essenziali la tecnologia di produzione delle fibre di vetro è basata sulla filatura di una miscela (*batch*) costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare. I componenti sono miscelati a secco e portati a fusione (circa 1260 °C) in una fornace a refrattari (*tank*). Il vetro fuso viene alimentato direttamente su filiere di platino (*bushings*) e fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo.

I filamenti, prodotti per filatura da fuso, sono quindi raggruppati, con l'imposizione eventuale di una leggera torsione, a formare una treccia o fibra (*strand* o *end*), tipicamente costituita da 204 filamenti. I singoli filamenti presentano un diametro medio dell'ordine dei 10 μm e sono ricoperti da un legante o bozzima (*binder* o *size*). I filati sono raccolti, perlopiù senza ritorcitura, in *roving*. I valori della massa lineare tipici del *roving* per applicazioni nel settore civile sono superiori a 2000 Tex.

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di fogli sottili, denominati *mat*. Un *mat* può essere costituito sia da fibre lunghe continue che da fibre corte (cioè fibre discontinue di lunghezza tipica compresa tra 25 e 50 mm) disposte casualmente nel piano e tenute assieme da un legante chimico. La larghezza dei *mat* è variabile tra 5 cm e 2 m; la loro densità di massa è dell'ordine di 0.5 kg/m^2 .

Le fibre di vetro esibiscono un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio o a quello delle fibre aramidiche (circa 70 GPa per le fibre di vetro E) ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta,

2. I MATERIALI COMPOSITI

che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Inoltre, esse presentano una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica. Per promuovere l'adesione tra fibre e matrice e per proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dall'umidità, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio (*sizing*) con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Tali trattamenti sono molto utili ai fini della durabilità e della resistenza a fatica (statica e dinamica) del materiale composito.

Gli FRP a base di fibre di vetro si denotano usualmente con l'acronimo GFRP.



Figura 8. Fibra di vetro, tessuto in fibra di vetro, barre in fibra di vetro

2.3.1.2. Fibre di carbonio

Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per il loro alto modulo di elasticità normale e per la loro elevata resistenza. Esibiscono un comportamento a rottura intrinsecamente fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se le tensioni di rottura sono elevate.

A confronto con le fibre di vetro e con quelle arammidiche, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (*creep*) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

La struttura cristallina della grafite è di tipo esagonale, con gli atomi di carbonio organizzati in strutture essenzialmente planari, tenute insieme da forze trasversali di interazione del tipo Van der Waals, di gran lunga più deboli rispetto a quelle che agiscono tra gli atomi di carbonio nel piano (legami covalenti). Per tale motivo il loro modulo di elasticità normale e la loro resistenza sono estremamente elevati nelle direzioni contenute nei suddetti piani, mentre risultano notevolmente inferiori nella direzione trasversale (comportamento anisotropo).

La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite. Il termine “fibre di grafite” viene tuttavia utilizzato nel linguaggio comune, anche se in modo improprio, per indicare fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99%; il termine “fibre di carbonio” indica, invece, fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l’80 ed il 95%.

Il numero di filamenti contenuti nel cavo di filatura (*tow*) può variare da 400 a 160000.

La moderna tecnologia di produzione delle fibre di carbonio si basa essenzialmente sulla pirolisi, cioè la decomposizione termica in assenza di ossigeno di sostanze organiche, dette precursori, tra le quali le più usate sono le fibre di poliacrilonitrile (PAN) e di rayon. Le fibre di PAN vengono dapprima “stabilizzate”, cioè sottoposte ad un trattamento termico a 200-240 °C per 24 h in aria, affinché la loro struttura molecolare subisca un’orientazione

2. I MATERIALI COMPOSITI

preferenziale nella direzione del carico applicato. In seguito subiscono un trattamento di carbonizzazione a 1500 °C in atmosfera inerte, durante il quale la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio, presenti nel precursore, sono eliminati. Le fibre carbonizzate possono quindi essere sottoposte ad un trattamento di grafittizzazione in atmosfera inerte a 3000 °C durante il quale la struttura cristallina delle fibre può svilupparsi completamente, avvicinandosi a quella della grafite pura.

Gli FRP a base di fibre di carbonio si denotano usualmente con l'acronimo CFRP.



Figura 9. Filati di carbonio, tessuto in fibra di carbonio, lamina in fibra di carbonio, barre in fibra di carbonio

2.3.1.3. Fibre aramidiche

Le fibre aramidiche (o aramidiche secondo una consuetudine invalsa in base alla corrispondente denominazione inglese) sono fibre di natura organica, costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata. Introdotte per la prima volta nel 1971, esse si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio. La loro resistenza a compressione è di norma pari a circa 1/8 di quella a trazione: infatti, a causa dell'anisotropia della struttura della fibra, i carichi di compressione favoriscono lo snervamento localizzato con conseguente instabilità e formazione di piegature (*kinks*). Le fibre aramidiche possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione fino al 50%. Inoltre possono risultare sensibili all'umidità. Il comportamento viscoso (*creep*) è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura è molto più elevata. La resistenza sotto carico a lungo termine è simile a quella delle fibre di vetro, ma la resistenza a trazione è più elevata, mentre la deformazione a lungo termine (rilassamento) è molto più marcata e progressiva nel tempo. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre vetro. La tecnologia di produzione delle fibre aramidiche si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero in soluzione con successivo raffreddamento veloce (*quenching*) ed essiccamento. La sintesi del polimero viene effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni fortemente acide.

È possibile sottoporre le fibre così prodotte ad un trattamento di orientazione a caldo per avvolgimento su bobine rotanti ad elevata velocità (*post-spinning*) allo scopo di migliorarne le caratteristiche meccaniche.

Le fibre aramidiche sono disponibili in commercio sotto forma di *yarn*, *roving* e di tessuti.

Gli FRP a base di fibre aramidiche si denotano usualmente con l'acronimo AFRP.



Figura 10. Fibra di aramide, filato di aramide, tessuto in fibra di aramide

Confronto caratteristiche CFRP – GFRP – AFRP:

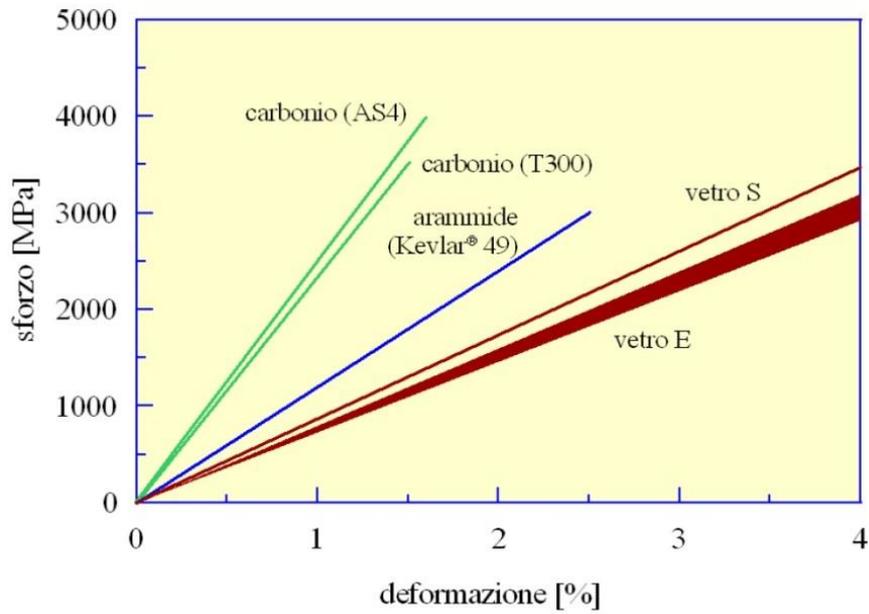


Figura 11. Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale

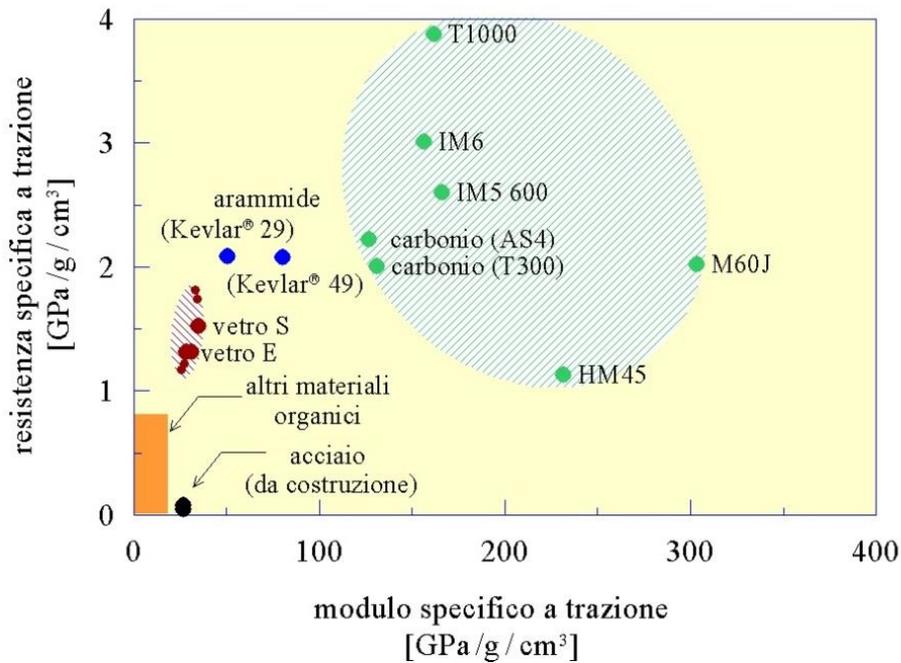


Figura 12. Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: i valori del modulo e della resistenza sono rapportati alla densità (valori specifici)

2.3.1.4. Fibre di basalto

Il basalto è una roccia di origine vulcanica, magmatica effusiva di colore scuro, o nero, con un contenuto di SiO_2 relativamente basso (solitamente minore del 50%) e ricca di calcio. La roccia di basalto è composta di plagiocasi e pirosseni calcici e sovente olivina. I basalti sono rocce pesanti, tenaci e resistenti ed hanno una struttura porfirica, microcristallina o vetrosa, provengono da un magma solidificatosi velocemente a contatto dell'aria o dell'acqua e sono i principali costituenti della parte superiore della crosta oceanica.

Il basalto costituisce la roccia effusiva più abbondante della crosta terrestre ed anche i fondali oceanici sono prevalentemente costituiti da basalto.

I basalti formano gigantesche strutture di spettacolare aspetto. La loro composizione è però variabile e non sempre adatta alla filatura.

Le lave basaltiche hanno scarsa viscosità e fluiscono quindi facilmente fino a ricoprire estese aree come ad esempio i plateaux del Deccan in India che si estendono per 600000 km^2 , due volte la superficie dell'Italia; a volte solidificano in particolari colonne esagonali.

Il basalto è oggi prevalentemente utilizzato per la produzione di manufatti chimicamente resistenti, di lana di roccia e di elementi lapidei per il settore civile e di aggregati per i calcestruzzi a elevatissime prestazioni. Il basalto è un miscuglio di ossidi di silicio, alluminio, calcio, magnesio, ferro e, in tracce, di altri elementi, pertanto l'esatta composizione chimica della fibra di basalto dipende dal produttore e dalle percentuali in cui le diverse rocce basaltiche sono sciolte in un unico fuso.

Le fibre sono filamenti molto sottili di basalto che appartengono alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio e alle fibre di vetro ma, rispetto a queste, hanno migliori proprietà meccaniche e fisiche. Hanno tipicamente un diametro tra 9 e 13 μm .

Sono inoltre ottimi isolanti termici e acustici, mantengono le proprietà meccaniche anche ad alte temperature e sono molto stabili chimicamente (sia in ambiente acido che alcalino).

Il fatto di mantenere le proprietà ad alte temperature e la possibilità di lavorare

in ogni tipo di ambiente le rende ideali a essere impiegate nei FRCM.

Dalla combinazione di una matrice inorganica con una fibra naturale possono nascere materiali compositi completamente nuovi.

Grazie alla loro composizione e al processo di filatura queste fibre acquisiscono eccellenti proprietà meccaniche e chimico-fisiche, quali:

- alta tensione e deformazione di rottura;
- elevata tenacità;
- elevata temperatura di fusione circa 1450°C;
- resistenti ad abrasione;
- bassa conducibilità termica mediamente pari a 0.035 W/mK, elettrica e acustica;
- non sono suscettibili a fenomeni d'idrolisi;
- eccellente resistenza ad agenti chimici basici e acidi;
- l'assenza di reazioni tossiche con aria o acqua.
- sono incombustibili e a prova di esplosione.
- non producono reazioni chimiche che possano danneggiare la salute o l'ambiente a contatto con altre sostanze chimiche.

Grazie a queste caratteristiche le fibre di basalto sono un'ottima alternativa alle fibre di vetro e aramide poiché presentano costi e rigidzze confrontabili e migliori proprietà di resistenza al fuoco e alla corrosione.



Figura 13. Roccia basaltica, filato di basalto



Figura 14. Barre in fibra di basalto

2.3.2. Matrici dei compositi FRP

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente. Per miscelazione con un opportuno reagente esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso; la reazione può essere accelerata agendo sulla temperatura. I vantaggi da esse presentati sono diversi: sono caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre, da ottime proprietà adesive, dalla possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente, da una buona resistenza agli agenti chimici, dall'assenza di una temperatura di fusione, ecc.

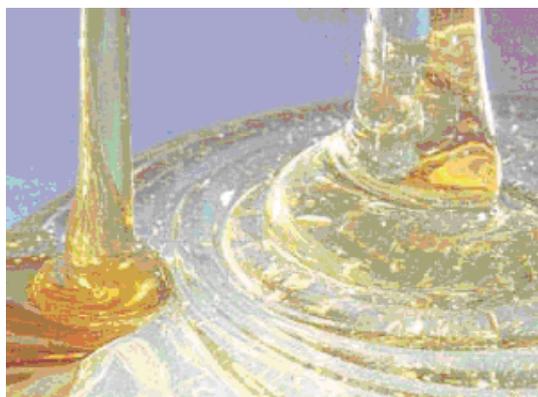


Figura 15. Resina epossidica

I principali svantaggi sono invece rappresentati dall'ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa, dalla modesta tenacità a frattura (comportamento "fragile") e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche. Sono anche impiegate le resine poliestere o vinilestere.

Poiché il materiale viene miscelato a partire dai diversi componenti direttamente in cantiere e assume le sue caratteristiche strutturali finali attraverso una reazione chimica, esso dovrebbe sempre essere applicato da personale specializzato.

Sono anche disponibili materiali compositi fibrorinforzati con matrici polimeriche termoplastiche, che possono richiedere tecniche di applicazione diverse dalle precedenti. Ad esempio, sono allo studio barre di composito con matrice termoplastica le quali, rispetto all'analogo prodotto con matrice termoindurente, hanno il vantaggio di poter essere piegate in qualsiasi momento mediante un opportuno trattamento termico.

Infine, risultano disponibili compositi fibrorinforzati che utilizzano come matrice resine elastomeriche con comportamento elastico e non fragile, caratterizzate da elevata tenacità ed elevato allungamento a rottura.

2.3.2.1. Resine epossidiche

Le resine epossidiche sono caratterizzate da una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre presentano ottime proprietà adesive. Sono perciò particolarmente indicate per la realizzazione di compositi da impiegare nel settore civile.

La temperatura massima di esercizio dipende dalla formulazione e dalla temperatura di reticolazione. Per temperature di esercizio superiori a 60 °C, la resina deve essere opportunamente selezionata tenendo conto delle competenti variazioni delle sue caratteristiche meccaniche. Al contrario non sussistono, di solito, limiti significativi per la temperatura minima di esercizio.

Il reagente principale è costituito da liquidi organici a basso peso molecolare

che contengono un certo numero di gruppi epossidici, anelli composti da un atomo di ossigeno e da due atomi di carbonio.

Tali sostanze possono, ad esempio, essere prodotte per reazione di epichloridrina con composti amminici o acidi del bisfenolo A.

Il prepolimero epossidico, solitamente, è un fluido viscoso, la cui viscosità dipende dal grado di polimerizzazione. Alla suddetta miscela, che in termini di composizione costituisce il reagente principale, viene aggiunto un agente reticolante (di solito un'ammina alifatica).

La reazione, di tipo radicalico, è esotermica e ha luogo senza la formazione di prodotti secondari. Può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura, a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.

La struttura chimica della resina può essere variata a piacere in base alla composizione chimica del prepolimero epossidico.

La resina epossidica più comunemente utilizzata per materiali compositi è il diglicidil etero del bisfenolo A (DGEBA).

2.3.2.2. Resine poliestere

Le resine poliestere sono caratterizzate da una viscosità inferiore rispetto a quella delle epossidiche e presentano una notevole versatilità ed un'elevata reattività. La resistenza meccanica e le proprietà adesive sono solitamente inferiori rispetto alle analoghe esibite dalle resine epossidiche.

Le poliestere insature sono polimeri lineari ad alto peso molecolare, che contengono doppi legami C=C in grado di reagire chimicamente. Il grado di polimerizzazione, e quindi la lunghezza della molecola, può essere variato; tuttavia, a temperatura ambiente, la resina si presenta solitamente come una sostanza solida. Per poter essere impiegata deve quindi essere disciolta in un opportuno solvente: di solito quest'ultimo consiste in un monomero reattivo, che riduce la viscosità della resina e facilita quindi il processo di impregnazione delle fibre. Il monomero (in genere stirene) deve contenere anch'esso dei doppi legami C=C, che consentano di creare dei ponti di

reticolazione tra le molecole di poliestere.

La reazione è esotermica e ha luogo senza la formazione di prodotti secondari.

Può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.

La struttura chimica delle resine poliestere può essere variata a piacere, sia cambiando l'acido e il glicole utilizzati nella sintesi del polimero, sia impiegando un monomero reattivo diverso. La famiglia delle resine poliestere per materiali compositi è costituita essenzialmente da isoftaliche, ortoftaliche e bisfenoliche.

2.3.2.3. Altri tipi di resine

I limiti intrinseci delle resine termoindurenti, sopra elencati, in particolare la modesta tenacità, le temperature di esercizio piuttosto basse e la tendenza ad assorbire umidità dall'ambiente, hanno portato in anni recenti allo sviluppo di compositi a matrice termoplastica. Tali resine sono caratterizzate dalla capacità di fluire una volta riscaldate ad una temperatura sufficientemente elevata, superiore, cioè, alla T_g (temperatura di transizione vetrosa) nel caso di materiali amorfi e superiore alla T_{mat} (temperatura di fusione) nel caso di materiali semicristallini. La forma dei componenti può quindi essere modificata a piacere, riscaldando semplicemente il materiale ad un'opportuna temperatura (formatura a caldo). Pur essendo al momento il loro impiego in campo civile piuttosto limitato, sono allo studio applicazioni di potenziale notevole importanza (ad esempio barre di rinforzo per conglomerato cementizio armato). Rispetto alle resine termoindurenti, quelle termoplastiche sono mediamente più tenaci e, in alcuni casi, presentano temperature di esercizio più elevate. Sono inoltre caratterizzate da una migliore resistenza nei confronti dei fattori ambientali.

La principale limitazione al loro uso è rappresentata dalla viscosità elevata, che rende problematica l'impregnazione delle fibre e richiede apparecchiature di lavorazione complesse e costose.

Per impieghi ad elevata temperatura in ambienti chimicamente aggressivi, sono

state sviluppate le resine vinilestere, che, dal punto di vista applicativo, rappresentano un compromesso tra le prestazioni delle resine poliestere tradizionali e quelle delle resine epossidiche.

Vanno infine ricordate le matrici di natura inorganica (cementizie, metalliche, ceramiche, ecc.), il cui utilizzo per la realizzazione di compositi fibrorinforzati in campo civile, soprattutto quelle cementizie, sta progressivamente diffondendosi. Quest'ultime sono costituite da malte speciali di cementi ad azione pozzolanica che si miscelano con la sola aggiunta di acqua.

Il principale vantaggio di queste matrici è dato da caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche prossime a quelle del supporto rinforzato, come ad esempio:

- Medesima resistenza al fuoco
- Permeabilità comparabile (normale scambio termico ed igrometrico con l'ambiente)
- Applicabilità su supporti anche umidi
- Applicabilità su supporti scabri ed irregolari

2.3.3. Adesivi

La messa in opera di alcuni tipi di rinforzo strutturale a base di FRP, come ad esempio le lamine pultruse, richiede l'utilizzo di adesivi. La scelta più appropriata dell'adesivo e del tipo di trattamento superficiale da effettuare prima dell'applicazione va fatta in base alla natura del substrato della struttura da riparare e del materiale di rinforzo.

Le schede tecniche dei materiali da rinforzo riportano solitamente indicazioni sul tipo di adesivo da utilizzare in funzione della natura della struttura che si intende rinforzare. Anche l'applicazione di tessuti secchi da impregnare in cantiere può essere considerata in senso lato come un caso di assemblaggio mediante adesivi, in quanto la stessa resina utilizzata per l'impregnazione svolge la funzione di adesivo.

Molto importante, per il corretto utilizzo degli adesivi, è il tipo di trattamento superficiale da eseguire prima della loro applicazione.

Si definisce adesivo un materiale, quasi sempre di natura polimerica, in grado

di realizzare un collegamento tra almeno due superfici e di trasmettere forze di entità anche rilevante (collegamento strutturale). Esistono molte tipologie di adesivi naturali e sintetici (elastomeri, resine termoplastiche e termoindurenti mono o bicomponente); i più adatti per i materiali compositi sono gli adesivi a base di resine epossidiche. Gli adesivi epossidici si presentano come una miscela viscosa bicomponente; una volta induriti, a seguito di una reazione chimica di reticolazione, essi realizzano il collegamento strutturale.

I vantaggi delle giunzioni adesive rispetto a quelle meccaniche sono molteplici: possibilità di unire materiali diversi, maggior rigidità, distribuzione dei carichi più uniforme, consolidamento delle parti, assenza di fori potenzialmente dannosi per le conseguenti concentrazioni tensionali, resistenza a fatica, minori costi di intervento. Esistono anche alcuni limiti che richiedono una particolare attenzione nelle applicazioni in campo civile: gli adesivi sono infatti sensibili alle condizioni ambientali, quali l'umidità, e non sono idonei per esposizioni ad alte temperature (resistenza al fuoco).

Nel caso delle giunzioni adesive si possono individuare le seguenti tre tipologie di frattura:



Figura 16. Confronto fra le diverse tipologie di frattura

- Frattura coesiva: avviene all'interno di uno dei materiali che costituiscono il giunto. Lo stesso materiale è dunque presente su entrambe le superfici di frattura, le quali possono presentarsi lisce o rugose. È il tipo di frattura che si osserva nelle condizioni ideali di applicazione dell'adesivo.
- Frattura adesiva: avviene all'interfaccia tra l'adesivo e l'aderendo, quando la resistenza dell'interfaccia (forza di adesione) è minore di quella dell'aderendo. Le superfici di frattura sono solitamente lisce e

costituite da due materiali differenti. Questo tipo di frattura è indice di una non corretta applicazione dell'adesivo.

- Frattura mista: si presenta alternativamente sia come coesiva che adesiva. Le superfici di frattura sono molto irregolari e sono caratterizzate dalla coesistenza di entrambi i materiali. Si manifesta in presenza di un substrato debole e non consolidato, come ad esempio una muratura o un calcestruzzo molto degradati, in concorso con modalità di applicazione dell'adesivo non ottimali.

L'efficienza del giunto adesivo dipende da molti aspetti, tra cui il tipo di trattamento superficiale, la composizione chimica e la viscosità dell'adesivo, la tecnica di applicazione ed infine il processo di indurimento o di reticolazione dello stesso adesivo. I meccanismi di adesione consistono principalmente nell'aggrappaggio meccanico (*interlocking*) dell'adesivo con la superficie dell'aderendo e nella formazione di legami chimici tra le molecole polimeriche e quelle del substrato. Conseguentemente, nel determinare la resistenza dell'adesivo, risultano fondamentali quei trattamenti superficiali tesi ad incrementare la tensione superficiale all'interfaccia ovvero a modificare chimicamente la superficie dell'aderendo, aumentandone la rugosità e quindi l'area effettiva di contatto.

2.3.4. Tecniche di produzione

2.3.4.1. Pultrusione

La pultrusione è una tecnologia utilizzata principalmente per la produzione di barre e lamine fibrorinforzate, di largo impiego in ambito civile.

Essa si basa su un processo continuo di produzione, articolato essenzialmente in tre fasi:

- formatura,
- impregnazione,
- consolidamento.

Nella versione più comune, concepita per matrici termoindurenti, i componenti (resina e fibre) sono alimentati separatamente in una macchina in grado di afferrare e trascinare le fibre attraverso i diversi stadi di produzione.

Una versione molto diffusa del processo è quella con impregnazione a bagno di resina, illustrata in Figura:

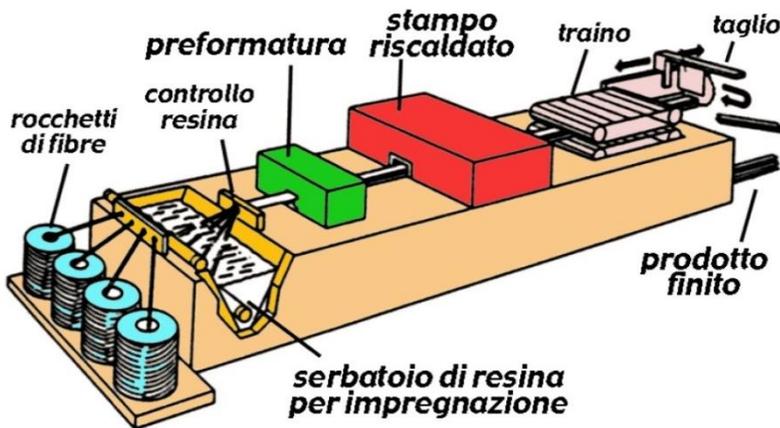


Figura 17. Schema di funzionamento della pultrusione con impregnazione a bagno di resina

Le fibre sono prelevate da un gruppo di rocchetti e convogliate, attraverso rastrelliere che ne uniformano la disposizione, verso un bagno di resina, dove avviene l'impregnazione. Il fascio di fibre impregnate entra quindi in uno stampo riscaldato (*die*), nel quale il materiale si consolida sotto pressione. Durante questa fase i vuoti presenti tra le fibre sono eliminati, garantendo così la continuità del materiale in direzione trasversale.

Il calore viene di solito fornito attraverso resistenze elettriche e la temperatura è controllata mediante termocoppie opportunamente posizionate. Il tempo di permanenza in temperatura è regolato dalla velocità di produzione. All'uscita dallo stampo, la matrice si è solidificata e il composito può essere afferrato dal dispositivo di traino che lo trascina a velocità costante. Una sega circolare taglia il prodotto nella lunghezza desiderata in prossimità della parte terminale della linea di produzione. È possibile aggiungere strati di *mat* o tessuti per rinforzare il materiale anche in direzioni diverse da quella di traino. Con speciali apparecchiature è anche possibile la tessitura, l'avvolgimento e l'intreccio di fibre direttamente sulla linea di produzione.

I compositi pultrusi sono leggeri, resistenti alla corrosione e presentano una sezione costante con spessori che possono raggiungere anche alcuni centimetri. I classici manufatti pultrusi sono lamine, barre, profili a sezione sagomata (ad angolo, a “C”, a doppio “T”, ecc.), pannelli e piastre. Tali manufatti trovano impiego come rinforzi esterni ed interni in campo civile, come componenti strutturali nel settore dei trasporti, come canaline passacavi nell’edilizia, come tiranti e montanti per scale, come supporti per illuminazione e cartellonistica stradale, come “*riser*” per l’industria petrolifera, ecc

2.3.4.2. Stampaggio a compressione con controstampo rigido

Rientra sempre nella categoria dei sistemi preformati. In questo caso si utilizzano stampi, con o senza ricorso a presse, dentro i quali si miscelano la matrice e le fibre, generalmente corte, ottenendo un prodotto quasi isotropo, ma dalle caratteristiche appena mediocri. Tra i prodotti principali vi sono lamine, barre, profili a sezione sagomata, pannelli, piastre.

2.3.4.3. Laminazione

La laminazione trova impiego quasi esclusivamente per la fabbricazione di compositi innovativi. Si tratta di un processo di tipo discontinuo, che permette di produrre laminati compositi di spessore massimo fino ad alcuni centimetri, con struttura molto complessa.

Rispetto alla pultrusione consente una libertà pressoché assoluta in termini di orientazione delle fibre nelle diverse lamine e di curvatura dei pezzi prodotti. La principale limitazione consiste nella lentezza del ciclo di produzione, che è caratterizzato da una velocità dell’ordine di 0.5 kg/h per componenti non troppo complessi.

Nella realizzazione di un laminato tipico, è possibile identificare le seguenti fasi fondamentali:

- preparazione (dello stampo e del materiale);
- laminazione (taglio del materiale, sovrapposizione degli strati e

compattazione);

- confezionamento del sacco da vuoto;
- reticolazione del materiale (a temperatura ambiente, in forno o in autoclave);
- ispezione (visiva, con ultrasuoni e con raggi X);
- finitura (taglio dei bordi con fresa o getto d'acqua ad alta pressione).

La laminazione (*lay-up*) può essere eseguita a partire da fibre secche che devono essere impregnate di resina durante l'applicazione, oppure a partire da un preimpregnato a fibre continue, unidirezionali o tessute.

La fase successiva della laminazione prevede la preparazione del sacco da vuoto: una tipica composizione di quest'ultimo, con l'indicazione dei vari componenti, è illustrata in Figura:

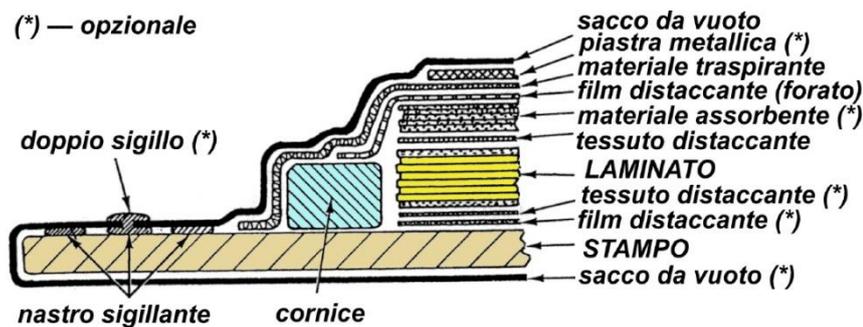


Figura 18. Rappresentazione del sistema per laminazione

All'interno del sacco viene praticato il vuoto attraverso una valvola collegata ad una pompa. Il vuoto ha essenzialmente il compito di consentire la rapida estrazione dei solventi e dell'aria contenuti nel laminato e di compattare gli strati tra di loro prima della reticolazione completa della resina. Il sacco da vuoto assolve, inoltre, a diverse funzioni molto importanti per lo svolgimento del successivo processo di reticolazione, ma non è indispensabile.

Il principale vantaggio della suddetta tecnologia è l'estrema versatilità di impiego, che consente di produrre componenti di forma anche molto complessa senza richiedere stampi costosi.

Le applicazioni principali riguardano il settore aeronautico e quello aerospaziale, l'automobilismo da competizione, la nautica e il trasporto in

generale. Un esempio di applicazione della laminazione (manuale) in campo civile è rappresentato dal confinamento di colonne o dal rinforzo a taglio di travi mediante l'applicazione di un tessuto secco (o un preimpregnato) sulla superficie delle membrature con successiva impregnazione di resina mediante rullatura.

2.3.4.4. Wet lay-up

La laminazione a umido (*wet lay-up*) è una delle più semplici e tradizionali tecniche utilizzate per la preparazione dei compositi *in situ*.

Essa si articola in due fasi: una di stratificazione ed una di polimerizzazione.

Nel dettaglio, la prima consiste nel disporre manualmente, su uno specifico supporto, uno strato di tessuto che viene successivamente impregnato di resina premiscelata al catalizzatore.

L'impregnazione è realizzata manualmente con rulli o pennelli ed è seguita da un'accurata rullatura finalizzata alla compattazione del materiale ed all'eliminazione delle bolle d'aria in esso intrappolate.

Simile procedura può essere ripetuta per ogni ulteriore strato di tessuto aggiunto singolarmente, fino al raggiungimento dello spessore desiderato.

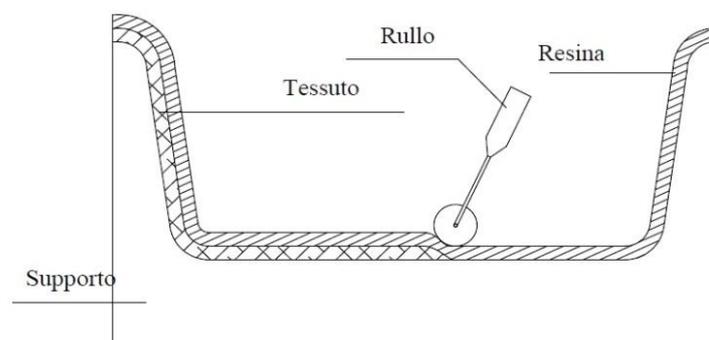


Figura 19. Formatura per contatto manuale

La fase di polimerizzazione segue la stratificazione e si sviluppa a temperatura ambiente ed in tempi sufficientemente brevi senza la necessità di riscaldare la superficie del composito.

2.4. Campi di applicazione

Le numerose tipologie di rinforzi sono destinate a garantire alla struttura (realizzata con i più diffusi materiali da costruzione quali calcestruzzo, muratura, legno, acciaio) sulla quale vengono applicati, un incremento della resistenza alle sollecitazioni di flessione, taglio e compressione.

Questo risultato avviene tipicamente procedendo secondo una delle seguenti tre tipologie di rinforzo:

- Incollaggio di tessuti, reti, o laminati su travi o pilastri aventi materiali in buone condizioni (calcestruzzo, muratura, legno sani);
- Incollaggio di tessuti, reti, o laminati su travi o pilastri previo rifacimento/ringrosso di parte della struttura stessa (ad esempio in caso di calcestruzzo o muratura degradati);
- Inserimento di barre nella faccia tesa di travi o pilastri previa formazione di tasche nel calcestruzzo sano o di ringrossi e/o di ripristini del copriferro.

Dalle tre tipologie di rinforzi sopra evidenziati, si deduce che esistono numerosi campi di applicazione dove l'impiego di FRP è una soluzione eccellente, quali ad esempio:

- ✓ Rinforzo di strutture dove si preveda un incremento dei carichi, che risulta generalmente il caso più comune;



Figura 20. Rinforzo volta a crociera con tessuto CFRP



Figura 21. Rinforzo a flessione di travetti di solaio con lamine in CFRP

- ✓ Riparazione di errori progettuali e/o costruttivi (quali ad esempio problematiche connesse al passaggio di impiantistica non prevista in fase progettuale o di errata progettazione e/o messa in opera di barre di armatura su strutture in cemento armato);
- ✓ Adeguamenti a nuove normative (quali ad esempio adeguamenti sismici);



Figura 22. Confinamento pilastri con tessuto in CFRP



Figura 23. Rinforzo a taglio di travi con tessuto in CFRP

- ✓ Interventi di ripristino di strutture in c.a. degradate a seguito di corrosione delle armature metalliche (e di conseguenza di perdita di sezione utile da reintegrare con armature non soggette a corrosione);



Figura 24. Sostituzione armatura d'acciaio con griglia di barre GFRP in una struttura marina

- ✓ Ripristino di travi impattate, accadimento frequente nel caso di sovrappassi con franco.

Risulta molto frequente l'intervento di rinforzo su strutture esistenti degradate; si precisa quindi che è molto importante l'accoppiamento del sistema di rinforzo anche con malte di ripristino aventi particolari prestazioni di:

- Adesione al supporto
- Stabilità dimensionale
- Elevata energia di frattura d'interfaccia
- Moduli elastici compatibili con l'esistente.

Un altro campo di applicazione è invece l'impiego di barre di FRP come armatura di getti di calcestruzzo cementizio. L'uso dei materiali compositi fibro-rinforzati in sostituzione dell'acciaio, per la realizzazione di elementi strutturali di calcestruzzo, costituisce una pratica ormai diffusa in molti paesi del mondo. La peculiare caratteristica degli FRP di non essere suscettibili ai fenomeni di corrosione rende tale impiego particolarmente vantaggioso in svariate situazioni, come ad esempio per strutture in ambiente marino; inoltre, i materiali compositi a base di fibre di vetro (GFRP) non sono conduttori, per cui sono molto vantaggiosi in strutture soggette a problemi elettromagnetici, quali sale ospedaliere, centrali radio, centrali di trasformazione elettrica...



Figura 25. Solette da ponte con armatura in GFRP



Figura 26. Barre e staffe in GFRP

3. BARRE IN FRP

Approfondisco ora, a livello teorico, la tipologia di prodotto FRP oggetto principale di questa tesi, le barre di materiale composito fibrorinforzato.

Le barre di FRP disponibili in commercio per l'impiego come armature lente di getti di calcestruzzo sono costituite di fibre di vetro (GFRP), di carbonio (CFRP), di arammide (AFRP) o di basalto immerse in resine sia termoindurenti che termoplastiche. La peculiare caratteristica delle barre in FRP di non essere suscettibili ai fenomeni di corrosione rende tale impiego particolarmente vantaggioso in svariate situazioni.

Le proprietà delle barre di FRP, quali le prestazioni ad elevate temperature, la resistenza alla corrosione, le proprietà dielettriche, l'inflammabilità e la conducibilità termica, sono funzione delle caratteristiche dei componenti.

3.1. Processi di produzione e tipologie di barre in FRP

Le barre di FRP esibiscono comportamento anisotropo e possono essere caratterizzate da differenti tipi di sezione trasversale (rettangolare, rotonda, piena o cava). Esse sono realizzate principalmente mediante processi di pultrusione a cui possono seguire fasi di intrecciatura o tessitura di filamenti trasversali di fibre attorno alla sezione per produrre diversi sistemi atti ad assicurare una migliore aderenza barra-conglomerato cementizio. Tra di essi si citano quelli per la produzione di nervature ottenute avvolgendo in modo elicoidale filamenti di fibre attorno alla sezione, la smerigliatura delle superfici della barra e le nervature in sola resina ricavate mediante stampaggio.

La disposizione di filamenti di fibre trasversali attorno alla sezione è di notevole importanza per il comportamento a taglio delle barre che, come tutti i laminati fibrorinforzati, presentano una bassa resistenza al taglio interlaminare, governata principalmente dalla matrice polimerica. Tali fibre sono abitualmente applicate a conclusione del processo di pultrusione. Una tecnologia alternativa, basata sull'utilizzo di strati di *mat* (ovvero un tessuto

costituito da fibre corte orientate in modo casuale) permette di rinforzare la barra in direzione trasversale al proprio asse durante il processo di pultrusione. Rispetto alle barre metalliche quelle di FRP presentano dei limiti di applicazione dovuti alle difficoltà di ottenere staffe o pezzi sagomati mediante piegatura. Tali elementi possono essere comunque prodotti per stampaggio in appositi impianti, ma nei limiti di determinate forme e dimensioni e con inevitabili costi aggiuntivi. Attualmente le barre di FRP vengono utilizzate per lo più sotto forma di barre rettilinee singole o di griglie per la realizzazione di solette, muri e diaframmi. L'utilizzo delle resine termoplastiche sta introducendo nuove possibilità per ovviare ai suddetti inconvenienti ed i primi risultati sono decisamente promettenti, rendendo le barre di FRP competitive con quelle metalliche anche sotto tale aspetto.

Fattori quali il volume e l'orientamento delle fibre, la natura di queste ultime e della resina, gli effetti dimensionali ed il controllo di qualità durante la produzione svolgono un ruolo importante nella determinazione delle caratteristiche delle barre di FRP.

Sono disponibili quindi tante tipologie di barre in FRP, che possono distinguersi tra loro per:

- diverse forme e trattamenti superficiali
- differenti tipi e quantità di fibre
- differenti tipi di resine

Possiamo separare le barre con superficie non deformata da quelle deformate:

- *Barre in FRP con superficie indeformata*, ovvero tutte quelle barre che non sono state sottoposte ad alcun processo di deformazione superficiale, come ad esempio le barre lisce, barre sabbiolate o barre ricoperte di grani per aumentare l'aderenza.
- *Barre in FRP con superficie deformata*, ovvero tutte quelle barre che hanno avuto una deformazione superficiale, allo scopo di migliorare le caratteristiche di aderenza. Sono stati sviluppati numerosi processi per

3. BARRE IN FRP

produrre barre deformate ed è stata messa sul mercato un'ampia scelta di barre. Sono disponibili le seguenti categorie di barre deformate:

- nervate
- intrecciate
- intagliate
- attorcigliate
- a spirale incollata

In ognuna di queste cinque categorie sono disponibili vari prodotti fatti di materiali differenti (fibre e resine) e con differenti geometrie, come ad esempio diverse spaziature e misure delle nervature.

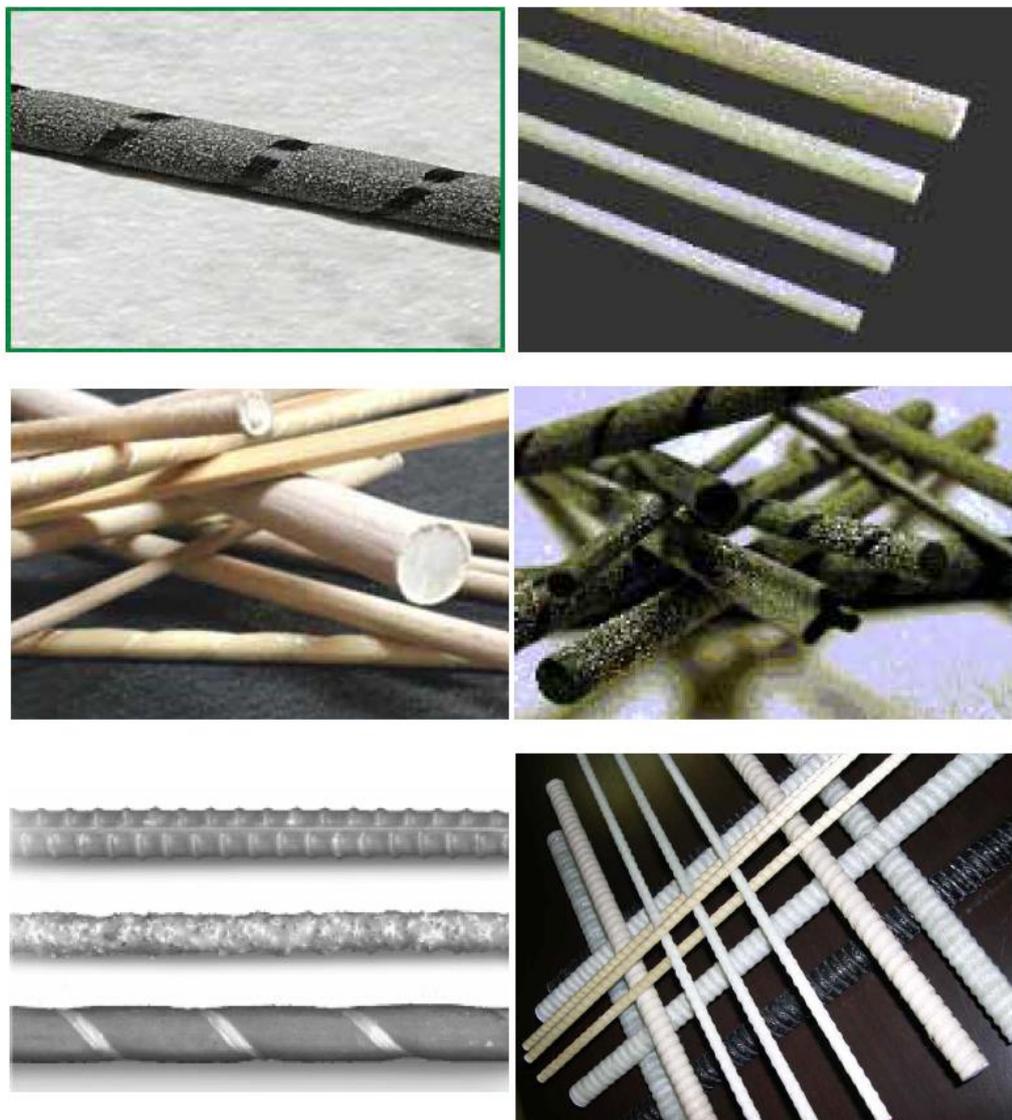


Figura 27. Tipologie di barre di FRP presenti in commercio

3.2. Caratteristiche delle barre in FRP

Come accennato in precedenza, dal punto di vista teorico non emergono differenze concettuali rispetto alla tradizionale teoria del calcestruzzo armato con barre di acciaio. Ciò che soprattutto va tenuto in conto è il diverso comportamento meccanico degli FRP, il cui legame costitutivo è essenzialmente elastico lineare fino a rottura.

Un'attenzione particolare è richiesta per le applicazioni in zona sismica, laddove deve essere tenuta in debita considerazione la quasi totale assenza di duttilità nelle strutture così realizzate.

3.2.1. Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche di tali materiali dipendono principalmente dal tipo di matrice e dalla natura delle fibre, nonché dalla frazione volumetrica di queste ultime. Le barre di FRP sono caratterizzate da un assetto unidirezionale delle fibre, generalmente presenti con una frazione volumetrica compresa tra il 50% e il 70%. Solitamente il valore caratteristico della resistenza a trazione non è inferiore a 400 MPa, e i valori medi dei moduli di elasticità a trazione in direzione longitudinale non sono inferiori a 100 GPa per le barre con fibre di carbonio, a 35 GPa per quelle con fibre di vetro ed a 65 GPa per quelle con fibre aramidiche.

Essendo generalmente il modulo elastico delle barre in FRP minore di quello dell'acciaio, la rigidezza di un elemento armato con barre in FRP sarà minore rispetto ad un elemento armato con barre d'acciaio, e di conseguenza si avrà una maggior deformabilità rispetto al progetto con l'armatura tradizionale.

3.2.2. Proprietà chimico-fisiche

Si è già detto della loro proprietà di non essere suscettibili ai fenomeni di corrosione, il che li rende potenzialmente utili per le costruzioni marine e per quelle esposte ad ambienti molto aggressivi.

Inoltre, i materiali compositi a base di fibre di vetro (GFRP) non sono conduttori. Ne risulta che l'impiego delle barre di GFRP, come armature di elementi esposti a correnti vaganti, di fatto risolve il problema della corrosione che aggredisce invece le usuali armature metalliche. La presenza di correnti vaganti affligge, ad esempio, le strutture a servizio del trasporto su rotaia (linee ferroviarie o metropolitane) a cielo aperto o in galleria. Anche le solette di ponti stradali, utilizzati come cavalcavia ferroviari, possono essere interessate dallo stesso fenomeno.

Un'altra caratteristica delle barre in FRP è la trasparenza magnetica. Quest'ultima proprietà può infatti risultare utilissima in determinate circostanze, come ad esempio nella realizzazione di sale ospedaliere, allo scopo di evitare interferenze con le più moderne attrezzature per la risonanza magnetica e per la diagnostica ad immagini.

Le armature di materiale composito fibrorinforzato sono sensibili al fenomeno della fatica statica (nota nella terminologia anglosassone come "*creep rupture*"), consistente in una progressiva diminuzione della resistenza in presenza di carichi di lunga durata. Tale fenomeno, di natura viscosa, risulta fortemente influenzato anche da fattori di tipo ambientale, quali temperatura ed umidità. Per mitigare gli effetti della viscosità ed evitare la rottura delle barre per *creep*, è raccomandato di limitare opportunamente le tensioni di esercizio in queste ultime.

Per quanto riguarda i coefficienti di dilatazione termica delle barre di FRP in direzione longitudinale, α_l , e trasversale, α_t , sono strettamente correlati a quelli delle singole fasi (matrice e fibre) che costituiscono il materiale composito.

In particolare, al crescere della frazione volumetrica delle fibre, il valore del coefficiente α_l tende a quello delle fibre; in caso contrario, esso tende al valore del coefficiente di dilatazione termica della matrice. Valori tipici del coefficiente di dilatazione termica longitudinale e di quello trasversale, relativi a barre di composito con una frazione volumetrica di fibre compresa tra il 50% ed il 70%, sono riportati nella seguente Tabella:

Barra	α_1 [$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	α_t [$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]
AFRP	-6.0 ÷ -2.0	60.0 ÷ 80.0
CFRP	-2.0 ÷ 0.0	23.0 ÷ 32.0
GFRP	6.0 ÷ 10.0	21.0 ÷ 23.0

Figura 28. Coefficienti di dilatazione termica

I valori elevati delle dilatazioni termiche trasversali, unitamente all'effetto Poisson nel caso di armature compresse, possono mobilitare notevoli tensioni circonferenziali di trazione nel ricoprimento ed innescare fessure in direzione radiale, come mostrato in Figura:

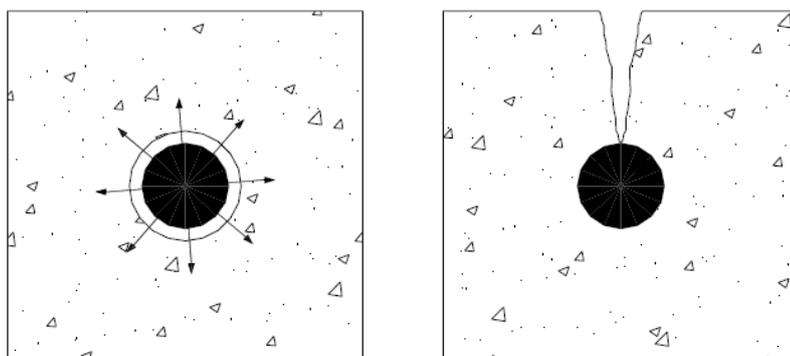


Figura 29. Fessurazione indotta dalle tensioni circonferenziali

Queste ultime possono influenzare l'aderenza calcestruzzo-FRP con conseguenze indesiderabili sul comportamento strutturale, sia in condizioni di esercizio che in condizioni ultime.

Al di sopra della T_g , il modulo elastico di un polimero si riduce significativamente a causa di una modifica della sua struttura molecolare. Il valore di T_g dipende dal tipo di resina, ma di solito è compreso in un intervallo che varia tra 65 e 120°C. In un materiale composito, le fibre che presentano migliori proprietà termiche rispetto alle resine, riescono a sostenere un certo carico in direzione longitudinale, finché non si raggiunge la temperatura limite. In ogni modo, a causa della riduzione del trasferimento degli sforzi tra le fibre, che dipende dalla resina, le proprietà del composito nel suo insieme tendono a deteriorarsi. Risultati sperimentali hanno dimostrato che temperature prossime ai 250°C, molto più alte dei valori di T_g delle resine, possono ridurre i valori della resistenza a trazione di GFRP e CFRP di oltre il 20%.

4. L'ADERENZA DELLE BARRE IN FRP NEL CALCESTRUZZO

Vediamo ora l'argomento principale di questa tesi: l'aderenza delle barre in FRP nel calcestruzzo. Vengono introdotti in un primo momento quelli che sono i principali meccanismi attraverso cui si manifesta l'aderenza tra una barra di armatura e il calcestruzzo, poi viene descritto il fenomeno, prima per le barre in acciaio, poi per quelle in FRP. Infine vengono riportati i modelli più noti in letteratura proposti per descrivere l'aderenza delle barre in FRP nel calcestruzzo.

In termini generali, l'aderenza è la forza che si oppone allo scorrimento relativo di due superfici a contatto. Considerando una sezione di un elemento in calcestruzzo armato, l'aderenza permette il trasferimento degli sforzi dalle barre di armatura al calcestruzzo circostante.

L'aderenza influenza il comportamento di strutture in calcestruzzo in diversi aspetti, tra cui principalmente:

- Lunghezza di ancoraggio delle barre di armatura nel calcestruzzo
- Ampiezza e distanza delle fessurazioni in un elemento di calcestruzzo armato inflesso

La condizione di “perfetta aderenza”, è un aspetto fondamentale nella progettazione, in quanto rappresenta una delle principali ipotesi di calcolo del metodo semiprobabilistico agli stati limite.

Una barra di armatura immersa in un blocco di calcestruzzo indurito, sottoposta ad una forza di trazione, può avere 2 tipi di crisi:

- prevale l'estrazione della barra dal calcestruzzo (rottura per *pull-out* o per *splitting*)
- prevale la rottura a trazione della barra

4.1. I principali meccanismi del fenomeno dell'aderenza

L'aderenza di una barra di armatura nel calcestruzzo si manifesta attraverso 3 principali meccanismi:

- *ADESIONE CHIMICA*, ovvero l'insieme dei fenomeni fisico-chimici che si producono nell'attrazione molecolare tra la barra e il calcestruzzo;
- *ATTRITO*, dovuto alla rugosità delle superfici;
- *INGRANAMENTO MECCANICO DELLA BARRA CON IL CALCESTRUZZO*, prodotto dall'incastro della barra grazie alle proprie nervature, nel calcestruzzo.

I meccanismi che governano l'aderenza sono molto simili per barre in acciaio e barre in FRP. Come è riportato nel "fib bulletin 10" [10], si può dire che per bassi valori di tensioni di aderenza, indicativamente $\tau \leq 0,2 \div 0,8 f_{ct}$, dove f_{ct} è la resistenza a trazione del calcestruzzo, l'unico meccanismo reagente è l'adesione chimica. Per valori maggiori, $\tau \leq 0,8 \div 1,5 f_{ct}$, si verifica lo scollamento tra barra e calcestruzzo, e le nervature della barra iniziano ad esercitare sul calcestruzzo circostante un'elevata pressione inclinata rispetto all'asse della barra, la quale provoca il distacco del calcestruzzo a monte delle nervature. Da qui iniziano a manifestarsi le prime microfessure trasversali, come mostrato in Figura:

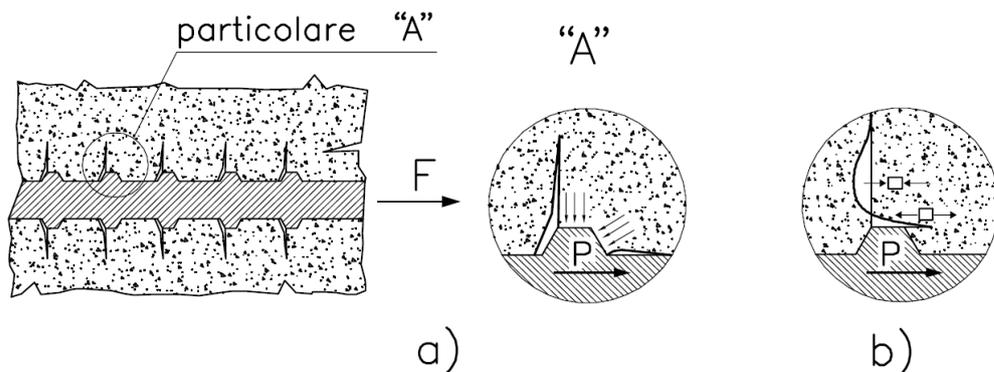


Figura 30. Microfessure trasversali (a), tensioni longitudinali di trazione all'apice della nervatura (b)

Aumentando ancora il valore della tensione tangenziale, per $\tau \approx 1/3 f_{ct}$, il meccanismo agente è esclusivamente di tipo meccanico: si generano delle bielle compresse di calcestruzzo a valle delle nervature, inclinate di circa 45° , che generano poi delle tensioni di trazione “circonferenziali”, responsabili delle fessure longitudinali da spacco, chiamate fessure da “splitting”, in piani passanti per l’asse delle barre, come si può vedere nella seguente Figura:

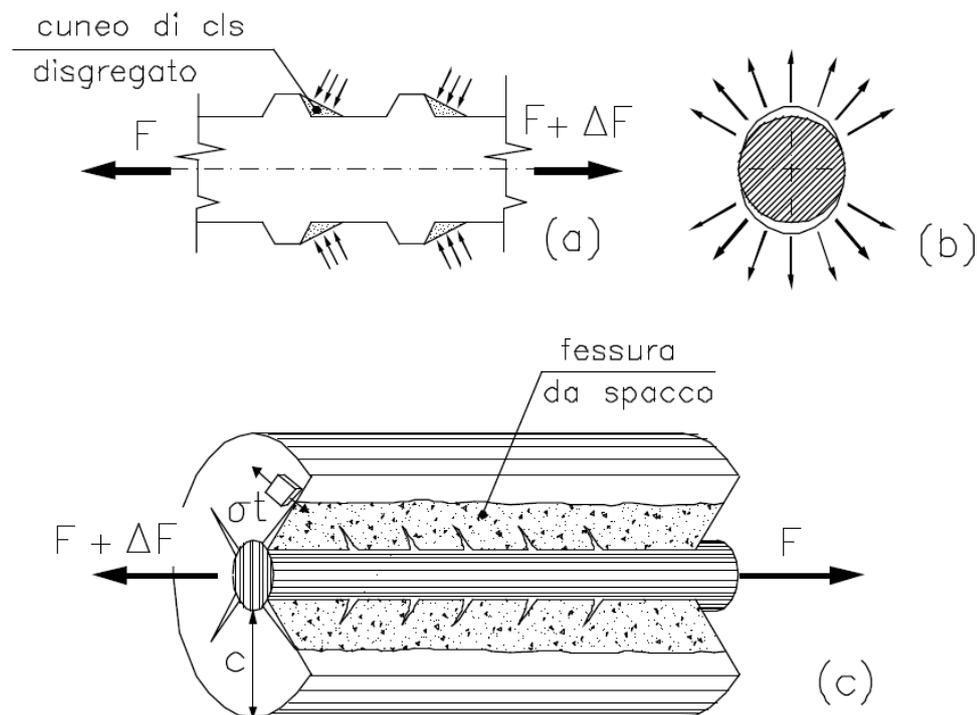


Figura 31. Cunei di conglomerato a monte della nervatura (a), spinte radiali da essi esercitate (b), fessure trasversali e longitudinali da spacco (c)

Nelle barre lisce, viene a mancare completamente il meccanismo di resistenza al taglio del calcestruzzo, per cui si avranno delle tensioni di aderenza massime inferiori rispetto alle barre nervate.

Se non si ha nessun tipo di confinamento, si può giungere ad un collasso di tipo fragile (detto “*collasso per splitting*”), conseguente ad una propagazione delle fessure fino al copriferro. Nella Figura seguente sono rappresentate le due tipologie di collasso possibili:

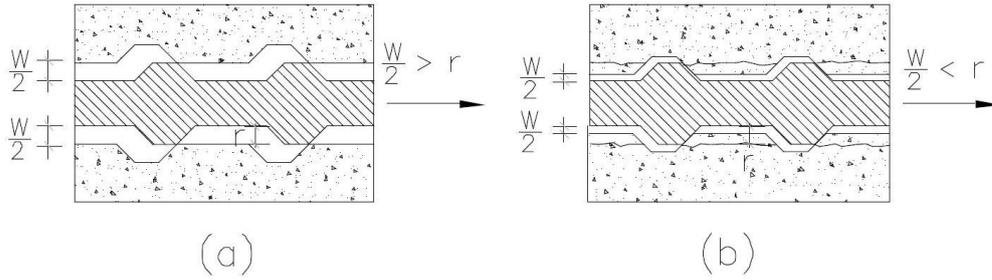


Figura 32. Schema del collasso locale dell'aderenza: collasso per incontrollata apertura della fessura da spacco ("splitting") (a), collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo ("pull-out") (b)

In presenza invece di un buon confinamento (staffe, pressioni laterali, o copriferro $> 5\Phi$, con Φ diametro della barra), l'aderenza può migliorare sensibilmente, fino alla rottura per tranciamento dei denti di calcestruzzo tra le nervature della barra (detto "collasso per pull-out"). In questo caso si verifica il collasso locale del calcestruzzo circostante la barra, e l'aderenza è garantita solo dall'attrito tra barra e calcestruzzo. Nella seguente Figura sono rappresentati le azioni di confinamento prodotte dalle armature trasversali o da pressioni esterne, come può essere ad esempio un appoggio.

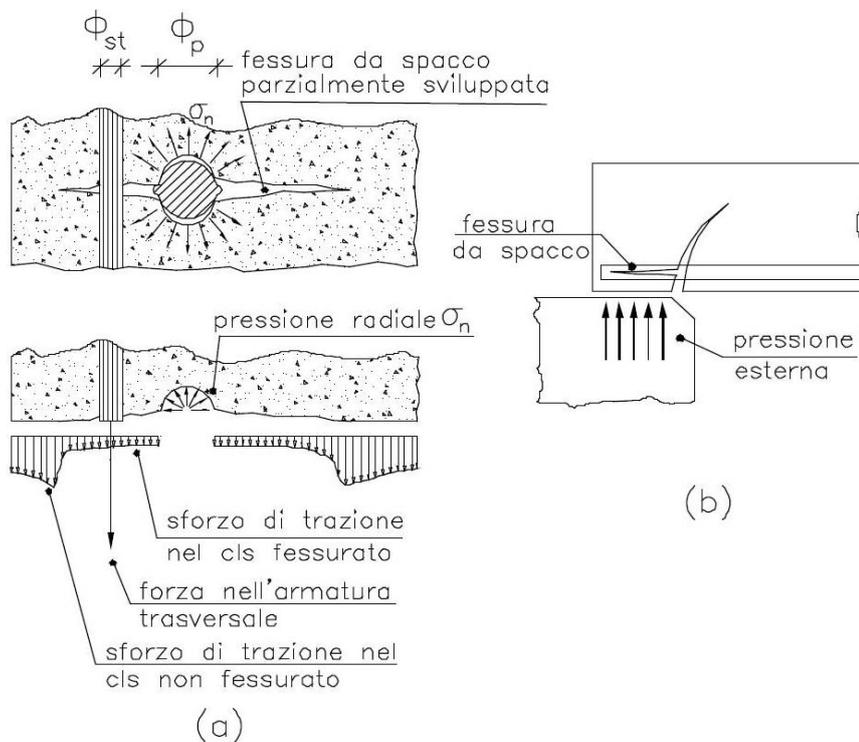


Figura 33. Azioni di confinamento sulla barra ancorata: azione dell'armatura trasversale e del calcestruzzo (a), azione della pressione esterna (b)

4. L'ADERENZA DELLE BARRE IN FRP NEL CALCESTRUZZO

In molte strutture in calcestruzzo armato, soprattutto in quelle meno recenti, le barre di armature hanno un copriferro molto limitato, e in questi casi il collasso dell'aderenza avviene per *splitting*, espellendo il copriferro. L'espulsione del copriferro è principalmente dovuto, come detto in precedenza, alle pressioni radiali indotte dai puntoni di calcestruzzo tra le nervature, che generano tensioni circonferenziali, le quali, una volta superata la resistenza a trazione del conglomerato, causano l'apertura e la propagazione delle fessurazioni fino in superficie. Dal punto di vista più pratico, la tensione radiale può essere vista come una "pressione idraulica" agente su un "anello" di calcestruzzo. Questo anello di calcestruzzo può avere tre tipi di comportamento:

- *Elastico*
- *Parzialmente fessurato-elastico*
- *Plastico*

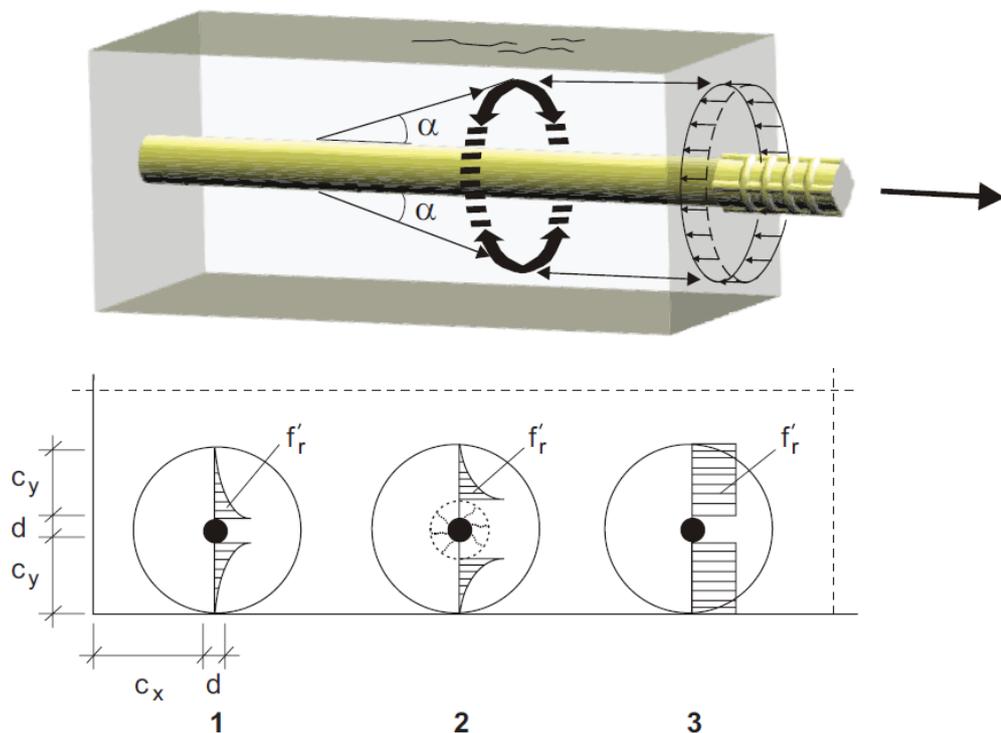


Figura 34. Distribuzione delle tensioni circonferenziali: comportamento elastico (1), comportamento parzialmente fessurato-elastico (2), comportamento plastico (3)

Come descritto nel “*fib bulletin 40*” [13], Tepfers (1973) [19], sviluppò, per questa condizione di collasso, delle equazioni che descrivono la tensione tangenziale di aderenza τ nelle tre diverse fasi, in funzione del diametro della barra d , dei valori dei copriferri c_y - c_x , della resistenza a trazione del conglomerato f_{ct} e dell'angolo α tra la direzione della barra e dei puntoni di calcestruzzo. Quest'ultima porta a risultati più che soddisfacenti se presa 45° per le barre in acciaio e 30° per le barre in FRP.

Le relazioni di Tepfers per le tre fasi sono:

- Fase elastica:

$$\frac{\tau}{f_{ct}} = \frac{1}{\tan\alpha} \left[\frac{\left(c_y + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}{\left(c_y + \frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right] \quad (4.1)$$

- Fase parzialmente fessurata-elastica

$$\frac{\tau}{f_{ct}} = \left[\frac{\left(c_y + \frac{d}{2}\right)}{1,664 d \tan\alpha} \right] \quad (4.2)$$

- Fase plastica

$$\frac{\tau}{f_{ct}} = \frac{2c_y}{d \tan\alpha} \quad (4.3)$$

4.2. Descrizione del fenomeno dell'aderenza per le barre in acciaio

Un comportamento molto più dettagliato dell'aderenza tra le barre in acciaio e il calcestruzzo è riportato nel "fib bulletin 10" [12].

L'aderenza barra d'acciaio-calcestruzzo è un fenomeno che permette di trasferire gli sforzi longitudinali dalla barra al calcestruzzo circostante. A causa di questo trasferimento di forza, gli sforzi nella barra in acciaio variano lungo la sua lunghezza, così come nel calcestruzzo. Le deformazioni dell'acciaio e del calcestruzzo differiscono in ogni punto, per cui si verifica uno scorrimento tra i due materiali, che è maggiore verso l'estremo dove è applicata la forza.

I ricercatori che hanno studiato l'aderenza barra d'acciaio-calcestruzzo in passato mediante prove di pull-out, hanno evidenziato quattro stadi caratterizzanti questo fenomeno, come si può vedere in Figura:

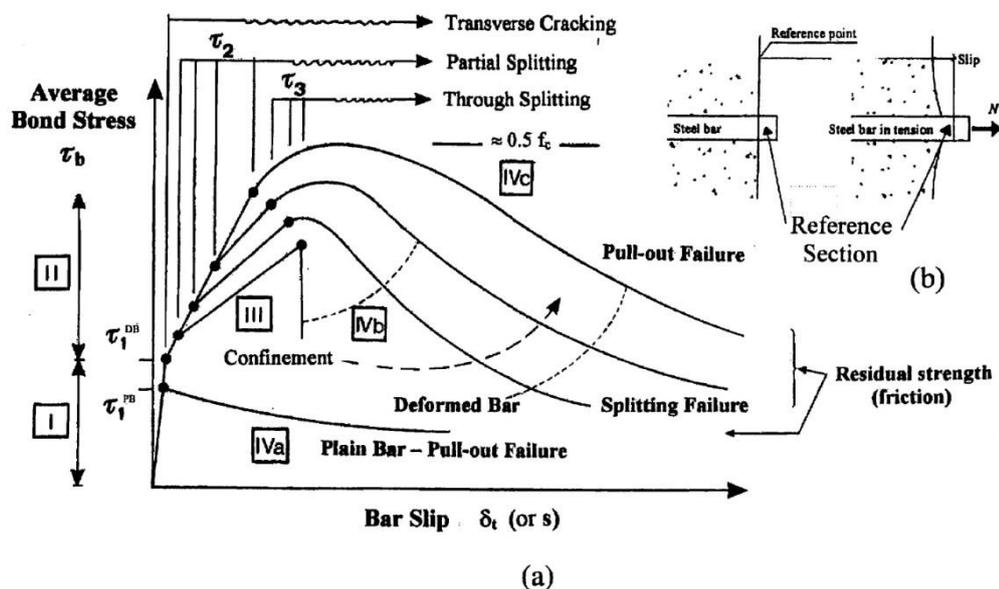


Figura 35. Legame delle tensioni di aderenza-scorrimento per le barre d'acciaio (a), scorrimento relativo della barra (slip) (b)

- *STAGE I*: per bassi valori di tensione tangenziale, $\tau \leq \tau_I = (0,2 \div 0,8) f_{ct}$, dove f_{ct} è la resistenza a trazione del calcestruzzo, il meccanismo di aderenza è assicurato principalmente dall'adesione chimica, e non vi

sono scorrimenti. L'adesione chimica è accompagnata da interazioni micromeccaniche associate alla microscopica rugosità della superficie della barra, ma sull'intero fenomeno di aderenza questa fase gioca una piccolissima parte. Per quanto riguarda le barre lisce, l'adesione chimica e le microinterazioni vengono subito seguite dallo scorrimento della barra per attrito. Sebbene in questa fase non vi è scorrimento tra barra e calcestruzzo, c'è un piccolo spostamento in corrispondenza dell'interfaccia dovuto alle deformazioni dei due materiali.

- *STAGE II*: per valori maggiori di tensione tangenziale, $\tau > \tau_I$, l'adesione chimica cessa, e per le barre deformate le nervature inducono sforzi di compressione nel calcestruzzo circostante, innescando delle microfessure trasversali a monte delle stesse nervature.
- *STAGE III*: per valori ancora più alti di tensione tangenziale, $\tau > (1 \div 3)f_{ct}$, le fessure longitudinali si propagano radialmente a causa della pressione esercitata dai cunei di calcestruzzo alla base delle nervature, che provocano le tensioni circonferenziali. Il calcestruzzo circostante esercita un'azione di confinamento sulla barra, e l'aderenza è garantita principalmente dall'ingranamento tra le nervature della barra e i puntoni di calcestruzzo, all'interno dell'anello di conglomerato ancora intatto. Questa fase finisce tanto prima e improvvisamente quanto minore è il confinamento, andando sempre più verso il collasso per *splitting* (stage IVb). Con un buon confinamento invece le fessurazioni rimangono limitate attorno alla barra e il collasso avviene per *pull-out* (stage IVc).
- *STAGE IVa*: per le barre lisce questa fase segue immediatamente la rottura dell'adesione chimica; il trasferimento degli sforzi è fornito quasi solamente per attrito, ed è fortemente influenzato dalla pressione trasversale. La contrazione del calcestruzzo e la micro-rugosità della

barra sono i fattori che aumentano l'attrito. All'aumentare dello scorrimento, il logoramento dell'interfaccia barra-calcestruzzo causa la riduzione delle pressioni radiali e, quindi dell'aderenza.

- *STAGE IVb*: nel caso di barre deformate con debole o nessun tipo di confinamento, le fessure longitudinali si propagano fino in superficie e il collasso per splitting avviene quasi istantaneamente. La presenza di staffe assicura una maggiore aderenza, in quanto queste armature esercitano un efficace contenimento. In questa fase i valori della tensione tangenziale si aggirano attorno a $(0,3 \div 0,5)f_{ct}$, e si possono avere anche elevati valori di scorrimento ($\text{scorrimento}/\text{diametro barra} = s/\Phi \geq 0,05$).

All'aumentare dello scorrimento, la tensione tangenziale raggiunge un picco e poi inizia a decrescere, ma rimane comunque elevata fino a valori $\tau = (0,15 \div 0,3)f_{ct}$, dopo di che l'aderenza è garantita solamente dall'attrito, in quanto il calcestruzzo tra le nervature è frantumato e non esercita più alcuna resistenza.

- *STAGE IVc*: nel caso di barre deformate ben confinate, le fessure non si propagano fino in superficie e il collasso avviene per pull-out, ovvero la barra viene estratta senza rottura globale del calcestruzzo. Il meccanismo di trasferimento della forza passa dall'ingranamento meccanico tra le nervature e il calcestruzzo, a puro attrito, e sotto continuo carico l'interfaccia barra-calcestruzzo si leviga man mano portando ad ulteriori decrementi di aderenza.

4.3. Descrizione del fenomeno dell'aderenza per le barre in FRP

L'aderenza tra barre in FRP e calcestruzzo è una chiave fondamentale per comprendere al meglio l'azione composita di strutture rinforzate o armate in FRP. Deve essere mobilitata una certa aderenza tra la barra e il calcestruzzo per trasferire gli sforzi da un corpo all'altro.

Poiché il materiale composito è anisotropo, in direzione longitudinale le proprietà meccaniche sono governate da quelle delle fibre, mentre trasversalmente dalla resina. La matrice presenta in genere resistenze più basse di quella a compressione del calcestruzzo, cosicché il meccanismo di aderenza è diverso da quello sviluppato dalle tradizionali barre in acciaio. L'aderenza dipende poi anche da altri parametri, che vedremo in seguito, e di cui vi è una profonda trattazione nel "*fib bulletin 10*" [12].

Per le barre in FRP con superficie indeformata (barre lisce), i risultati sperimentali disponibili in letteratura hanno mostrato che il meccanismo di aderenza si sviluppa soltanto in due fasi: adesione (prima fase) e attrito (seconda fase). Non c'è nessun contributo dovuto all'ingranamento meccanico e la resistenza ad aderenza è quasi indipendente dalla resistenza del calcestruzzo. Qui la formazione di fessure trasversali e longitudinali nel calcestruzzo è altamente improbabile, per cui il collasso può avvenire solamente per pull-out.

L'attrito sembra la maggiore sorgente di resistenza allo sfilamento per le barre lisce, poiché l'adesione si perde appena si verifica lo scorrimento relativo tra barra e calcestruzzo. Inoltre, alcune prove di laboratorio hanno dimostrato che questa componente di attrito dipende essenzialmente dalla qualità della resina, e dalla differente rugosità superficiale.

Per queste barre l'aderenza è normalmente molto bassa e prove sperimentali hanno mostrato grandi variabilità tra le diverse fibre utilizzate, per cui vengono di solito utilizzate con opportuni sistemi di ancoraggio alle estremità.

Per quanto riguarda le barre deformate, l'aderenza tra barra e calcestruzzo viene descritta da un legame costitutivo, che lega la tensione tangenziale e lo

scorrimento, più complesso, facilmente costruibile con una prova di pull-out, in cui una barra annegata in un blocco di calcestruzzo viene sottoposta ad una forza di trazione.

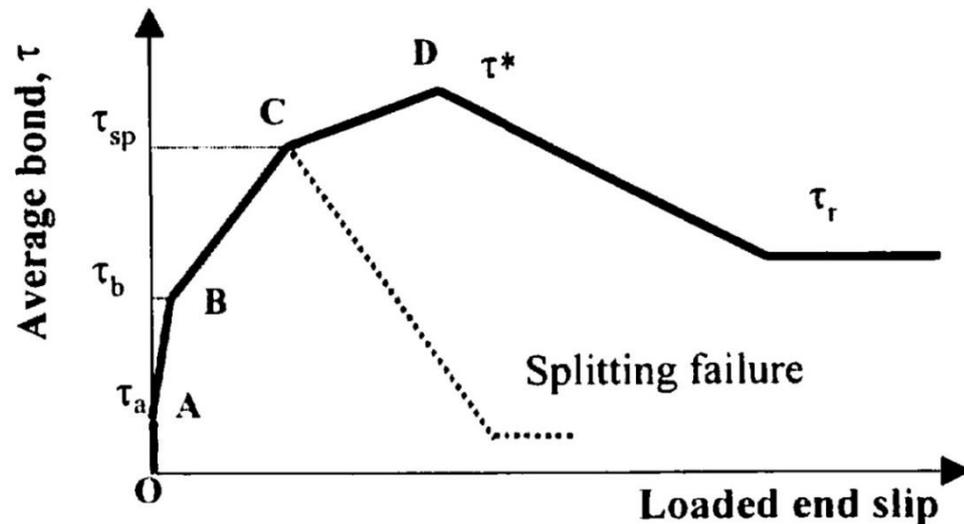


Figura 36. Legame delle tensioni di aderenza-scorrimento per le barre in FRP

Il legame costitutivo, come è possibile vedere nella Figura sopra, è riconducibile a sei fasi diverse:

- *SEZIONE OA*: all'inizio del carico, il principale meccanismo che si impone al carico esterno è l'adesione chimica tra i due materiali, e non è scorgibile alcun scorrimento.
- *SEZIONE AB*: dopo un certo incremento di carico l'adesione chimica si rompe e il meccanismo di aderenza cambia. Lo scorrimento nella parte terminale della barra caricata cresce gradualmente e le nervature della barra sviluppano tensioni di compressione dovute alla reazione contro il calcestruzzo circostante, provocando delle tensioni circonferenziali nel conglomerato stesso. Quando queste tensioni circonferenziali aumentano iniziano a manifestarsi le prime microfessurazioni a monte delle nervature della barra, causando piccoli scorrimenti tra i due

materiali. Tuttavia, per il fatto che le nervature della barra in FRP sono meno rigide rispetto a quelle delle barre in acciaio, l'inizio delle microfessure è leggermente ritardato. Tepfers (1997) [20] infatti constatò che il comportamento in questa fase della barra in FRP è migliore rispetto a quello delle barre in acciaio.

- *SEZIONE BC*: in questa fase, le tensioni di compressione generate dalle nervature della barra nel calcestruzzo circostante crescono considerabilmente, così come lo scorrimento della barra. La direzione principale di queste tensioni di compressione forma un angolo α con la direzione della barra, che dipende principalmente dal valore del modulo elastico della barra e dalla resistenza a taglio del calcestruzzo. La componente radiale della pressione è equilibrata dall'anello di calcestruzzo circostante.

La resistenza alla fessurazione del calcestruzzo (*splitting resistance*) circostante la barra è decisiva in questa fase. Come per le barre in acciaio, il confinamento prodotto da un elevato copriferro, staffe o pressioni esterne, ha grande influenza nella fessurazione.

Se la barra non è adeguatamente confinata e il valore delle tensioni circonferenziali eccede quello della resistenza massima a trazione del calcestruzzo, le fessurazioni longitudinali si propagano fino in superficie e lo scorrimento tra barra e calcestruzzo aumenta considerevolmente fino al collasso per splitting. Il momento del collasso avviene in funzione della geometria dell'elemento di calcestruzzo e della direzione delle fessure.

- *SEZIONE CD*: se al contrario c'è una sufficiente resistenza alla fessurazione, dovuta ad un buon confinamento, come ad esempio nei test di pull-out che vedremo successivamente, la tensione tangenziale può raggiungere il massimo valore τ^* . In questa fase, sia la parte caricata sia la parte terminale della barra scorrono e la "rigidezza" di aderenza va man mano a diminuire.

Qui, a differenza delle barre in acciaio, sono possibili quattro modi di collasso, in funzione della resistenza del calcestruzzo e delle nervature delle barre:

- *Collasso dovuto alla rottura delle nervature della barra* – l'aderenza in questo caso non è più controllata dalla resistenza del calcestruzzo, ma è governata o dalla resistenza a taglio interlaminare tra i livelli delle fibre della barra, o dalla resistenza a taglio delle nervature, e quindi, diversamente dalle barre in acciaio, ad un incremento della resistenza del calcestruzzo non è accompagnato un grosso miglioramento di aderenza. Questo tipo di collasso produrrà il più alto valore di resistenza tangenziale.
 - *Collasso per taglio dei denti di calcestruzzo* – avviene un collasso molto simile a quello che avviene per le barre in acciaio (pull-out). Qui il calcestruzzo tra le nervature della barra viene frantumato. Per cui in questo tipo di collasso l'aderenza è governata dalla resistenza a taglio del calcestruzzo.
 - *Collasso per "squeeze through"* – ovvero, la barra in FRP, quando ha una bassa rigidità in direzione radiale, può essere compressa (schiacciata) nel momento in cui sta per essere estratta, dai puntoni di calcestruzzo tra le nervature. Qui l'aderenza è fornita dall'attrito tra la barra nervata e il calcestruzzo circostante, ed è un collasso più "duttile" rispetto agli altri. Il massimo valore di tensione tangenziale sviluppato è in funzione della geometria delle nervature, della rigidità radiale e del confinamento fornito.
 - *Collasso combinato* – il collasso può avvenire attraverso un modo combinato dei collassi appena descritti.
- *SEZIONE DE:* dopo il raggiungimento del picco di tensione tangenziale τ^* , il meccanismo di compressione delle bielle di calcestruzzo tra le nervature della barra collassa e le tensioni tangenziali decrescono

considerabilmente. L'aderenza residua è garantita dal solo contributo dell'attrito tra barra e calcestruzzo τ_t , e dipende quindi dalla rugosità dell'interfaccia di scorrimento.

4.4. Principali variabili da cui dipende il fenomeno dell'aderenza

Il comportamento dell'aderenza per le barre in acciaio dipende da molti fattori che influenzeranno poi l'ancoraggio delle barre nel calcestruzzo. Questi parametri sono pressoché gli stessi che riguardano anche le barre in FRP, ma porteranno ad effetti diversi, in quanto il materiale composito è caratterizzato da una forte anisotropia e proprietà meccaniche differenti da quelle dell'acciaio.

Una corretta valutazione dell'influenza di questi fattori sullo sviluppo dell'aderenza è cruciale per capire a fondo il comportamento di questa, e per determinare la lunghezza d'ancoraggio richiesta.

I più importanti di questi parametri, facendo riferimento alle barre in FRP, vengono presentati di seguito:

- *Sezione della barra:* la forma della sezione trasversale della barra infatti determina l'area di aderenza. È riportato in letteratura [12] che le barre a sezione quadrata sviluppano una forza di aderenza maggiore rispetto a quelle circolari in condizioni di buon confinamento. Questo è dovuto alla loro sezione tagliente che migliora l'effetto incastro, e quindi l'aderenza. Tuttavia, rispetto alle barre a sezione circolare, quelle a superficie piana possono provocare un aumento delle fessure longitudinali da splitting, e quando queste si verificano, lo scorrimento aumenta.
- *Superficie della barra:* la deformazione delle barre (nervate, intrecciate, intagliate, attorcigliate, ..) è importante per sviluppare

l'ancoraggio meccanico e mobilitare la pressione laterale. Come descritto nel precedente capitolo, le nervature della barra possono essere composte da resina soltanto, da resina rinforzata con fibre corte o con fibre continue. Piccole, ma dense deformazioni superficiali portano ad avere un'ottima aderenza per carichi di modesta entità, ma per carichi elevati la barra rischia di essere sfilata per la deformazione dovuta all'effetto Poisson. Per evitare questo tipo di problema, Malvar (1995) suggerì di adottare delle deformazioni di superficie del 5,4% del diametro della barra, al fine di garantire un buon comportamento della barra nel calcestruzzo. Incrementare poi la larghezza delle nervature porta ad un miglioramento notevole della resistenza a taglio di queste, e a favorire quindi il collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo e non delle nervature stesse. Le dimensioni e inclinazioni delle deformazioni superficiali, non solo determinano la qualità dell'incastro meccanico, ma anche l'intensità delle forze da splitting. Per esempio, sebbene le barre con grandi nervature forniscano un'elevata aderenza nel caso di buon confinamento, possono causare, in condizioni di minor confinamento, maggiori fessurazioni longitudinali e quindi un collasso per splitting fornendo così minori valori di tensioni tangenziali rispetto alle barre lisce sabbiate. La ruvidezza della barra è un altro aspetto che influenza la resistenza alla fessurazione del calcestruzzo. Le superfici più ruvide mostrano una maggiore resistenza alla fessurazione rispetto alle barre con superficie più liscia, soprattutto per le barre con rivestimento epossidico.

- *Modulo elastico della barra in direzione assiale:* il modulo elastico della barra svolge un ruolo importante nella manifestazione delle fessure per splitting; infatti, la deformabilità del composito determina la geometria di queste, lo spazio e la loro ampiezza e, di conseguenza, influenza il trasferimento delle forze di taglio al calcestruzzo. Questi fattori furono dimostrati analiticamente e si evidenziò una maggior tendenza allo splitting per le barre con modulo elastico più basso (es.

4. L'ADERENZA DELLE BARRE IN FRP NEL CALCESTRUZZO

GFRP, $E=45\text{GPa}$), con quindi una minore forza di aderenza, rispetto alle barre con modulo elastico maggiore (es. CFRP, $E=115\text{GPa}$).

- *Modulo elastico della barra in direzione trasversale:* questo può influenzare notevolmente la formazione delle fessurazioni nel calcestruzzo. Tepfers (1997) [20] osservò che per alcune barre in FRP la resistenza alla fessurazione era maggiore rispetto alle barre in acciaio: questo probabilmente è dovuto al fatto che queste barre presentano un modulo elastico in direzione trasversale simile o inferiore a quello del calcestruzzo. Dal momento che le barre in FRP sono più compressibili rispetto a quelle in acciaio, le deformazioni trasversali permettono di non creare concentrazioni di sforzi intensi come le barre in acciaio. Per questo, le barre in FRP mostrano una minore tendenza alla propagazione delle fessure longitudinali rispetto alle barre in acciaio.
- *Posizione della barra durante il getto:* l'effetto della posizione della barra durante il getto del calcestruzzo è stato studiato da Rossetti et al. (1995) [18].

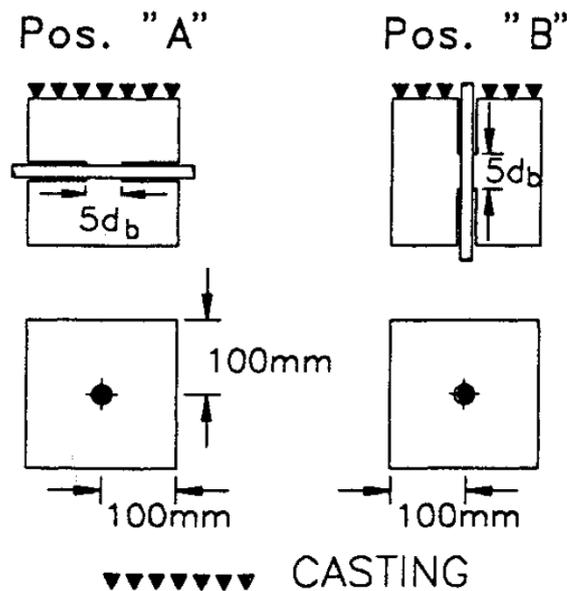


Figura 37. Posizione della barra in FRP durante il getto

I risultati evidenziano una minore aderenza (circa 1,5÷2 volte) per le barre perpendicolari al getto (posizione A), probabilmente per effetto dell'essudazione (*bleeding*) e della segregazione del calcestruzzo.

- *Resistenza del calcestruzzo:* risultati sperimentali hanno dimostrato che la resistenza del calcestruzzo circostante la barra è direttamente correlata alla modalità in cui avviene il collasso. Infatti, come è stato descritto in precedenza, la resistenza a taglio del calcestruzzo può essere minore o maggiore della resistenza al taglio delle nervature delle barre deformate, causandone la rottura dei denti di calcestruzzo o la rottura delle nervature, definendone così il tipo di collasso.
- *Confinamento del calcestruzzo:* il confinamento prodotto da armature trasversali (staffe), pressioni laterali o da un elevato spessore di copriferro, induce un significativo aumento dell'aderenza della barra nel calcestruzzo. Rispetto alle barre d'acciaio però, si ha una minor efficienza del confinamento, probabilmente perché la pressione di confinamento applicato viene in parte dissipata dalle deformazioni trasversali della barra, caratterizzata da un modulo elastico trasversale minore. Si è constatato poi, che più è elevato il confinamento, più l'aderenza dipende dall'indice di aderenza della barra.
- *Diametro della barra:* anche questo parametro gioca un ruolo molto importante nel comportamento dell'aderenza delle barre in FRP nel calcestruzzo. È noto in letteratura che, a parità di condizioni, diametri di barre maggiori portano a minori forze di aderenza. Questo perché le barre in FRP possiedono una bassa rigidezza al taglio, anche in direzione assiale, dovuta alla bassa rigidezza della resina che le compone e alla capacità di resistenza a taglio dell'interfaccia resina-fibra. Quando la barra viene messa in tensione attraverso la superficie infatti ci può essere un movimento differenziale tra il nucleo della barra e la superficie stessa, che porta ad una non uniforme distribuzione dello sforzo normale nella sezione della barra, come è mostrato in Figura:

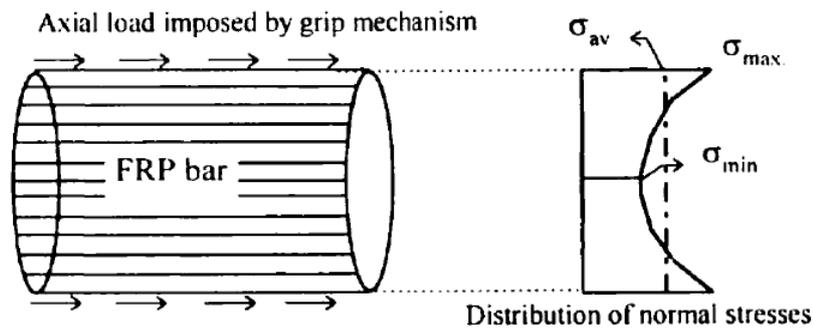


Figura 38. Distribuzione delle tensioni normali in una barra in FRP sottoposta ad un carico assiale

Con l'aumentare del diametro, aumenta anche la differenza tra σ_{max} e σ_{min} , causando così una minor aderenza. Questo problema si verifica anche nelle barre in acciaio, ma decisamente con minor conseguenze, per l'elevata resistenza al taglio.

- *Lunghezza della barra immersa nel calcestruzzo:* come riporta Cosenza (1997) [9], risultati sperimentali hanno mostrato una maggior aderenza per le barre in FRP nei provini in cui la lunghezza del tratto di barra immersa nel cubetto di calcestruzzo era minore.
- *Variazioni di temperatura:* per quanto riguarda l'effetto delle variazioni termiche sulla resistenza allo sfilamento di barre in FRP, si è visto in risultati sperimentali [9] che si sviluppa una resistenza molto più bassa dell'aderenza quando la temperatura Δt tra maturazione e prova si riduce rispetto a quando la si incrementa. Questo effetto è dovuto alla contrazione o espansione della barra, causata rispettivamente dalla riduzione o dall'incremento di temperatura. Poiché la variazione di volume nella barra influenza significativamente la pressione radiale e la componente attritiva del meccanismo di aderenza, il coefficiente di espansione termica è un parametro importante per l'aderenza delle barre in FRP. Inoltre alte temperature hanno un notevole effetto negativo sull'aderenza, probabilmente a

causa di una riduzione della rigidità tagliente della matrice di resina.

- *Condizioni ambientali:* un altro effetto significativo sull'aderenza è quello delle condizioni ambientali. Dopo numerosi cicli di gelo e disgelo, infatti, potrebbe avvenire il degrado della resina, con conseguente riduzione di resistenza e rigidità del legame di aderenza. Inoltre l'assorbimento di acqua porta ad una deteriorazione della barra, causandone un calo sia della resistenza a trazione sia del modulo elastico. Anche l'ambiente altamente alcalino del calcestruzzo può provocare danni alla barra, soprattutto in condizioni di caldo e umidità.

4.5. Il fenomeno dell'aderenza: differenza tra barre in acciaio e barre in FRP

Le differenze dell'aderenza con il calcestruzzo tra barre in acciaio e barre in FRP sono state già accennate nei vari capitoli di questa tesi, ma è utile riportare sinteticamente quali sono i punti fondamentali in cui si differenziano i due comportamenti.

Poiché il materiale composito è anisotropo, in direzione longitudinale le proprietà meccaniche sono governate da quelle delle fibre, mentre trasversalmente dalla resina. La matrice di resina presenta resistenze in genere più basse di quella a compressione del calcestruzzo, cosicché il meccanismo di aderenza è diverso da quello sviluppato dalle tradizionali barre in acciaio. Infatti qui, come accennato in precedenza, potrebbe avvenire il collasso delle nervature della barra in FRP piuttosto che quello dei denti di calcestruzzo come accade sicuramente nel caso di barre in acciaio, in cui abbiamo un materiale omogeneo ed isotropo, e la resistenza delle nervature è molto più elevata. Inoltre, per il fatto che la rigidità delle nervature delle barre in FRP è minore rispetto a quelle delle barre in acciaio, le microfessure nel calcestruzzo iniziano a manifestarsi più tardi, e si ha quindi un miglior comportamento della fase iniziale dell'aderenza.

La differenza del legame costitutivo, tra il comportamento elastico fino a

rottura del materiale composito e il comportamento elasto-plastico dell'acciaio, può portare ad un'altra difformità nell'aderenza, a causa dello snervamento che può avvenire nella barra in acciaio. Un altro aspetto importante è la rigidità in direzione trasversale alla barra, in quanto dal momento che le barre in FRP sono più compressibili rispetto a quelle in acciaio, le deformazioni trasversali permettono di non creare concentrazioni di sforzi intensi come le barre in acciaio. Per questo, le barre in FRP mostrano una minore tendenza alla propagazione delle fessure longitudinali rispetto alle barre in acciaio.

Rispetto alle barre d'acciaio poi, si ha una minor efficienza del confinamento, probabilmente perché la pressione di confinamento applicata viene in parte dissipata dalle deformazioni trasversali della barra, caratterizzata da un modulo elastico trasversale minore.

Per quanto riguarda il calcestruzzo poi, come è descritto in Cosenza et al (1997) [9], si è visto da dati sperimentali che l'aderenza per le barre in FRP è simile per diverse classi di calcestruzzi, e non varia linearmente con la radice quadrata della resistenza a compressione del conglomerato, come succede nel caso della barra in acciaio. Questa difformità è probabilmente dovuta alle deformazioni superficiali della barra in FRP, che non reagiscono rigidamente come le nervature in acciaio.

Infine, alcune differenze nel comportamento si possono avere in condizioni estreme di temperature, in quanto l'acciaio mantiene costante le sue caratteristiche fino a temperature ben più alte rispetto a quelle che possono sopportare le barre in FRP.

4.6. Modelli proposti in letteratura per descrivere l'aderenza

Per eseguire un'analisi numerica sul comportamento dell'aderenza barra - calcestruzzo è necessario un modello analitico del legame costitutivo tensione tangenziale di aderenza – scorrimento (*bond - slip*).

Nel seguito sono descritti i principali modelli analitici più noti, uno per le barre in acciaio, e tre per le barre in FRP.

4.6.1. Modello di Eligehausen, Popov, Bertero (BPE Model - 1983): barre in acciaio

Eligehausen et al (1983) [11] proposero un modello analitico per descrivere l'aderenza delle barre nervate in acciaio nel calcestruzzo.

Questo modello analitico è tuttora quello più accreditato, ed è riportato dettagliatamente, con qualche aggiornamento, nel CEB-FIB Model Code 2010 [28].

Per un carico monotono, le tensioni tangenziali di aderenza tra barra e calcestruzzo possono essere determinate in funzione degli scorrimenti relativi tra barra e calcestruzzo (s) attraverso le seguenti equazioni:

$$- \tau(s) = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha \quad \text{per } 0 \leq s \leq s_1 \quad (4.4)$$

$$- \tau(s) = \tau_{max} \quad \text{per } s_1 \leq s \leq s_2 \quad (4.5)$$

$$- \tau(s) = \tau_{max} (\tau_{max} - \tau_f) \left(\frac{s-s_2}{s_3-s_2} \right) \quad \text{per } s_2 \leq s \leq s_3 \quad (4.6)$$

$$- \tau(s) = \tau_f \quad \text{per } s_3 < s \quad (4.7)$$

in cui τ_{max} e τ_f sono il picco di tensione tangenziale e la tensione tangenziale finale, s_1 , s_2 , s_3 , sono gli scorrimenti a cui corrispondono il raggiungimento della massima tensione tangenziale, la fine del tratto orizzontale ad aderenza costante, e l'inizio del secondo tratto orizzontale a seguito di un decremento di

tensione tangenziale.

La formulazione analitica è quindi costituita da quattro (o men nel caso di collasso per *splitting*) curve, come è possibile vedere in Figura:

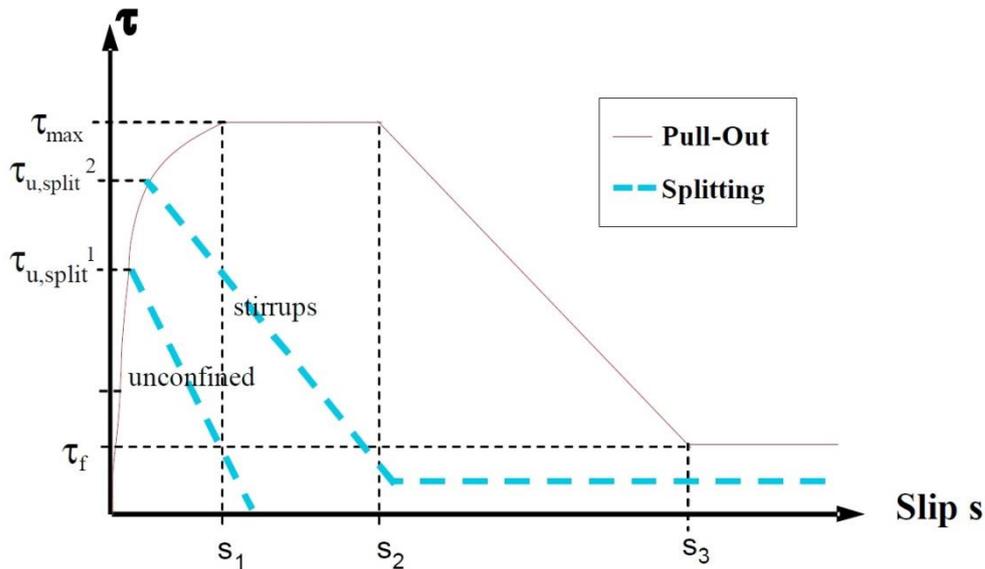


Figura 39. Relazione analitica tensione tangenziale-scorrimento (carico monotono)

La prima parte della curva rappresenta la fase di adesione chimica ed ingranamento meccanico, in cui le nervature spingono contro i denti di calcestruzzo fino alle prime micro-fessurazioni. La parte orizzontale, a tensione tangenziale costante, si verifica solo nel caso di calcestruzzo confinato (rottura per *pull-out*), e rappresenta la rottura dei denti di calcestruzzo. Questo tratto è fortemente influenzato dal livello di confinamento. Il terzo ramo invece, ha andamento lineare decrescente, ed è giustificata dalla continua riduzione di aderenza dovuta all'aumentare delle fessurazioni nel calcestruzzo. Infine il tratto a tensioni costanti rappresenta l'aderenza manifestata per puro attrito.

Il parametro α invece, serve per modellare il primo tratto della curva di aderenza, e potrebbe variare tra 0 e 1. Quando $\alpha=0$ infatti si ha un comportamento costante della tensione tangenziale, mentre con $\alpha=1$ si ha un comportamento lineare.

I parametri sopra citati sono tutti stati determinati sperimentalmente, e sono riportati nella seguente Tabella:

4. L'ADERENZA DELLE BARRE IN FRP NEL CALCESTRUZZO

	1	2	3	4	5	6
	Pull-Out (PO)		Splitting (SP)			
	$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$		$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$			
	Good bond cond.	All other bond cond.	Good bond cond.		All other bond cond.	
			unconfined	stirrups	unconfined	stirrups
τ_{max}	$2.5\sqrt{f_{ck}}$	$1.25\sqrt{f_{ck}}$	$7.0 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0.25}$	$8.0 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0.25}$	$5.0 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0.25}$	$5.5 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0.25}$
s_1	1.0mm	1.8mm	$s(\tau_{max})$	$s(\tau_{max})$	$s(\tau_{max})$	$s(\tau_{max})$
s_2	2.0mm	3.6mm	s_1	s_1	s_1	s_1
s_3	$c_{clear}^{1)}$	$c_{clear}^{1)}$	$1.2s_1$	$0.5c_{clear}^{1)}$	$1.2s_1$	$0.5c_{clear}^{1)}$
α	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
τ_f	$0.40\tau_{max}$	$0.40\tau_{max}$	0	$0.4\tau_{max}$	0	$0.4\tau_{max}$

¹⁾ distanza media tra le nervature

I valori nelle prime due colonne sono validi per calcestruzzo ben confinato (almeno con un copriferro di spessore di 5 volte il diametro della barra, al fine di avere una rottura per pull-out).

I valori delle altre colonne invece sono validi per calcestruzzo dotato di staffe e calcestruzzo non confinato.

4.6.2. Modello di Malvar (1994): barre in FRP

Una delle prime modellazioni del fenomeno dell'aderenza del calcestruzzo rinforzato con barre in FRP fu eseguita da Malvar (1994) [17], che effettuò una serie di sperimentazioni sulle barre in fibra di vetro caratterizzate da differenti pressioni di confinamento, forme e superfici esterne:

- *Tipo A*: barra GFRP deformata, applicando un cavo elicoidale sulla superficie esterna
- *Tipo B*: barra GFRP deformata, con superficie indentata
- *Tipo C*: barra GFRP deformata, con superficie avvolta da una spirale incollata
- *Tipo D*: barra GFRP deformata, con superficie indentata e coperta da un velo protettivo

Malvar propose un modello per la determinazione del legame di aderenza con un'unica curva, in funzione di due costanti empiriche, espresso nella seguente forma:

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{F(s/s_m) + (G-1)(s/s_m)^2}{1 + (F-2)(s/s_m) + G(s/s_m)^2} \quad (4.8)$$

dove τ_m e s_m rappresentano la tensione tangenziale massima di aderenza e lo scorrimento a cui corrisponde.

Le costanti F e G possono essere determinate per ogni tipo di barra, attraverso il processo di "curve fitting", ovvero estrapolandole dalla curva sperimentale. Tuttavia Malvar propose alcuni valori delle due costanti, validi specificatamente per le tipologie di barra A e D:

- F=11 per barre in FRP con superficie del tipo A
- F=13 per barre in FRP con superficie del tipo D
- G=1,2 per barre in FRP con superficie del tipo A
- G=0,5 per barre in FRP con superficie del tipo D

I valori di τ_m e s_m devono essere determinati dai risultati sperimentali, o in alternativa si può avere una stima di tali parametri con:

$$\frac{\tau_m}{f_t} = A + B(1 - \exp\{-C\sigma/f_t\}) \quad , \quad s_m = D + EB\sigma \quad (4.9)$$

dove σ è la pressione di confinamento radiale assialsimmetrica, f_t è la resistenza a trazione del calcestruzzo e A, B, C, D, E sono cinque costanti empiriche, determinate da Malvar, per le quattro tipologie di barra.

4.6.3. Modello di Cosenza, Manfredi, Realfonzo (CMR Model - 1995): barre in FRP

Subito dopo Malvar, Cosenza et al (1995) [7] proposero un modello alternativo, che riguarda però solamente il primo tratto, il ramo crescente.

Il modello è definito secondo l'espressione:

$$\frac{\tau}{\tau_m} = (1 - \exp\{-s/s_r\})^\beta \quad (4.10)$$

dove τ_m rappresenta la tensione tangenziale massima di aderenza, e β e s_r sono due parametri determinabili dal *curve-fitting* sui dati sperimentali.

Il parametro s_r ha le dimensioni di una lunghezza, ma non rappresenta lo scorrimento al picco della tensione tangenziale, e presenta valori inferiori ad esso.

È possibile osservare che il CMR Model presenta una pendenza iniziale tendente ad infinito per scorrimento nullo ($s=0$), consentendo così di riprodurre abbastanza bene il fenomeno fisico dell'adesione. La stessa proprietà la presenta anche il BPE Model, mentre un comportamento diverso lo mostra il modello di Malvar, che per uno scorrimento nullo fornisce un valore finito, pari a $F \tau_m / s_m$.

Il CMR Model descrive soltanto il ramo ascendente della curva di aderenza, ma rispetto a tutti gli altri modelli, mostra i risultati più soddisfacenti [9]. Per questo motivo è il più adatto a modellare l'aderenza allo stato limite d'esercizio.

**4.6.4. Variazione del modello BPE (Modified BPE Model - 1996):
barre in FRP**

Per diversi anni la relazione di Bertero, Eligehausen e Popov (B.E.P. Model), proposta per i rinforzi con barre in acciaio, fu estesa anche alle barre in FRP. Cosenza et al (1996) [8] proposero un modello alternativo, modificando leggermente il modello BPE.

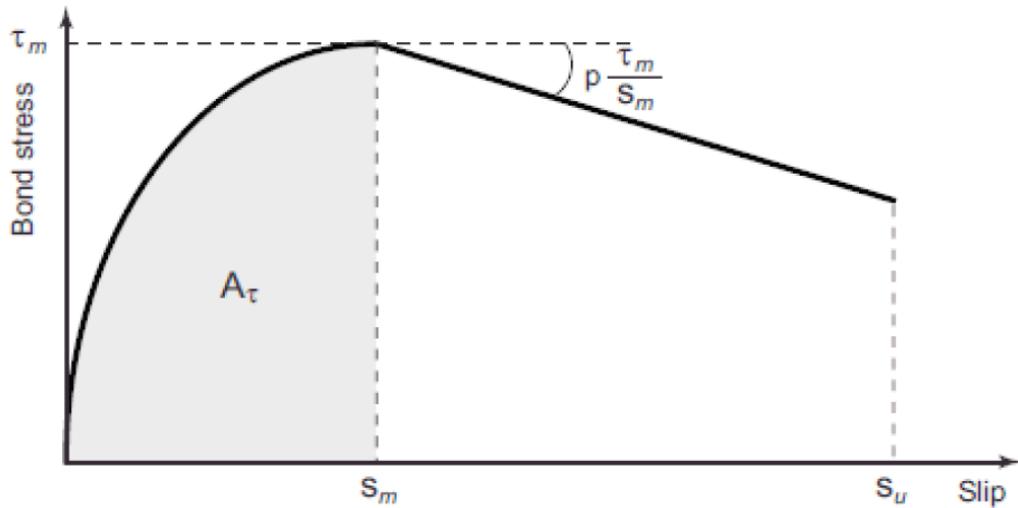


Figura 40. Modified BPE Model

La modifica, come si può vedere dalla Figura, riguarda soprattutto il secondo ramo, quello orizzontale a τ costante; si notò da risultati sperimentali che non era presente questo tratto, per cui si decise di ometterlo.

Il Modified BPE Model, presenta lo stesso tratto ascendente del BPE Model, ovvero

$$\tau(s) = \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^\alpha \quad \text{per} \quad 0 \leq s \leq s_m \quad (4.11)$$

Dopo di questo si ha subito un ramo di “softening”, avente pendenza $p \cdot \tau_m / s_m$, dato dalla relazione:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_m} = 1 - p \left(\frac{s}{s_m} - 1 \right) \quad \text{per} \quad s_m \leq s \leq s_u \quad (4.12)$$

Anche qui τ_m e s_m rappresentano la tensione tangenziale massima di aderenza e lo scorrimento a cui corrisponde.

Il parametro α , che determina la forma del ramo ascendente, può essere determinato dall'equazione dell'area sottesa in questo tratto:

$$A_\tau = \int_0^{s_m} \tau(s) ds = \frac{\tau_m s_m}{1+\alpha} \quad (4.13)$$

Da cui:

$$\alpha = \frac{\tau_m s_m}{A_\tau} - 1 \quad (4.14)$$

Il parametro p , può essere determinato con la stessa filosofia, oppure con il metodo del *curve-fitting* sui dati sperimentali.

Questo modello è quello ufficiale adottato nel CEB-FIB Model Code 2010 [28].

5. INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI

Questo capitolo è interamente dedicato alle prove sperimentali che analizzano il fenomeno dell'aderenza di barre in FRP nel calcestruzzo.

Il legame costitutivo tensione tangenziale - scorrimento dell'aderenza può essere definito attraverso la prova di pull-out, che consiste nell'estrazione di una barra dal provino di calcestruzzo in cui è annegata, che può essere posizionata al centro del volume di calcestruzzo (*pull-out test*) o decentrata in corrispondenza di un lato del cubetto (*splitting test*).

5.1. Pull-Out Test - Normativa

La prova pull-out con barra in posizione centrale nel blocco di calcestruzzo in cui è immersa, è utilizzata, come già anticipato, per determinare il legame tensioni tangenziali-scorrimenti (*local bond-slip*) tra la barra e il calcestruzzo circostante. In questa prova l'azione confinante del calcestruzzo sopprime il rischio di propagazione delle fessure fino in superficie, ed in conseguenza, il collasso per splitting.

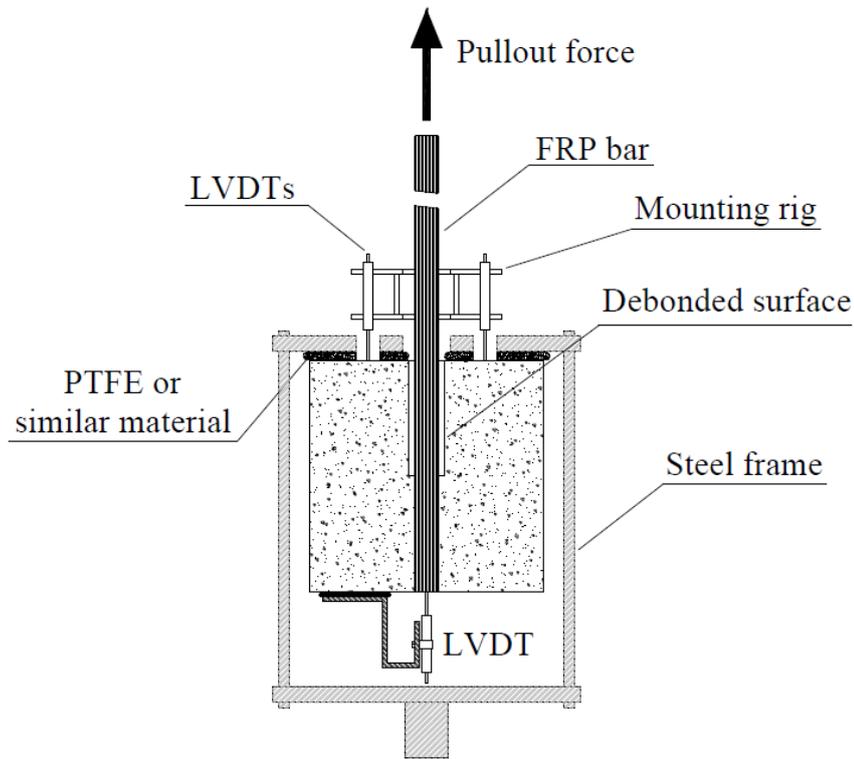


Figura 41. Pull-Out Test Set-Up

In Figura si può osservare il set-up di prova.

La preparazione dei provini e le prove sono state eseguite secondo le *Linee guida* [16] pubblicate dalla rete di ricerca del “ConFibreCrete” insieme al *fib* TG 9.3 e all’ “ISIS Canada”, utilizzate per i test del *Round Robin*. Queste linee guida, per quanto riguarda la prova con barra centrata, sono in accordo con quelle dell’ ACI 440.3R-04 [22], “*Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*”.

La posizione della barra, la misura del lato del cubo di calcestruzzo e della parte di barra annegata sono rappresentate in Figura:

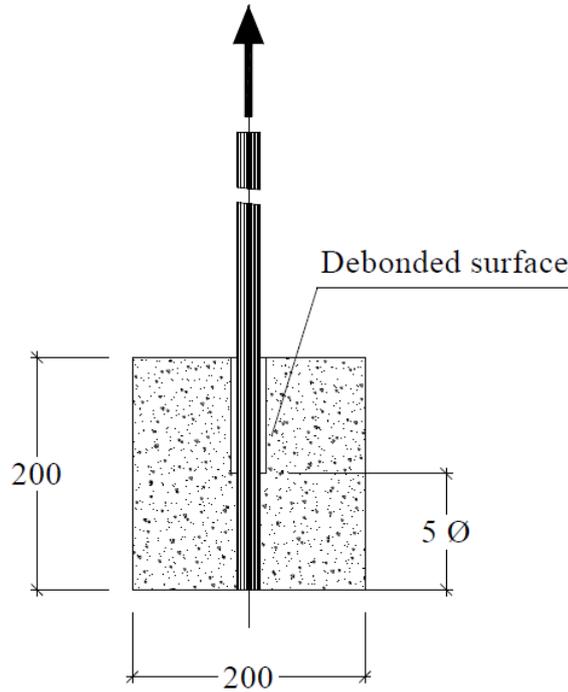


Figura 42. Posizione della barra nel Pull-Out Test

Il lato del cubo di calcestruzzo è 20cm e la parte di barra a contatto con esso è lunga cinque volte il diametro della barra.

Per quanto riguarda la misurazione degli spostamenti, la posizione dei sensori LVDT nella parte superiore del calcestruzzo, ovvero il lato che appoggia sulla lastra di contrasto (“*at the top*”) può essere di due tipologie con, in entrambi i casi, distanza di 5 cm tra il sensore e la barra:

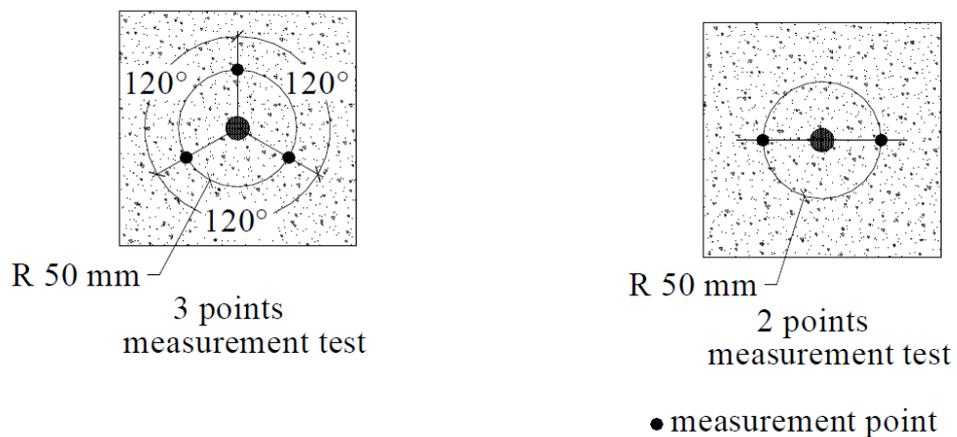


Figura 43. Posizione dei sensori LVDT sulla faccia superiore del provino

Mentre nella parte inferiore (“*at the end*”):

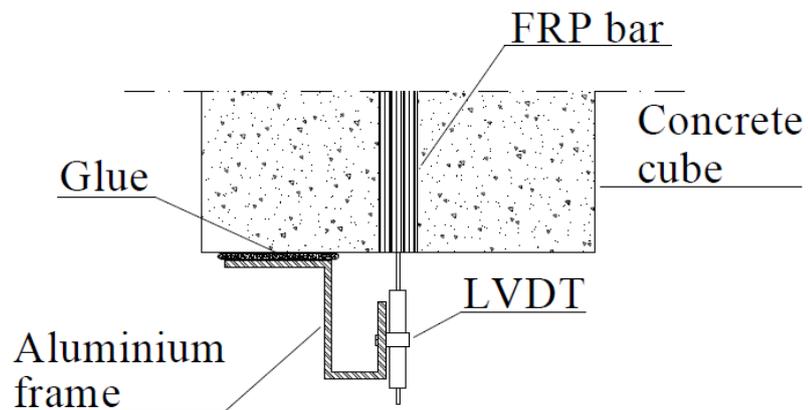


Figura 44. Posizione dei sensori LVDT sulla faccia inferiore del provino

La tensione tangenziale di aderenza deve essere calcolata con la seguente formula (equilibrio alla traslazione orizzontale):

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l} \quad (6.1)$$

dove

τ è la tensione tangenziale di aderenza [MPa]

F è la forza di trazione applicata dalla macchina [N]

C_b è la circonferenza della barra [mm]

l è la lunghezza della barra a contatto con il calcestruzzo [mm]

5.2. Splitting Test - Normativa

La prova pull-out con barra in posizione decentrata, è molto utile per stimare l'aderenza di una barra in condizioni di scarso copriferro. Lo scopo di questa prova è quello di far propagare le fessurazioni longitudinali fino in superficie e causare quindi un collasso per splitting. La prova si esegue esattamente come la prova pull-out con barra centrata, utilizzando la medesima strumentazione. La posizione della barra e le misure dei lati del prisma di calcestruzzo sono rappresentate in Figura:

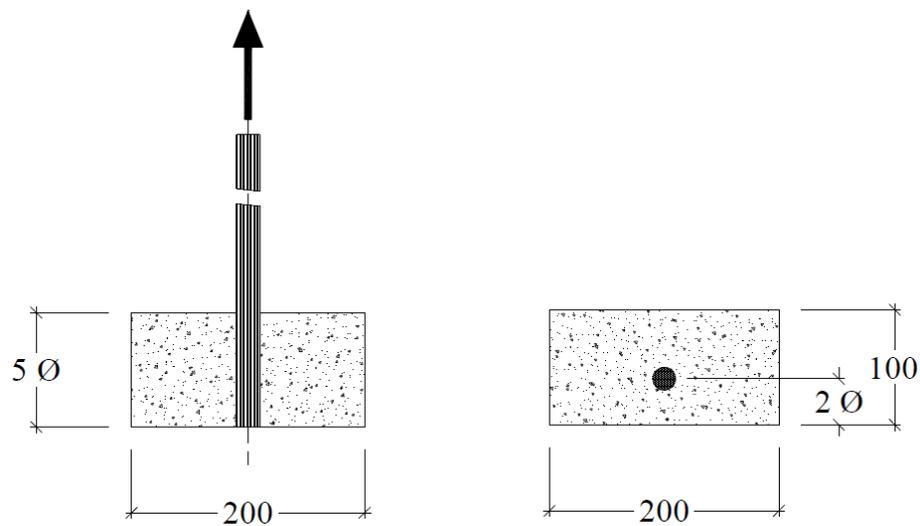


Figura 45. Posizione della barra nello Splitting Test

Le dimensioni del prisma di calcestruzzo sono 20cm x 10cm x 5Φ , dove Φ è il diametro della barra. La distanza della barra da un lato del prisma deve essere due volte il diametro della barra.

La preparazione dei provini e le prove sono state eseguite secondo le *Linee guida* [16].

La posizione dei sensori LVDT nella parte superiore del calcestruzzo è:

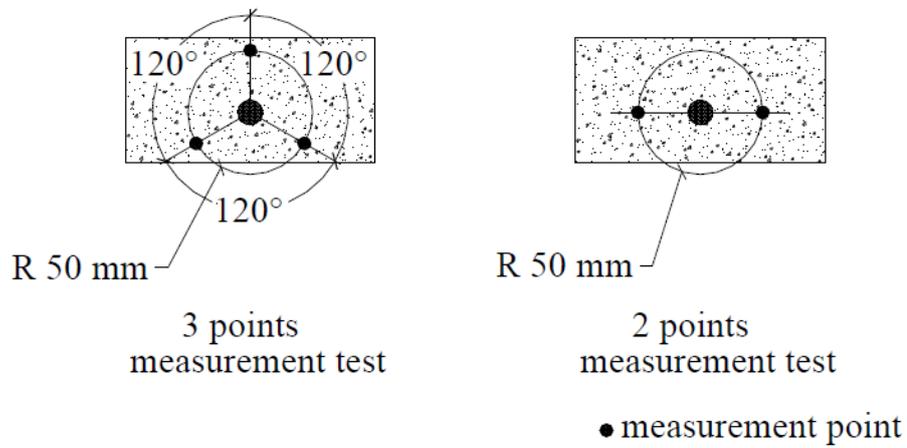


Figura 46. Posizione dei sensori LVDT sulla faccia superiore del provino

Mentre la posizione dei sensori LVDT nella parte inferiore è la stessa della prova pull-out. Anche qui la tensione tangenziale di aderenza si determina con l'equazione di equilibrio 6.1.

5.3. Materiali utilizzati

In questo paragrafo vengono descritti i materiali utilizzati e il confezionamento dei provini.

5.3.1. Calcestruzzo

Per le prove sono stati effettuati due distinti *Mix design* di calcestruzzo, uno con resistenza caratteristica a compressione cubica $R_{ck}=35$ Mpa (CLS1), e l'altro con resistenza $R_{ck}=25$ Mpa (CLS2). Le composizioni delle due tipologie di calcestruzzo sono indicate in Tabella:

Componenti Calcestruzzo	Dosaggio CLS 1 [Kg/m ³]	%	Dosaggio CLS 2 [Kg/m ³]	%
<i>Inerti Misti (0-14mm)</i>	1683	70	1778	74
<i>Acqua</i>	240	10	240	10
<i>Cemento II/A-LL 42,5 R</i>	477	20	382	16

I rapporti acqua/cemento delle due composizioni sono:

- CLS 1 → $a/c=0,50$
- CLS 2 → $a/c=0,63$

Le resistenze caratteristiche del calcestruzzo sono state determinate il giorno della prova su appositi cubetti 15x15x15, due per ogni getto, con prove di compressione seguendo la normativa UNI EN 12390.

Data Confezionamento	Data di prova	Carico massimo (KN)	R_{cm} [MPa]	Denominazione
03/09/2014	17/09/2014	643,5	28,6	CLS2
04/09/2014	18/09/2014	839,3	37,3	CLS1
05/09/2014	19/09/2014	828	36,8	CLS1
06/09/2014	22/09/2014	859,2	38,2	CLS1

In allegato sono presenti le schede tecniche del cemento e degli inerti utilizzati.

5.3.2. Barre

Sono state utilizzate diverse tipologie di barre, tutte di lunghezza 50 cm:

- Barre in acciaio:
 - Barre lisce con diametro $\Phi=10\text{mm}$
 - Barre ad aderenza migliorata con diametro $\Phi=10\text{mm}$
 - Barre ad aderenza migliorata con diametro $\Phi=12\text{mm}$



Figura 47. Barre in acciaio: lisce $\Phi 10$, nervate $\Phi 10$, nervate $\Phi 12$

Sono state utilizzate barre tonde lisce in acciaio FeB32k, caratterizzato da una tensione a rottura di 490 N/mm^2 , da una tensione di snervamento di 315 N/mm^2 e da un allungamento di rottura non inferiore al 23%.

Per quanto riguarda invece le barre ad aderenza migliorata (nervate) è stato utilizzato l'acciaio B450C (acciaio laminato a caldo), caratterizzato da una tensione a rottura di 540 N/mm^2 , da una tensione a snervamento di 450 N/mm^2 e da un allungamento totale a carico massimo non inferiore al 7%.

La superficie della barra ad aderenza migliorata presenta due facce, e la

geometria delle nervature è osservabile in Figura:

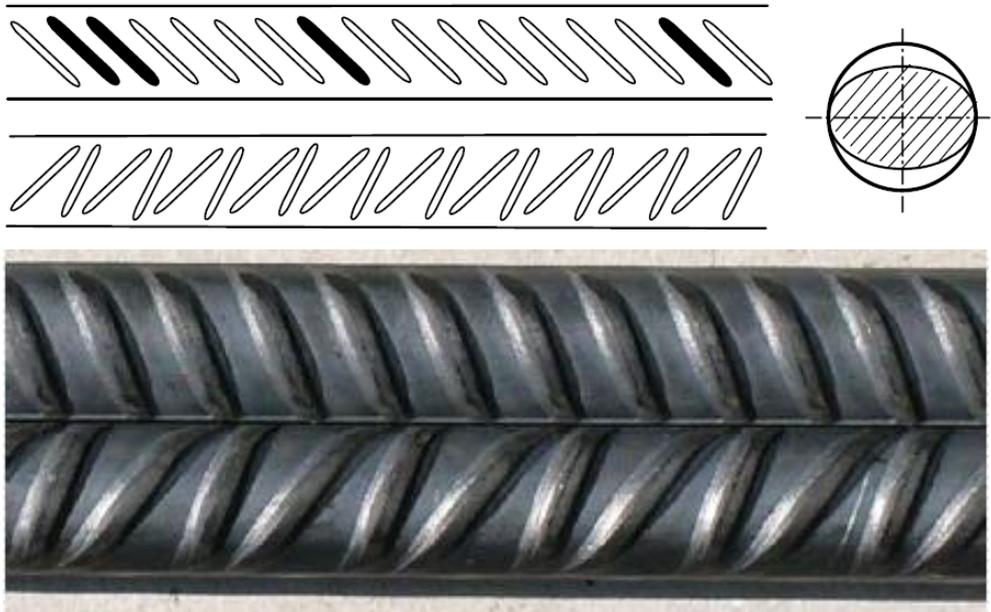


Figura 48. Geometria della nervatura della barra in acciaio

- Barre pultruse in fibra di carbonio a matrice epossidica:
 - Barre lisce con diametro $\Phi=10\text{mm}$
 - Barre ad aderenza migliorata con diametro $\Phi=10\text{mm}$
 - Barre ad aderenza migliorata con diametro $\Phi=14\text{mm}$

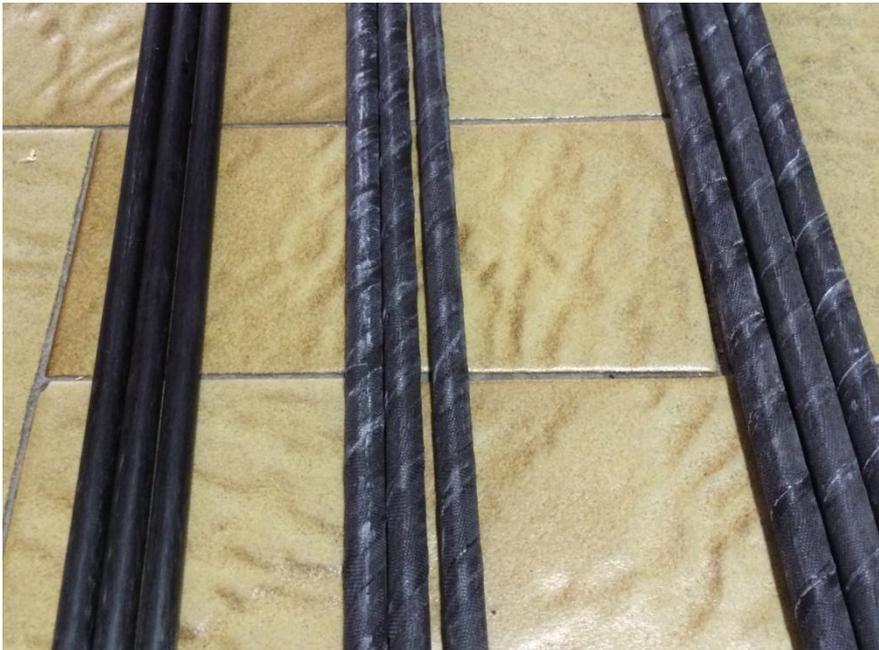


Figura 49. Barre in fibra di carbonio: lisce $\Phi 10$, nervate $\Phi 10$, nervate $\Phi 12$

Nelle barre ad aderenza migliorata in fibra di carbonio, fornite dall'azienda "SEICO COMPOSITI s.r.l.", la deformazione superficiale è realizzata da filamenti di carbonio avvolti elicoidalmente alla barra stessa. In più la formazione della barra in assenza di sostanze distaccanti rende la superficie leggermente ruvida.

5. INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA DI PROVA SPERIMENTALI



Figura 50. Deformazione delle barre in fibra di carbonio

Le caratteristiche geometriche e tecniche delle barre in fibra di carbonio sono riportate nel seguente prospetto:

CARATTERISTICHE FILATO														
N° filamenti			Resistenza a trazione			Modulo elastico			Densità (gr/cm ³)			Allungamento %		
Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12
24K	24K	24K	MPa 4200	MPa 4200	MPa 4200	GPa 234	GPa 234	GPa 234	1,8	1,8	1,8	2,0	2,0	2,0

DIMENSIONI PRODOTTO							
CARATTERISTICHE FONDAMENTALI	UNITA' DI MISURA	TONDO LISCIO			TONDO CON ADERENZA MIGLIORATA		
		Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12
Diametro tondo (D)	mm	8	10	12	8	10	12
Area nominale (A)	mm ²	50,2	78,5	113	50,2	78,5	113
Perimetro nominale (P)	mm	25,1	31,4	37,7	25,1	31,4	37,7

CARATTERISTICHE TEORICHE PRODOTTO							
PROPRIETÀ PRODOTTO	UNITA' DI MISURA	TONDO LISCIO			TONDO CON ADERENZA MIGLIORATA		
		Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12
Modulo di elasticità normale a trazione (E)	GPa	152	152	152	98	98	98
Resistenza alla trazione (f _v)	MPa	2590	2590	2590	1680	1680	1680
Deformazione a rottura (ε _v)	%	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Tensione di rottura (F _v)	KN	130	203	293	84	132	190
Contenuto fibra (V _{FB})	mm ²	32,6	51	73,5	25,1	32,6	73,5

Figura 51. Caratteristiche geometriche e tecniche delle barre in fibra di carbonio

In allegato è presente la scheda tecnica delle barre utilizzate.

5.4. Confezionamento dei provini

I getti sono stati eseguiti impiegando casseforme in legno pretrattate con liquido disarmante; il getto del calcestruzzo è stato effettuato in direzione parallela alle barre, ed è stato diviso in quattro livelli e costipato con circa 25 colpi, utilizzando una barra del diametro di circa 16 mm, in accordo con la normativa [22].

Sono stati effettuati tre provini per ogni tipologia di prova prevista, per tener conto della variabilità dei materiali e possibili errori grossolani e/o casuali.

Le barre sono state tenute in verticale grazie ad un foro nel legno del cassero inferiore, e un foro nel piccolo telaio in legno, come è possibile vedere nelle immagini:



Figura 52. Casseforme in legno e posizionamento delle barre



Figura 53. Casseforme in legno e posizionamento delle barre

5. INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA DI PROVA SPERIMENTALI

Sono stati utilizzati poi dei tubi in PVC per isolare la parte della barra che non deve essere a contatto con il calcestruzzo. Per stabilizzarli e non fare entrare calcestruzzo nel tubo, è stata utilizzata della plastilina:



Figura 54. Isolamento della parte superiore della barra con tubo in PVC

Ultimato il getto è stata coperta la superficie dei cubetti con della pellicola trasparente, in modo da evitare rapide essiccazioni e ritiri nella parte superiore dei provini. Questi sono stati scasserati a distanza di 24 ore dal getto, e tenuti in un ambiente a temperatura di 23 ± 3 , per 14 giorni prima di effettuare le prove. Inoltre, sempre per limitare il fenomeno dell'essiccazione e del ritiro, nei primi giorni successivi alla scasserazione, i provini sono stati leggermente bagnati. Vediamo ora nel dettaglio il programma del confezionamento eseguito.

5.4.1. 1° Confezionamento - 03/09/2014

Sono state utilizzate le barre nervate in acciaio e in carbonio con diametro di 10mm, e il calcestruzzo CLS2 con resistenza caratteristica $R_{ck}=35$ Mpa. Sono stati gettati 3 cubetti per ogni tipologia di barra e 2 cubetti (in cubiere di polistirolo) per le prove di compressione.



Figura 55. 1° Confezionamento – barre nervate Φ10 CLS2



Figura 56. 1° Confezionamento – barre nervate $\Phi 10$ CLS2: costipamento e cubetti di prova



Figura 57. 1° Confezionamento: costipamento dei cubetti di prova

5.4.2. 2° Confezionamento - 04/09/2014

Sono state utilizzate le barre nervate in acciaio e in carbonio con diametro di 10mm, e il calcestruzzo CLS1 con resistenza caratteristica $R_{ck}=25$ Mpa.

Sono stati gettati 3 cubetti per ogni tipologia di barra e 2 cubetti (in cubiere di polistirolo) per le prove di compressione.



Figura 58. 2° Confezionamento– barre nervate $\Phi 10$ CLS1



Figura 59. 2° Confezionamento – barre nervate $\Phi 10$ CLS2

5.4.3. 3° Confezionamento - 05/09/2014

Sono state utilizzate le barre lisce in acciaio e in carbonio con diametro di 10mm, e il calcestruzzo CLS1 con resistenza caratteristica $R_{ck}=25$ Mpa. Sono stati gettati 3 cubetti per ogni tipologia di barra e 2 cubetti (in cubiere di polistirolo) per le prove di compressione.



Figura 60. 3° Confezionamento – barre lisce $\Phi 10$ CLS2

5.4.4. 4° Confezionamento - 06/09/2014

Sono state utilizzate le barre nervate in acciaio e in carbonio con diametro di 12mm per le prove di pull-out, barre nervate in acciaio e in carbonio con diametro di 10mm per le prove di splitting, e il calcestruzzo CLS1 con resistenza caratteristica $R_{ck}=25$ Mpa.

Sono stati gettati 3 cubetti per ogni tipologia di barra (da 12mm di diametro) per la prova pull-out, 3 prismi per ogni tipologia di barra (da 10mm di diametro) per la prova per splitting, e 2 cubetti (in cubiere di polistirolo) per le prove di compressione.



Figura 61. 4° Confezionamento – barre nervate $\Phi 10$ CLS2 per prismi (splitting)



Figura 62. 4° Confezionamento – barre nervate $\Phi 12$ CLS2 per cubetti (pull-out) e barre nervate $\Phi 10$ CLS2 per prismi (splitting)

5.5. Strumentazione di prova

La strumentazione necessaria per eseguire la prova pull-out comprende:

- *Macchina di prova:*

Macchina universale GALDABINI a controllo elettrico - Portata 100KN. Questa macchina permette di estrarre la barra dal blocco di calcestruzzo, applicando un incremento di spostamento o di forza. Permette inoltre di misurare il carico applicato attraverso una cella di carico.



Figura 63. Macchina di prova

- *Misura degli spostamenti:*

LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) – trasduttore di spostamento. È un dispositivo in grado di misurare lo spostamento di un punto prestabilito. Sono stati utilizzati tre trasduttori di spostamento

di due tipologie, due a variazione di induttanza e uno a variazione di resistenza, mostrati in figura:



Figura 64. LVDT a variazione di induttanza WA10



Figura 65. Trasduttore di spostamento a variazione di resistenza CE5

Il trasduttore di spostamento a variazione di resistenza utilizzato ha una corsa di ± 5 mm, ed è stato applicato nella parte terminale della barra annegata nel calcestruzzo, per rilevare lo scorrimento “*at the end*” della barra.

Esso poi viene collegato rigidamente al calcestruzzo tramite un elemento metallico a L, o triangolare, fissato con della colla al provino in corrispondenza del punto del quale si vuole misurare lo spostamento. Lo spostamento della sonda viene trasformato in una variazione di potenziale elettrico che può essere rilevata dal sistema d’acquisizione.

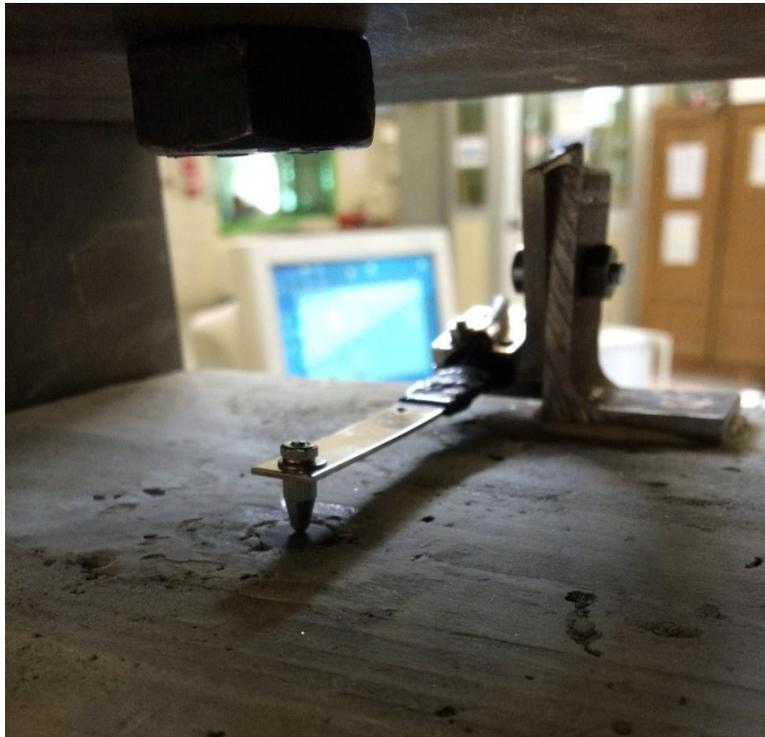


Figura 66. Posizionamento TdS "at the end"

I due sensori LVDT ad induzione utilizzati invece hanno una corsa di 10 mm, e sono stati posizionati lungo la barra fuoriuscente dal provino tramite un supporto metallico, in modo da rilevare lo scorrimento tra la barra e il calcestruzzo nella parte inferiore del cubetto. In questo caso viene sfruttata l’induzione elettromagnetica, e di fatto essi non sono nient’altro che dei trasformatori a nucleo mobile. Vengono quindi

prodotti dei segnali elettrici che possono essere rilevati dal sistema d'acquisizione.

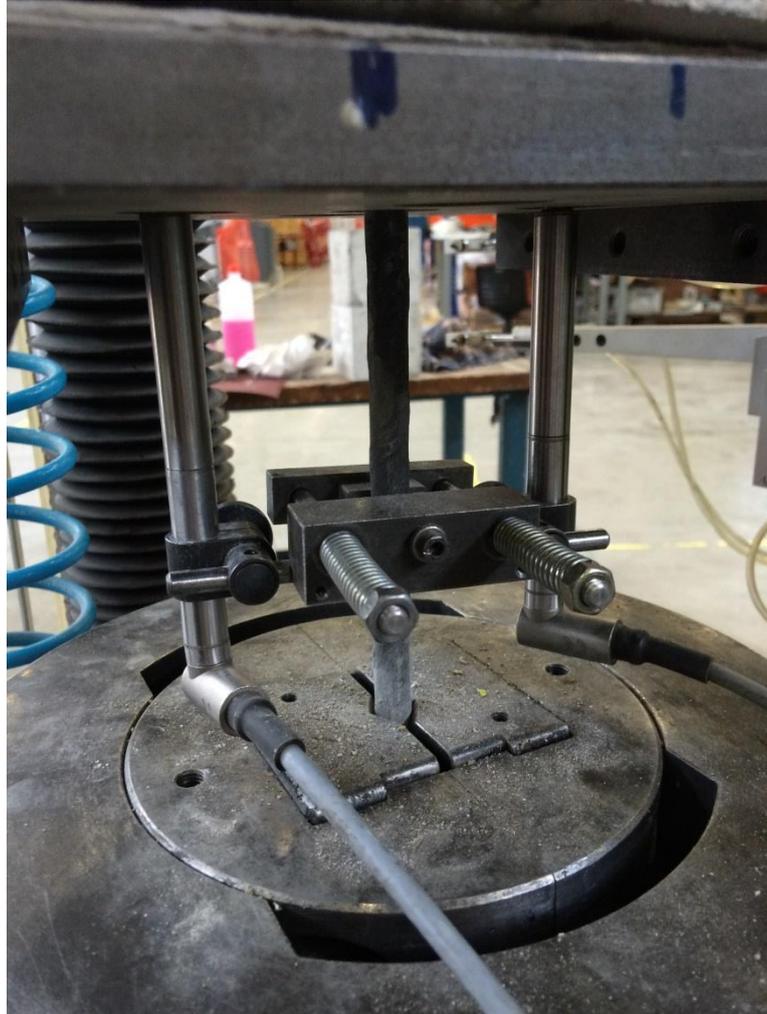


Figura 67. Posizionamento LVDT nella parte inferiore

- *Sistema di acquisizione:*

L'acquisizione dei risultati è avvenuta collegando tutti gli strumenti ad un sistema gestito attraverso un software LabView, realizzato appositamente per questa tipologia di prova, che ha permesso di acquisire dati ad intervalli di tempo regolari.

I canali utilizzati per l'acquisizione dei dati sono i seguenti:

- CH 0 → Cella di carico Galdabini
- CH 1 → LVDT WA10
- CH 2 → LVDT WA10
- CH 3 → LVDT CE5



Figura 68. Sistema di acquisizione

6. ESECUZIONE DELLE PROVE

In questo capitolo viene riportata la descrizione delle prove di Pull-Out e di Splitting eseguite nel laboratorio LISG, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna, sui provini mostrati nelle immagini:



Figura 69. Provini



Figura 70. Provini e dettagli delle estremità del cubo di calcestruzzo

Prima delle esecuzioni delle prove sono state levigate con la pietra pomice le superfici dei provini che andranno a contatto con la piastra di contrasto per limitare problemi di planarità locali del calcestruzzo. Sono stati inoltre tagliati a filo i tratti delle barre che fuoriuscivano dal lato posteriore del calcestruzzo, al fine di tener conto dello scorrimento della sola parte di barra annegata nel calcestruzzo.

6. ESECUZIONE DELLE PROVE

Per eseguire la prova, il cubetto di calcestruzzo è stato messo all'interno di un telaio in acciaio collegato alla macchina di prova, come rappresentato in Figura:

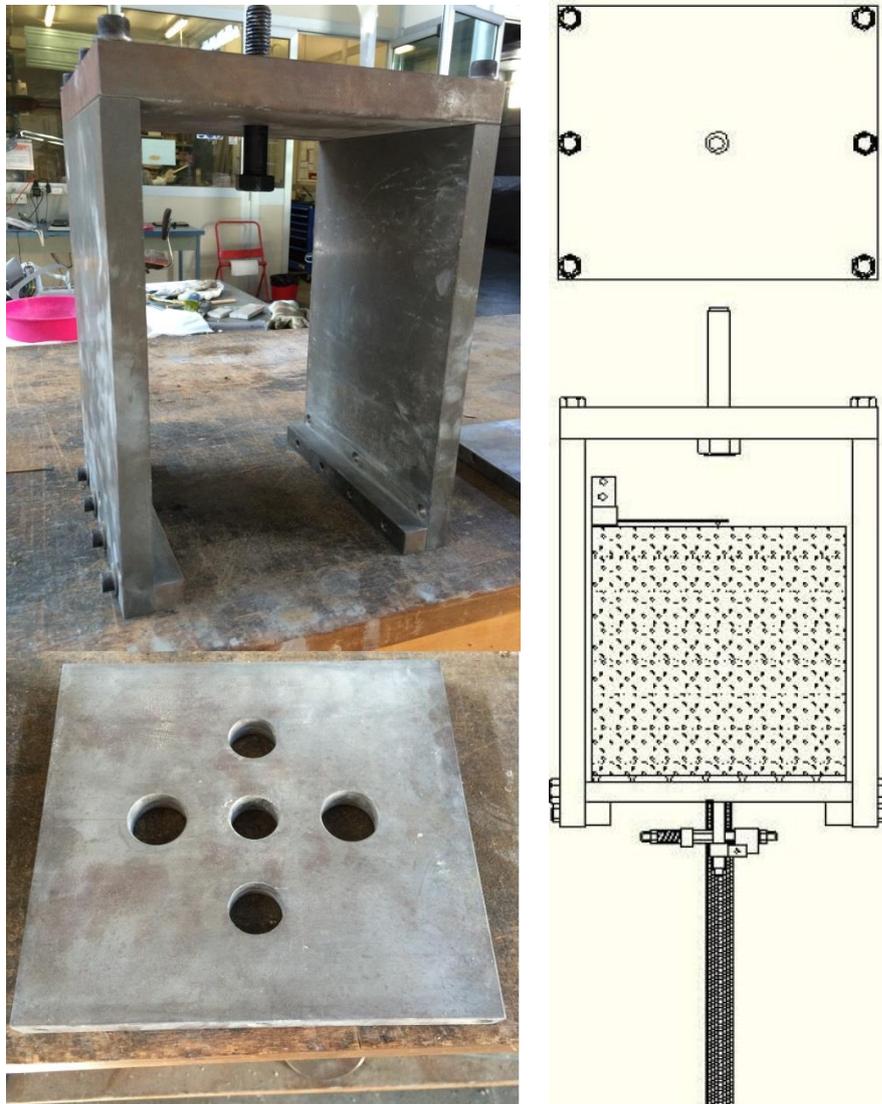


Figura 71. Telaio in acciaio collegato alla macchina di prova

6.1. Barre nervate $\phi 10$ Acciaio – CLS2 (P1C2BAN10)

La prova di Pull-Out su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 25MPa e con le barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm, è stata eseguita il giorno 17/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 74. Prova P1C2BAN10 – 17/09/14

Per limitare ulteriormente problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo, è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 75. Dettaglio inferiore prova PIC2BAN10 – 17/09/14



Figura 76. Prova PIC2BAN10 – 17/09/14



Figura 77. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P1C2BAN10 – 17/09/14



Figura 78. Barra estratta prova P1C2BAN10 – 17/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento del carico di circa 10 daN/s, inferiore al limite di 33 daN/s riportato nella normativa [21], utilizzando una scala di carico massimo di 5000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Come si può vedere dalla Figura 78 la barra non ha riscontrato nessun danneggiamento superficiale, per cui è avvenuta sicuramente, come ci si aspettava per le barre in acciaio, la rottura dei denti di calcestruzzo posti tra le nervature della barra.

Non è stata riscontrata nessuna particolare anomalia durante la prova.

6.2. Barre nervate $\phi 10$ CFRP – CLS2 (P2C2BCN10)

La prova di Pull-Out su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 25MPa e con le barre pultruse in fibra di carbonio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm, è stata eseguita sempre il giorno 17/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 79. Prova P2C2BCN10 – 17/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo, è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 80. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P2C2BCN10 – 17/09/14



Figura 81. Barra estratta prova P2C2BCN10 – 17/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento del carico di circa 10 daN/s, inferiore al limite di 33 daN/s riportato nella normativa [21], utilizzando una scala di carico massimo di 5000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Come si può vedere dalla Figura 81 la barra non ha riscontrato nessun danneggiamento superficiale, per cui è avvenuta sicuramente la rottura dei denti di calcestruzzo posti tra le nervature della barra.

La barra pultrusa in fibra di carbonio, nonostante la scarsa rigidità in direzione trasversale, non ha avuto nessun problema nella zona afferrata dai morsetti della macchina di prova.

Non è stata riscontrata nessuna particolare anomalia durante la prova.

6.3. Barre nervate $\phi 10$ Acciaio – CLS1 (P3C1BAN10)

La prova di Pull-Out su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm, è stata eseguita il giorno 18/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 82. Prova P3C1BAN10 – 18/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo, è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 83. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P3C1BAN10 – 18/09/14



**Figura 84. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo lato inferiore prova P3C1BAN10 –
18/09/14**



Figura 85. Barra estratta prova P3C1BAN10 – 18/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento di carico di circa 10 daN/s, inferiore al limite di 33 daN/s riportato nella normativa [21], utilizzando una scala di carico massimo di 5000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Come si può vedere dalla Figura 85 la barra non ha riscontrato nessun danneggiamento superficiale, per cui è avvenuta sicuramente la rottura dei denti di calcestruzzo posti tra le nervature della barra.

Non è stata riscontrata nessuna particolare anomalia durante la prova.

6.4. Barre nervate $\phi 10$ CFRP – CLS1 (P4C1BCN10)

La prova di Pull-Out su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre pultruse in fibra di carbonio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm, è stata eseguita sempre il giorno 18/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 86. Prova P4C1BCN10 – 18/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo, è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 87. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P4C1BCN10 – 18/09/14



Figura 88. Barra estratta prova P4C1BCN10 – 18/09/14



Figura 89. Dettaglio della barra estratta: distacco del filamento in fibra di carbonio che avvolgeva la barra - prova P4C1BCN10 – 18/09/14



Figura 90. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo “at the end” prova P4C1BCN10 – 18/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento del carico di circa 10 daN/s, inferiore al limite di 33 daN/s riportato nella normativa [21], utilizzando una scala di carico massimo di 5000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Come si può vedere dalla Figura 89 la barra ha subito un danneggiamento superficiale nella zona in cui era annegata nel calcestruzzo. È avvenuta in questa prova quindi la rottura delle nervature della barra, a differenza delle precedenti prove nelle quali la rottura si presentava nel calcestruzzo.

Il filamento di carbonio che avvolgeva la barra è rimasto all'interno del provino di calcestruzzo.

Non è stata riscontrata nessun'altra particolare anomalia durante la prova.

6.5. Barre lisce $\phi 10$ Acciaio – CLS1 (P5C1BAL10)

La prova di Pull-Out su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre in acciaio lisce di diametro 10 mm, è stata eseguita il giorno 19/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 91. Prova P5C1BAL10 – 19/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo, è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 92. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P5C1BAL10 – 19/09/14



Figura 93. Barra estratta prova P5C1BAL10 – 19/09/14



Figura 94. Dettaglio della barra estratta prova P5C1BAL10 – 19/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento del carico di circa 10 daN/s, inferiore al limite di 33 daN/s riportato nella normativa [21], utilizzando una scala di carico massimo di 5000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Come si può vedere dalla Figura 94 la barra non ha riscontrato nessun danneggiamento superficiale, per cui dopo la perdita di adesione chimica barra-calcestruzzo è avvenuto il semplice scorrimento per attrito.

Non è stata riscontrata nessuna particolare anomalia durante la prova.

6.6. Barre lisce $\phi 10$ CFRP – CLS1 (P6C1BCL10)

La prova di Pull-Out su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre pultruse in fibra di carbonio lisce di diametro 10 mm, è stata eseguita il giorno 19/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 95. Prova P6C1BCL10 – 19/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo, è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.

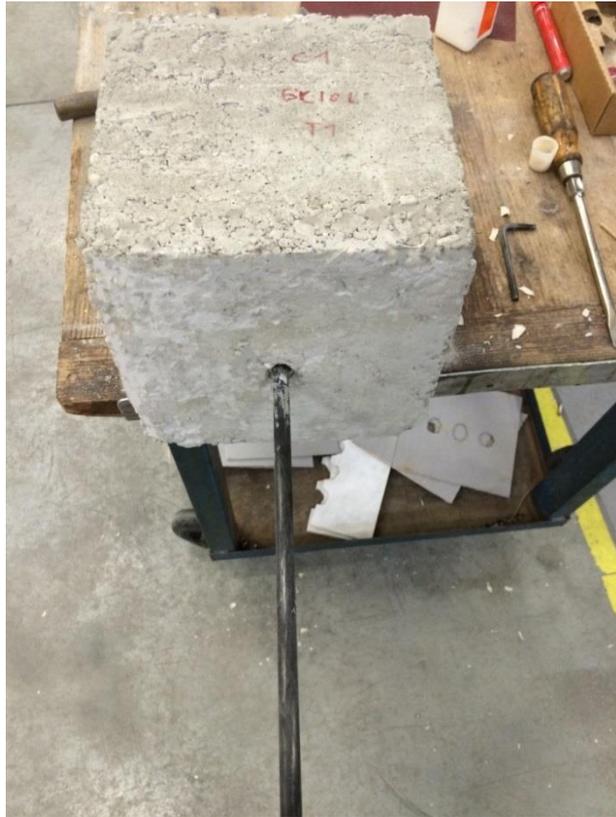


Figura 96. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P6C1BCL10 – 19/09/14



Figura 97. Barra estratta prova P6C1BCL10 – 19/09/14

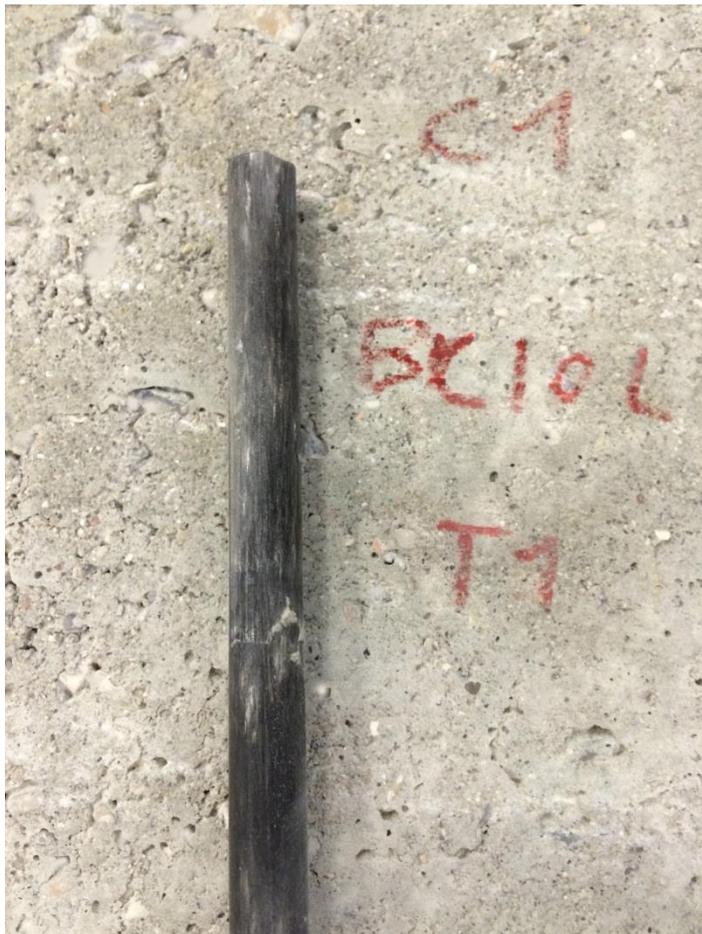


Figura 98. Dettaglio della barra estratta prova P6C1BCL10 – 19/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento del carico di circa 10 daN/s, inferiore al limite di 33 daN/s riportato nella normativa [21], utilizzando una scala di carico massimo di 5000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Anche in questa prova, come si può vedere dalla Figura 98, la barra non ha riscontrato nessun danneggiamento superficiale, per cui dopo la perdita di adesione chimica barra-calcestruzzo è avvenuto il semplice scorrimento per attrito.

Non è stata riscontrata nessuna particolare anomalia durante la prova.

6.7. Barre nervate $\phi 12$ Acciaio – CLS1 (P7C1BAN12)

La prova di Pull-Out su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 12 mm, è stata eseguita il giorno 22/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 99. Prova P7C1BAN12 – 22/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo, è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 100. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P7C1BAN12 – 22/09/14



Figura 101. Barra estratta prova P7C1BAN12 – 22/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento di carico di circa 10 daN/s, inferiore al limite di 33 daN/s riportato nella normativa [21], utilizzando una scala di carico massimo di 10000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Come si può vedere dalla Figura 101 la barra non ha riscontrato nessun danneggiamento superficiale, per cui è avvenuta la rottura dei denti di calcestruzzo posti tra le nervature della barra.

In questa prova c'è stata un'anomalia nella registrazione del carico oltre i 5000 daN. Probabilmente la causa è stato un errore nell'impostazione della scala di acquisizione, per cui per questa prova si dispone solo del carico massimo e non di tutto il legame costitutivo carico-spostamenti.

6.8. Barre nervate $\phi 12$ CFRP – CLS1 (P8C1BCN12)

La prova di Pull-Out su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre pultruse in fibra di carbonio ad aderenza migliorata di diametro 12 mm, è stata eseguita il giorno 22/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 102. Prova P8C1BCN12 – 22/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo, è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 103. Dettaglio scorrimento barra-calcestruzzo prova P8C1BCN12 – 22/09/14



Figura 104. Barra estratta prova P8C1BCN12 – 22/09/14



Figura 105. Dettaglio della barra estratta: distacco del filamento di fibra di carbonio che avvolgeva la barra e parti di questa attaccati al calcestruzzo - prova P8C1BCN12 – 22/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento del carico di circa 10 daN/s, inferiore al limite di 33 daN/s riportato nella normativa [21], utilizzando una scala di carico massimo di 5000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Come si può vedere dalla Figura 105 la barra ha subito un danneggiamento superficiale nella zona in cui era annegata nel calcestruzzo. È avvenuta in questa prova quindi la rottura delle nervature della barra.

Il filamento di carbonio che avvolgeva la barra è rimasto all'interno del provino di calcestruzzo.

Non è stata riscontrata nessun'altra particolare anomalia durante la prova.

**6.9. Barre nervate $\phi 10$ Acciaio – CLS1 (Split.)
(P9C1BAN10S)**

La prova di Pull-Out-Splitting su provini prismatici realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm, in posizione decentrata, è stata eseguita il giorno 22/09/2014. Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 106. Prova P9C1BAN10S – 22/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 107. Propagazione della fessurazione da Splitting Prova P9C1BAN10S – 22/09/14



Figura 108. Fessurazione da Splitting prova P9C1BAN10S – 22/09/14



Figura 109. Provino spaccato a metà: frantumazione dei denti di calcestruzzo P9C1BAN10S – 22/09/14



Figura 110. Propagazione fessure da Splitting prova P9C1BAN10S – 22/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento del carico di circa 10 daN/s, utilizzando una scala di carico massimo di 2000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Per il secondo e terzo test la prova ha dato i risultati che ci si aspettava, ovvero la propagazione delle fessure fino alla superficie del copriferro più vicino. Per il primo test invece, si ha avuto anche la contemporanea rottura del provino per flessione, causata dalla non perfetta planarità superficiale del provino.

Come si può vedere dalla Figura 109 è avvenuta in questa prova anche la rottura dei denti di calcestruzzo interposti tra le nervature della barra.

**6.10. Barre nervate $\phi 10$ CFRP – CLS1 (Split.)
(P10C1BCN10S)**

La prova di Pull-Out-Splitting su provini prismatici realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre pultruse in fibra di carbonio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm, in posizione decentrata, è stata eseguita il giorno 22/09/2014.

Riporto in seguito le immagini delle prove relative ai tre provini:



Figura 111. Prova P10C1BCN10S – 22/09/14

Per limitare problemi locali di planarità della superficie di calcestruzzo è stato utilizzato un cartoncino dello spessore di 3 mm posto tra il provino e la piastra di contrasto.



Figura 112. Propagazione delle fessure da Splitting - prova P10C1BCN10S – 22/09/14



Figura 113. Rottura provino per Splitting e dettaglio della barra estratta prova P10C1BCN10S – 22/09/14



Figura 114. Prova P10C1BCN10S – 22/09/14

La prova è stata eseguita con una velocità di incremento del carico di circa 10 daN/s, utilizzando una scala di carico massimo di 2000 daN. La velocità di acquisizione dei dati da parte degli LVDT è stata di circa due spostamenti al secondo.

Per il primo test la prova ha dato i risultati che ci si aspettava, ovvero la propagazione delle fessure fino alla superficie del copriferro più vicino, come si può vedere in Figura 112. In questa prova è avvenuto anche un leggero deterioramento della superficie della barra in fibra di carbonio (Figura 113). Per il secondo e terzo test invece, non è avvenuta la rottura del provino, ma lo sfilamento della barra, con una leggera fessurazione del calcestruzzo circostante la barra, come si può vedere in Figura 114.

6.11. Raccolta dei dati

La misura in sommità (*at the end*) dello spostamento è stata determinata convertendo il segnale elettrico (in *volt*) proveniente dal TdS-CE5 (LVDT 4) in una lunghezza (in *mm*) semplicemente attraverso una costante pari a 0,5052.

La misura invece dello spostamento inferiore della barra è determinato applicando una costante ai segnali elettrici (in *volt*) provenienti dai due LVDT (1 e 2) pari a 1, e facendo la media tra i due valori finali. A questo spostamento è stato poi sottratto lo spostamento dovuto alla deformazione longitudinale del tratto di barra tra la superficie del calcestruzzo, dove sono applicate le teste dei due LVDT, e il punto sulla barra dove sono stati agganciati quest'ultimi.

Il segnale elettrico proveniente dalla cella di carico invece, è stato convertito in N (*Newton*) attraverso la costante 20138 per le prove in scala 5000, 39997 per le prove in scala 10000, e 8009 per le prove in scala 2000.

Ai valori degli spostamenti e dei carichi sono stati sottratti tutti i valori di partenza.

In seguito sono riportati i risultati delle prove sperimentali condotte in laboratorio, con relativi diagrammi Carico-Spostamento, per ciascuno dei tre test di ogni prova. Nei diagrammi, la colonna di sinistra riporta i valori dei tre trasduttori di spostamento, mentre la colonna di destra lo scorrimento definitivo barra-calcestruzzo nella parte inferiore del provino.

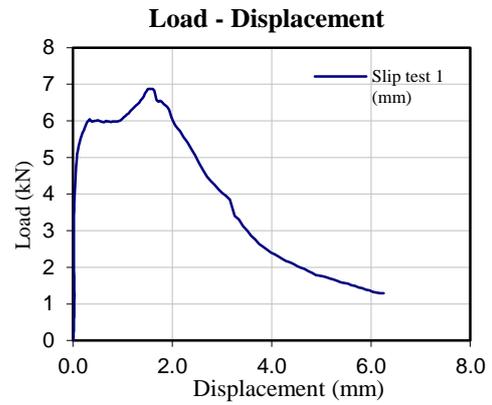
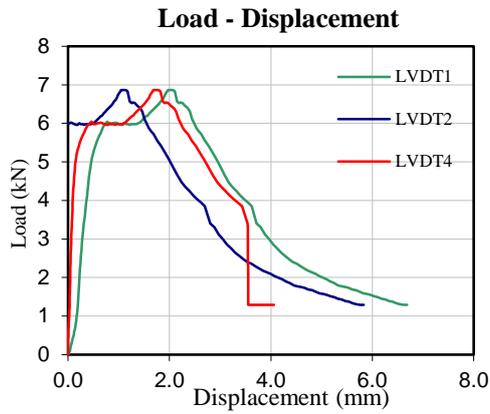
Nella prova P7, ovvero la prova su provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa (CLS1) e barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 12 mm, è stato riscontrato un problema di scala durante l'esecuzione della sperimentazione, per cui i diagrammi sono tagliati a quota 50KN, mentre i carichi massimi corretti sono riportati in Tabella:

6. ESECUZIONE DELLE PROVE

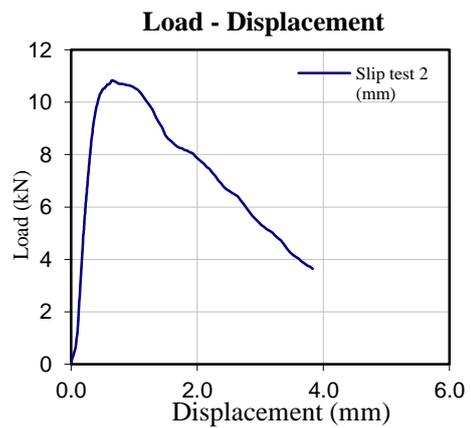
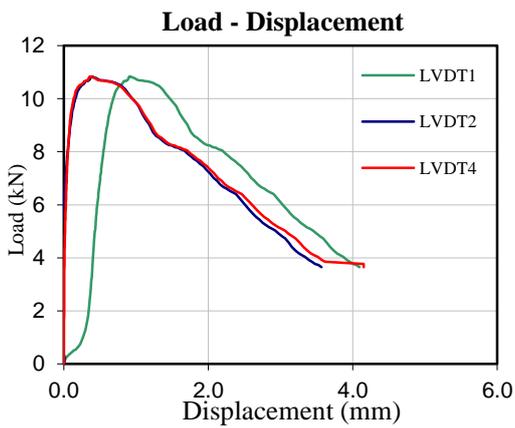
Prova	Tipologia di barra	φ [mm]	F_{max} [KN]	δ_{peak} [mm]	τ [Mpa]	Tipo di rottura
P1C2BAN10-T1	Barra nervata acciaio	10	6.867	1.596	4.372	PULL-OUT
P1C2BAN10-T2	Barra nervata acciaio	10	10.834	0.499	6.897	PULL-OUT
P1C2BAN10-T3	Barra nervata acciaio	10	7.250	1.222	4.615	PULL-OUT
P2C2BCN10-T1	Barra nervata CFRP	10	4.672	0.221	2.974	PULL-OUT
P2C2BCN10-T2	Barra nervata CFRP	10	5.558	4.205	3.538	PULL-OUT
P2C2BCN10-T3	Barra nervata CFRP	10	1.994	0.228	1.269	PULL-OUT
P3C1BAN10-T1	Barra nervata acciaio	10	36.591	1.086	23.294	PULL-OUT
P3C1BAN10-T2	Barra nervata acciaio	10	37.678	1.363	23.986	PULL-OUT
P3C1BAN10-T3	Barra nervata acciaio	10	33.670	1.045	21.435	PULL-OUT
P4C1BCN10-T1	Barra nervata CFRP	10	14.519	0.367	9.243	PULL-OUT
P4C1BCN10-T2	Barra nervata CFRP	10	12.767	3.721	8.128	PULL-OUT
P4C1BCN10-T3	Barra nervata CFRP	10	13.714	4.222	8.731	PULL-OUT
P5C1BAL10-T1	Barra liscia acciaio	10	2.467	0.169	1.570	PULL-OUT
P5C1BAL10-T2	Barra liscia acciaio	10	3.372	0.175	2.147	PULL-OUT
P5C1BAL10-T3	Barra liscia acciaio	10	0.649	0.127	0.413	PULL-OUT
P6C1BCL10-T1	Barra liscia CFRP	10	0.312	4.303	0.199	PULL-OUT
P6C1BCL10-T2	Barra liscia CFRP	10	0.481	0.337	0.306	PULL-OUT
P6C1BCL10-T3	Barra liscia CFRP	10	0.432	1.049	0.275	PULL-OUT
P7C1BAN12-T1	Barra nervata acciaio	12	58.271	-	25.761	PULL-OUT
P7C1BAN12-T2	Barra nervata acciaio	12	58.071	-	25.673	PULL-OUT
P7C1BAN12-T3	Barra nervata acciaio	12	59.701	-	26.393	PULL-OUT
P8C1BCN12-T1	Barra nervata CFRP	12	24.829	0.399	10.442	PULL-OUT
P8C1BCN12-T2	Barra nervata CFRP	12	26.803	3.570	11.849	PULL-OUT
P8C1BCN12-T3	Barra nervata CFRP	12	11.035	5.964	4.878	PULL-OUT
P9C1BAN10S-T1	Barra nervata acciaio	10	12.093	0.051	7.698	SPLITTING
P9C1BAN10S-T2	Barra nervata acciaio	10	14.087	0.177	8.968	SPLITTING
P9C1BAN10S-T3	Barra nervata acciaio	10	13.102	0.117	8.341	SPLITTING
P10C1BCN10S-T1	Barra nervata CFRP	10	10.042	2.448	6.393	SPLITTING
P10C1BCN10S-T2	Barra nervata CFRP	10	6.551	0.098	4.170	PULL-OUT
P10C1BCN10S-T3	Barra nervata CFRP	10	9.850	3.869	6.271	PULL-OUT

- Φ è il diametro nominale della barra
- F_{max} è il massimo carico di trazione (Pull-Out) applicato
- δ_{peak} è lo scorrimento al carico di picco
- τ è la tensione tangenziale massima di aderenza

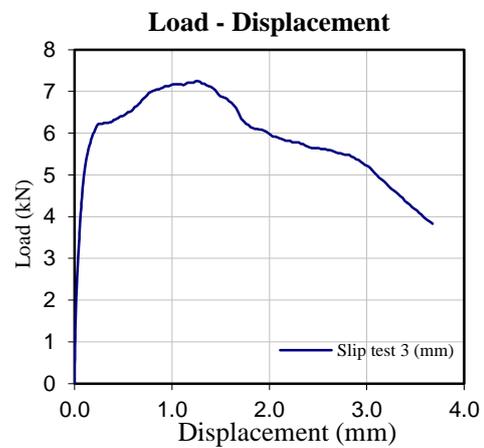
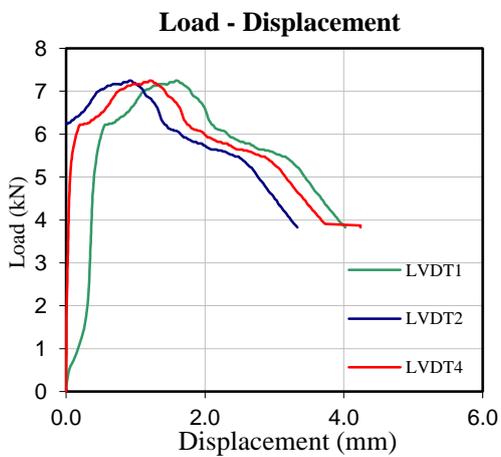
- P1C2BAN10-Test 1:



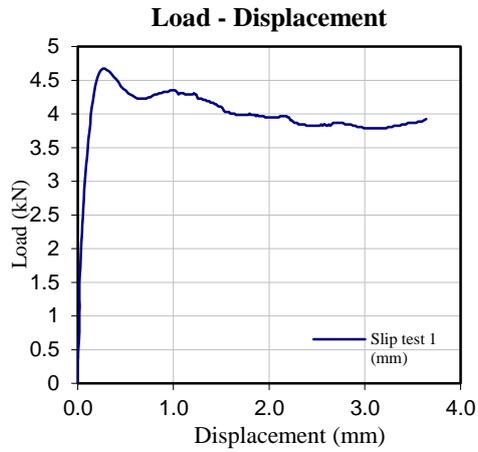
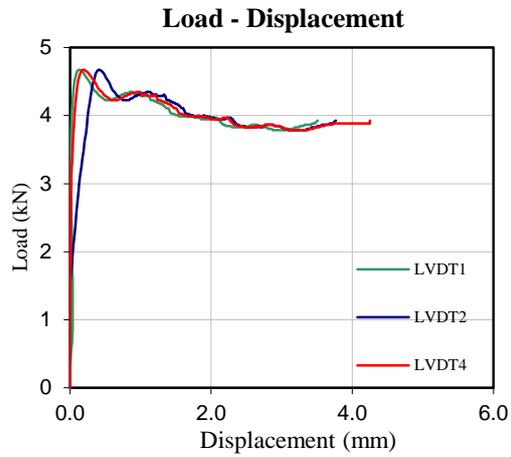
- P1C2BAN10-Test 2:



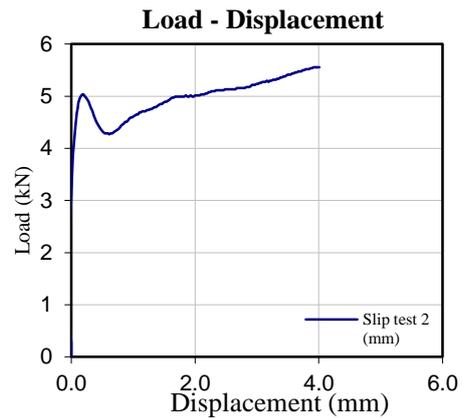
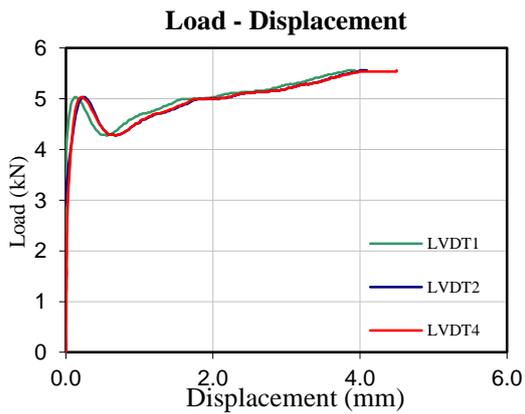
- P1C2BAN10-Test 3:



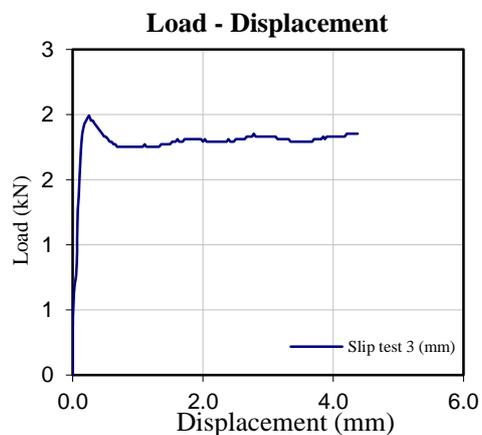
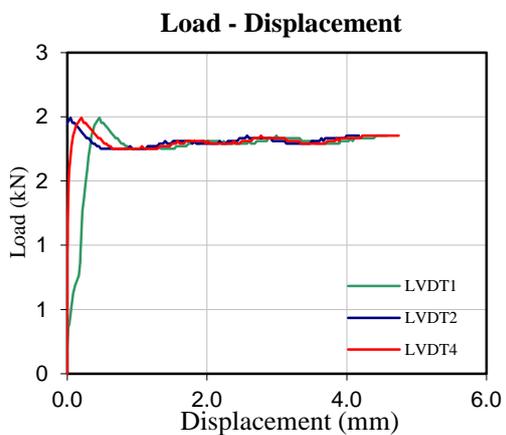
- P2C2BCN10 – Test 1:



- P2C2BCN10 – Test 2:

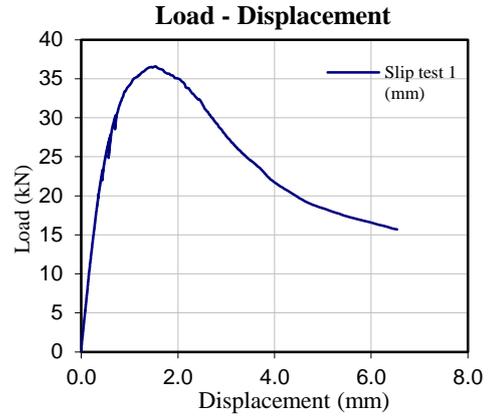
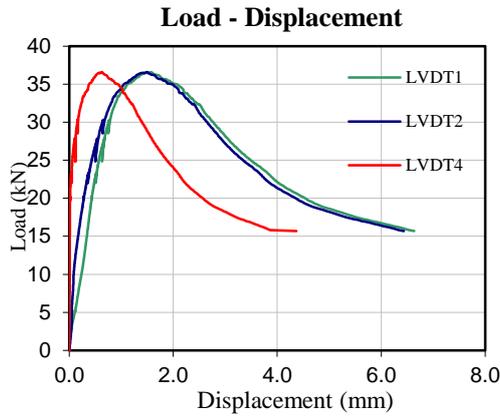


- P2C2BCN10 – Test 3:

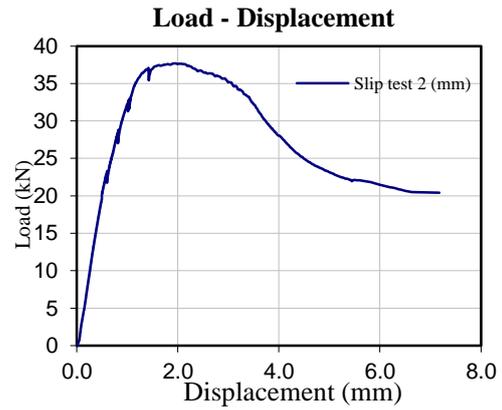
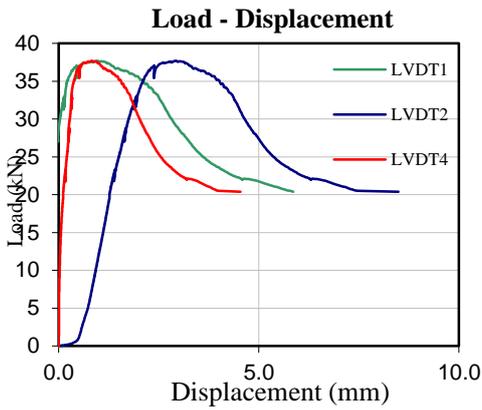


6. ESECUZIONE DELLE PROVE

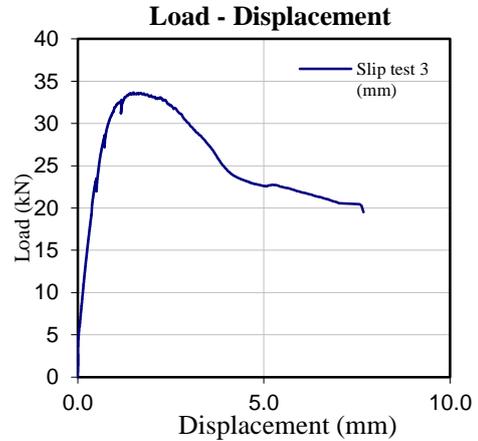
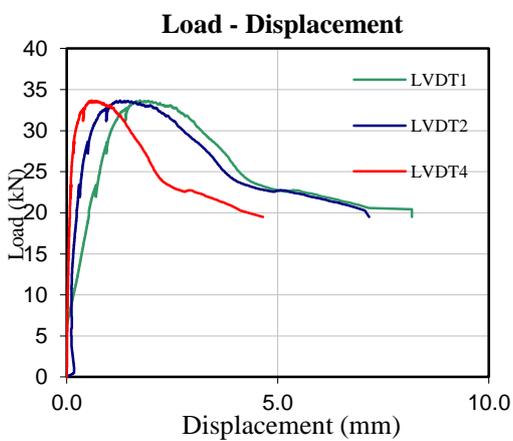
- P3C1BAN10 – Test 1:



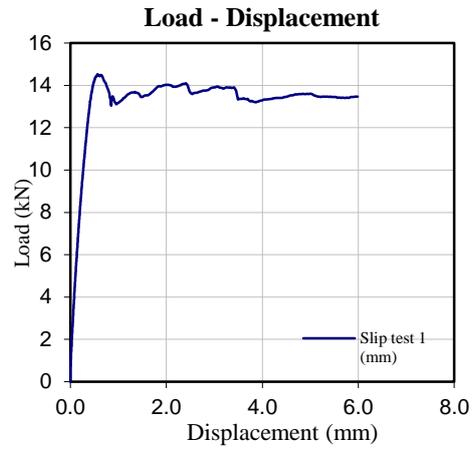
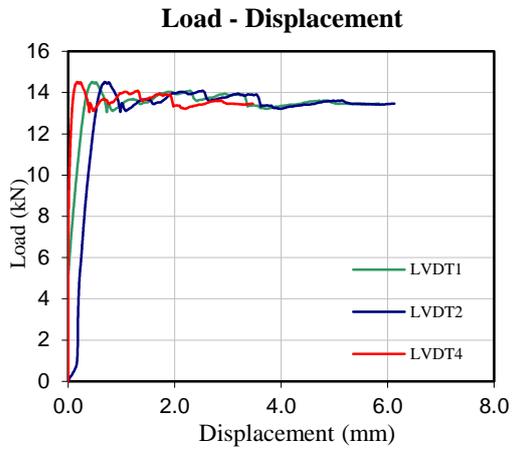
- P3C1BAN10 – Test 2:



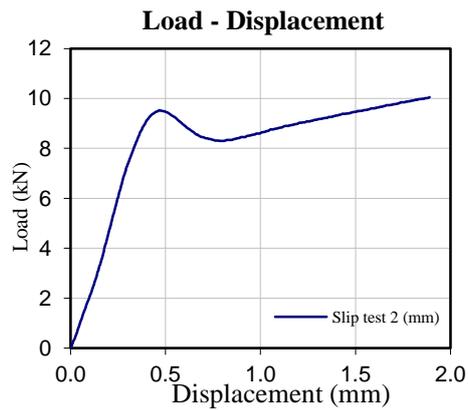
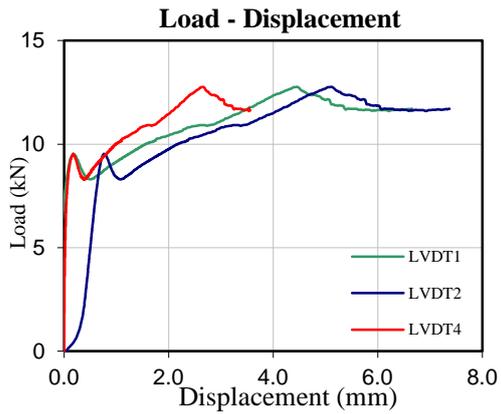
- P3C1BAN10 – Test 3:



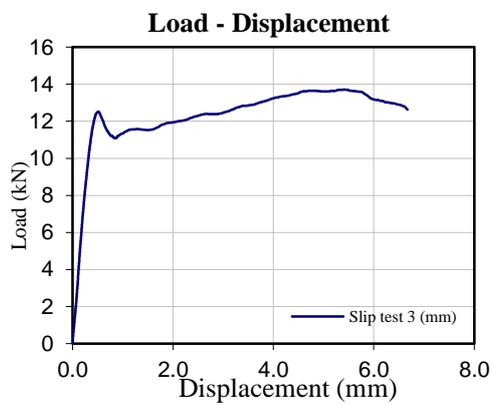
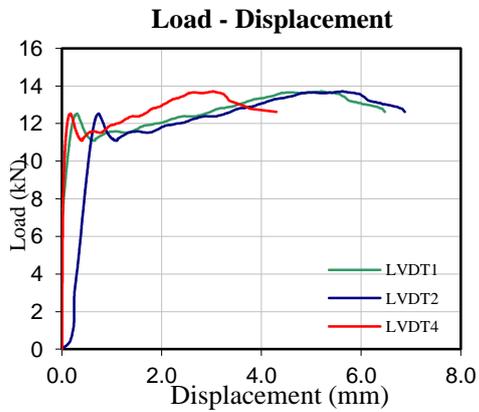
- P4C1BCN10 – Test 1:



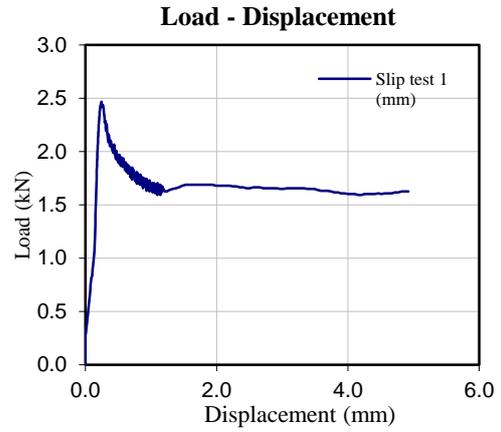
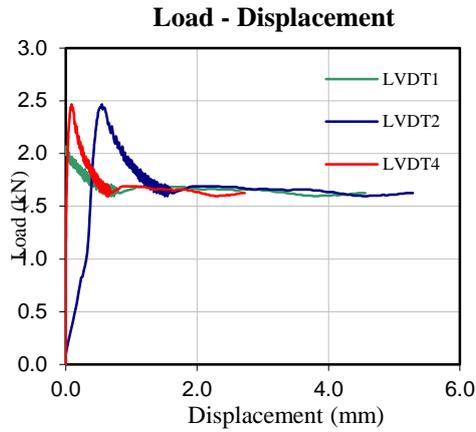
- P4C1BCN10 – Test 2:



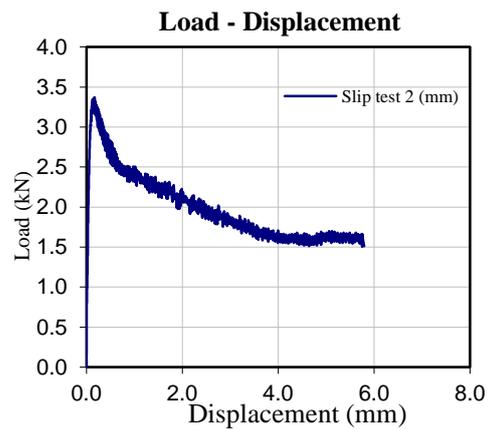
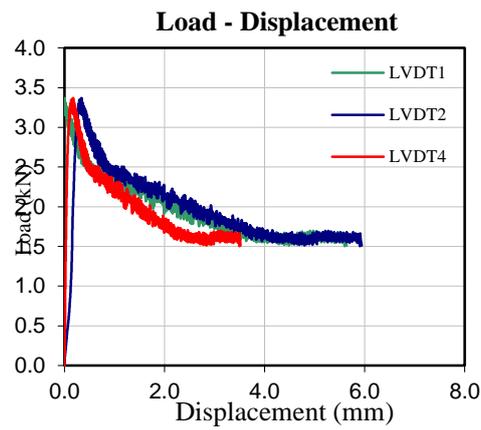
- P4C1BCN10 – Test 3:



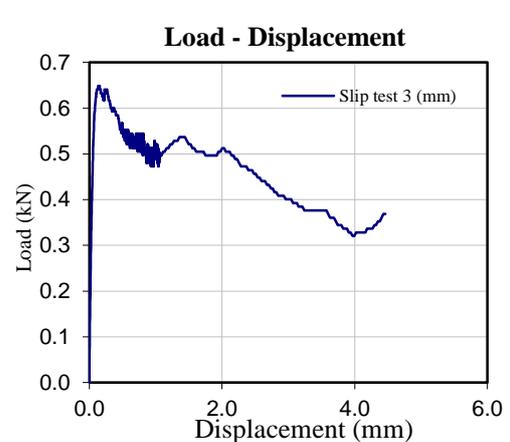
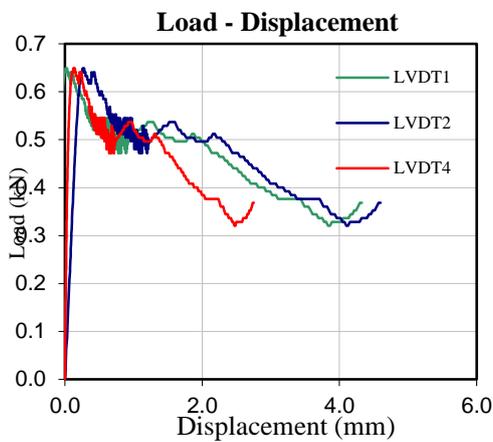
- P5C1BAL10 – Test 1:



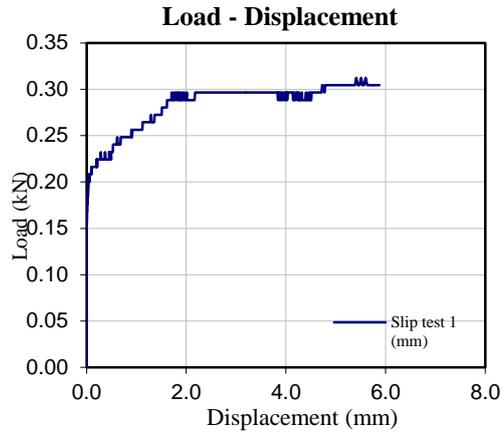
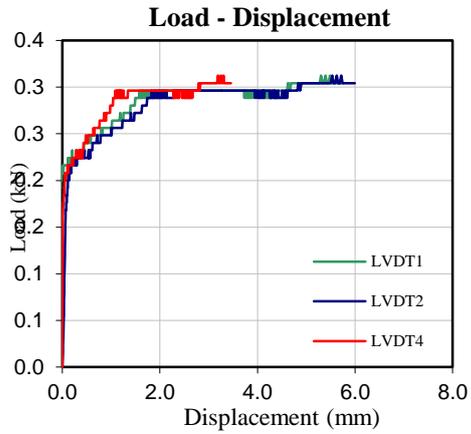
- P5C1BAL10 – Test 2:



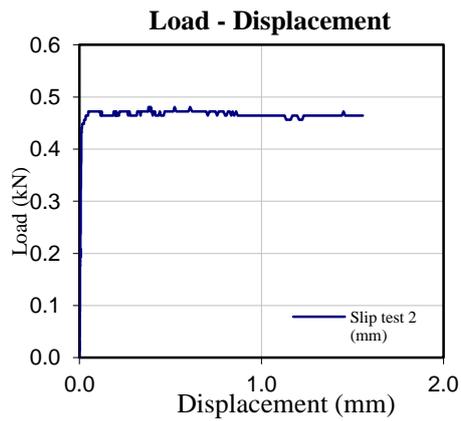
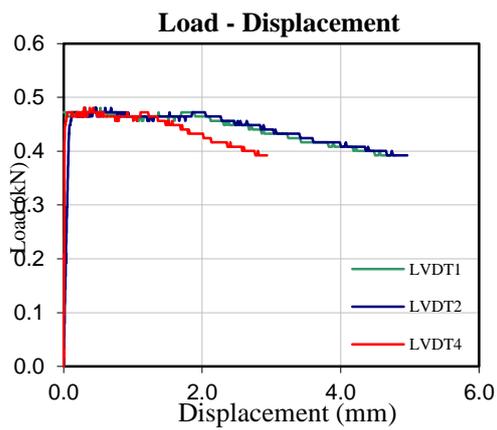
- P5C1BAL10 – Test 3:



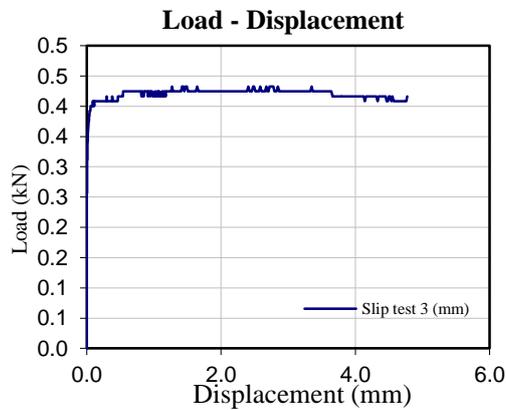
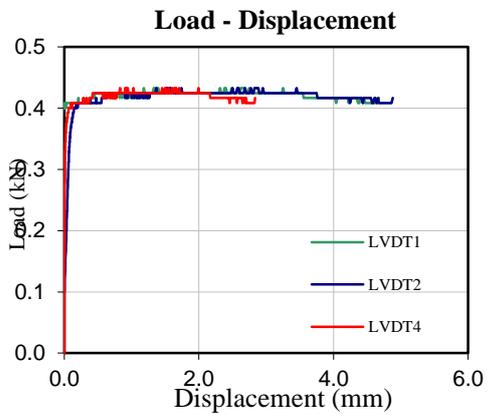
- P6C1BCL10 – Test 1:



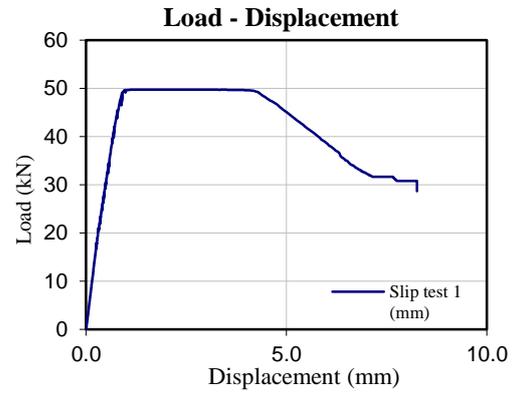
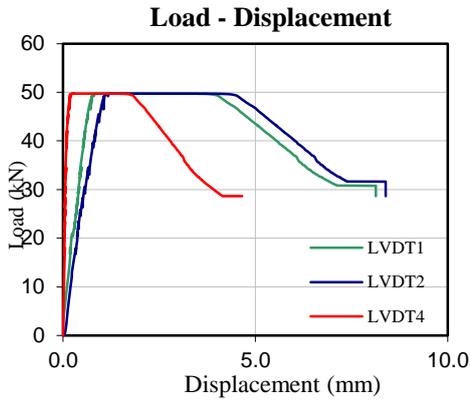
- P6C1BCL10 – Test 2:



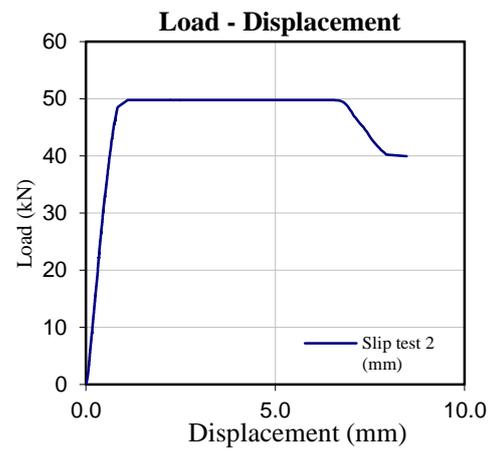
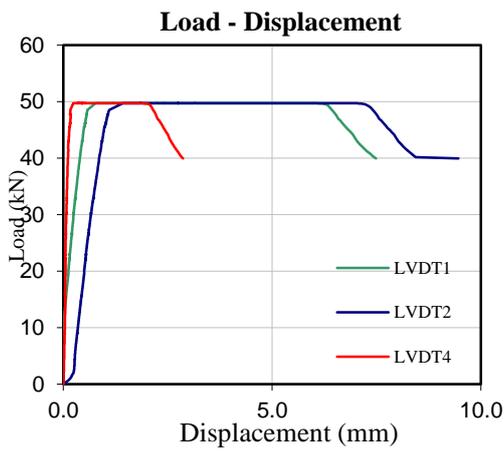
- P6C1BCL10 – Test 3:



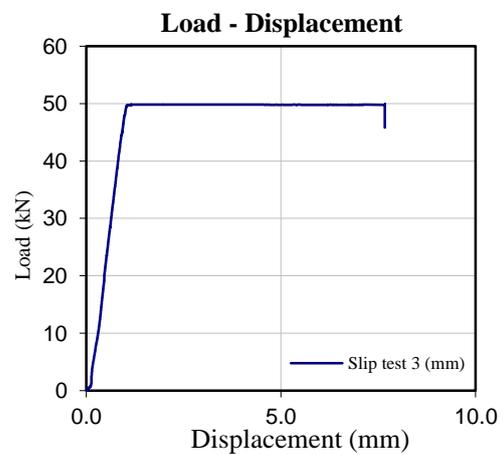
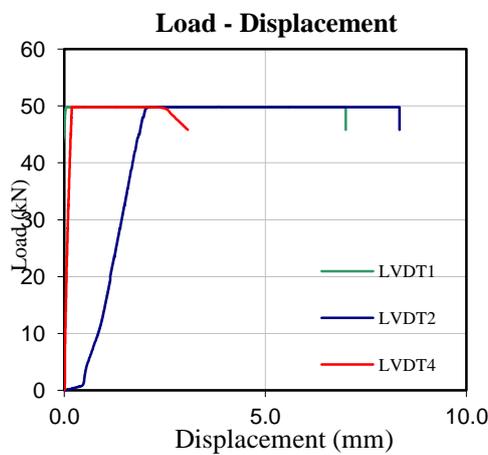
- P7C1BAN12 – Test 1:



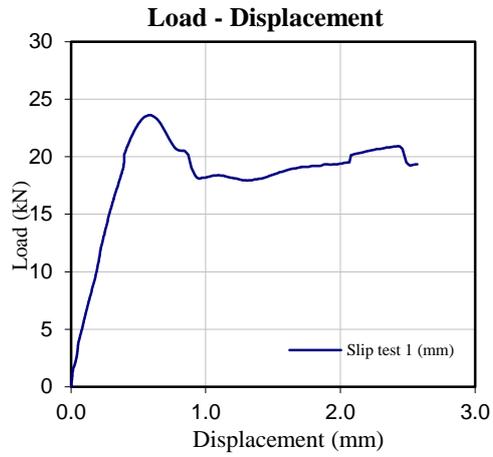
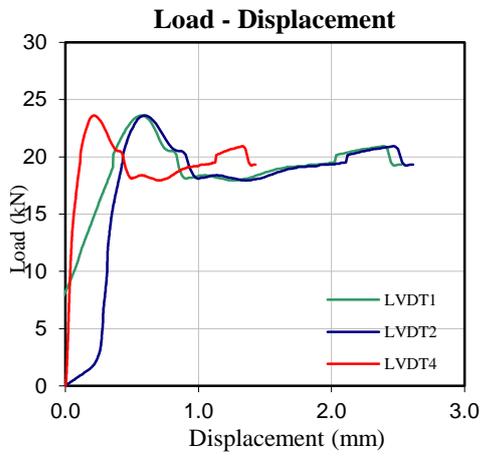
- P7C1BAN12 – Test 2:



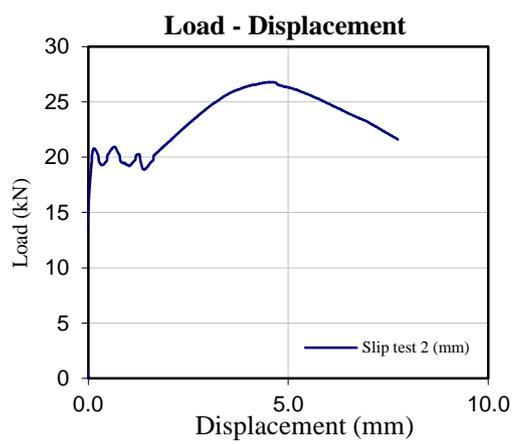
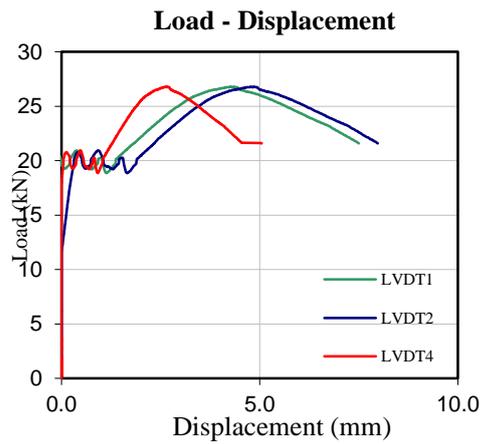
- P7C1BAN12 – Test 3:



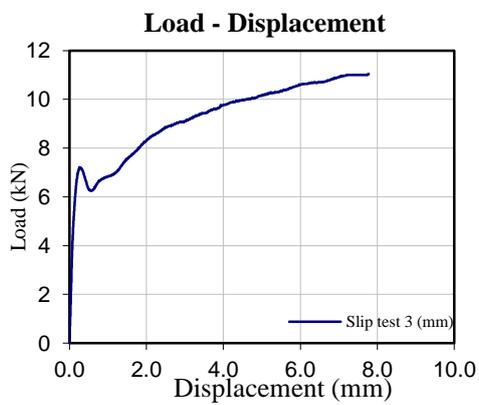
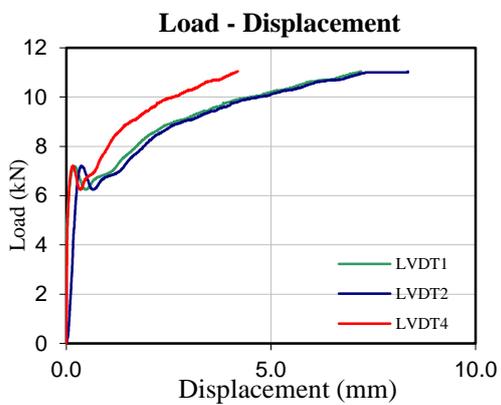
- P8C1BCN12 – Test 1:



- P8C1BCN12 – Test 2:

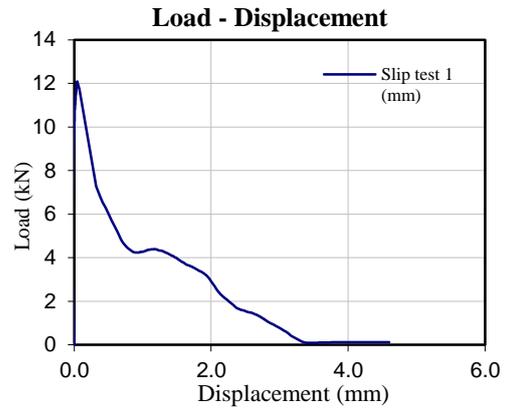
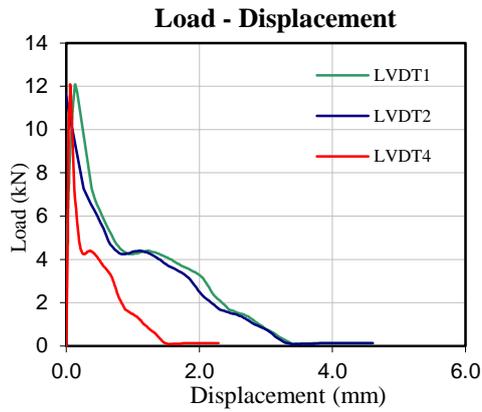


- P8C1BCN12 – Test 3:

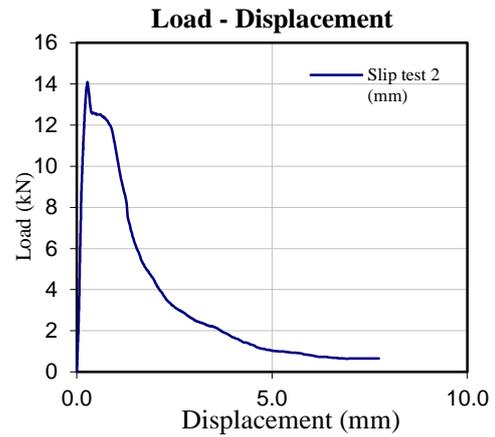
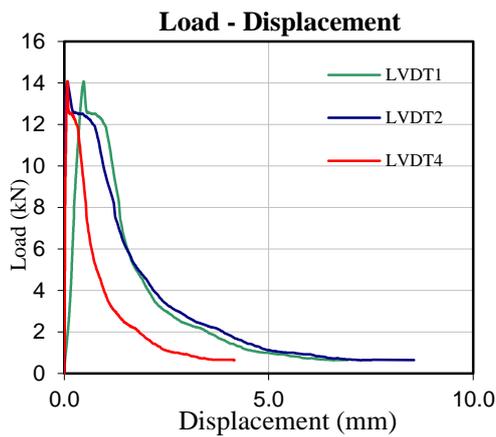


6. ESECUZIONE DELLE PROVE

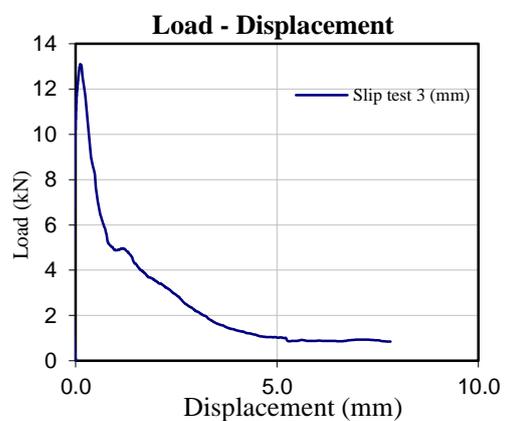
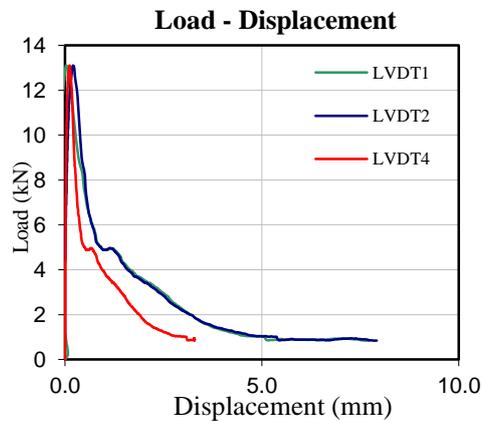
- P9C1BAN10S – Test 1:



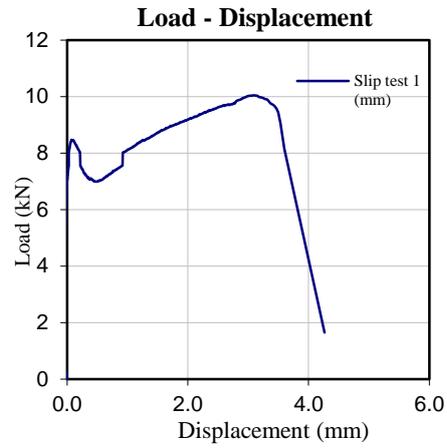
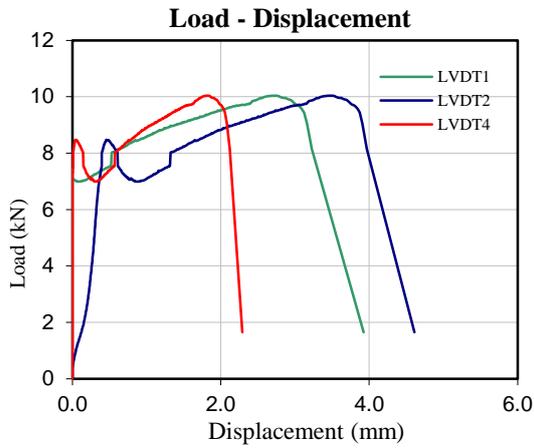
- P9C1BAN10S – Test 2:



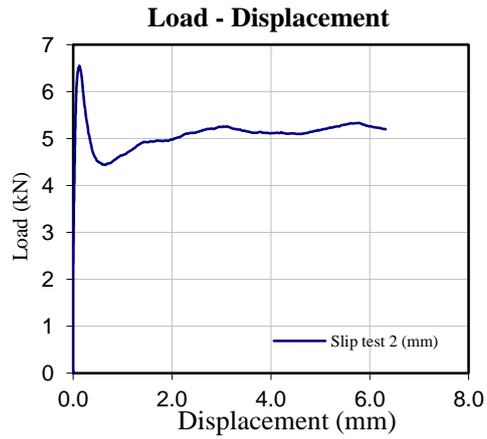
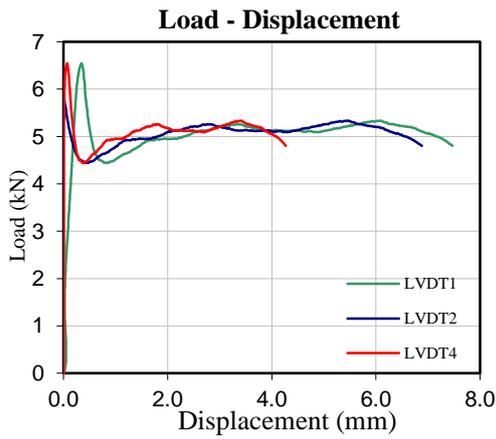
- P9C1BAN10S – Test 3:



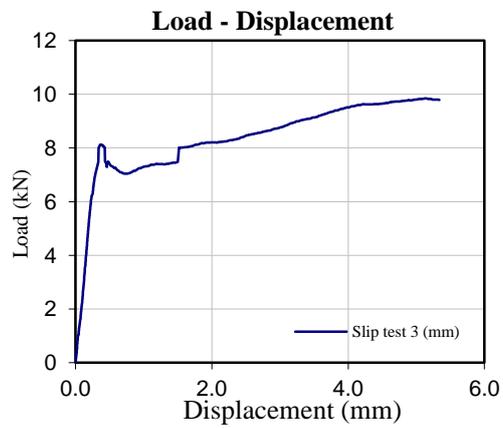
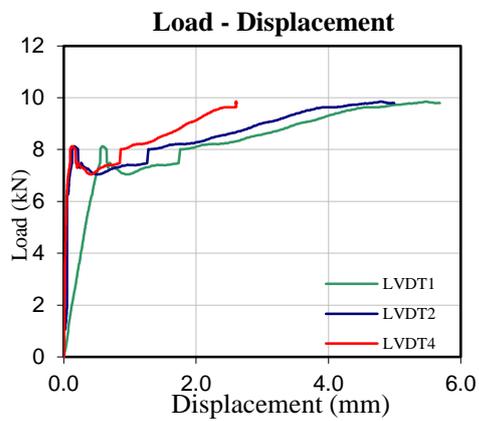
- P10C1BCN10S – Test 1:



- P10C1BCN10S – Test 2:



- P10C1BCN10S – Test 3:



7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

In questo capitolo vengono analizzati i dati sperimentali ottenuti dalle sperimentazioni sui provini effettuate nel laboratorio LISG.

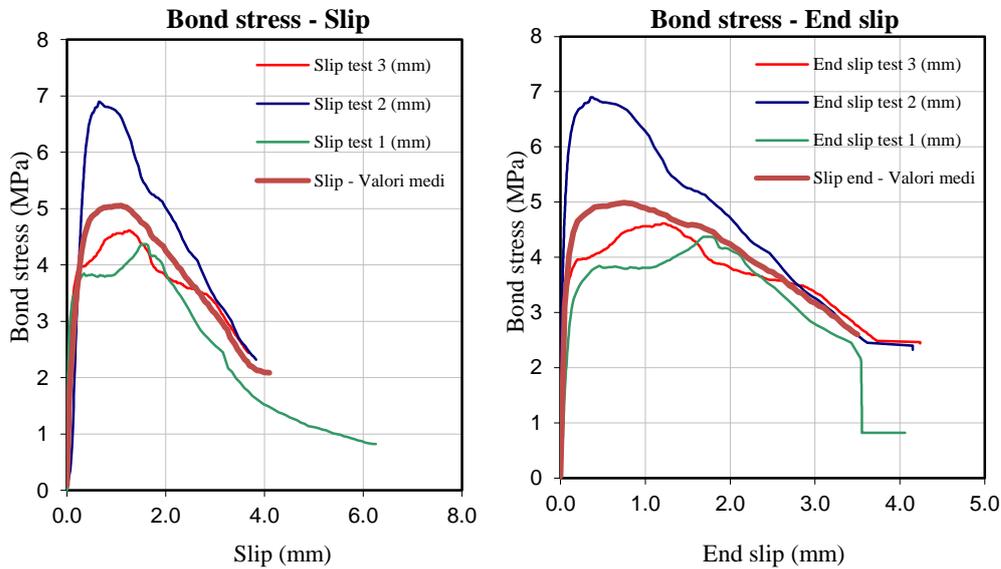
Nella prima parte si descrive il comportamento delle barre sottoposte alla prova di pull-out, confrontando i risultati ottenuti. Nella seconda vengono calibrati i modelli teorici (Malvar – CMR – Modified BPE) che descrivono il fenomeno dell'aderenza delle barre in FRP nel calcestruzzo visti i precedenti, utilizzando i dati sperimentali.

Riporto in Tabella i valori medi dei risultati sperimentali ottenuti:

Prova	Tipologia di barra	ϕ [mm]	F_{max} [KN]	δ_{peak} [mm]	τ [Mpa]	Tipo di rottura
<i>P1C2BAN10</i>	Barra nervata acciaio	10	8.317	1.106	5.295	PULL-OUT
<i>P2C2BCN10</i>	Barra nervata CFRP	10	4.075	1.551	2.594	PULL-OUT
<i>P3C1BAN10</i>	Barra nervata acciaio	10	35.979	1.165	22.905	PULL-OUT
<i>P4C1BCN10</i>	Barra nervata CFRP	10	13.667	2.770	8.701	PULL-OUT
<i>P5C1BAL10</i>	Barra liscia acciaio	10	2.163	0.157	1.377	PULL-OUT
<i>P6C1BCL10</i>	Barra liscia CFRP	10	0.408	1.896	0.260	PULL-OUT
<i>P7C1BAN12</i>	Barra nervata acciaio	12	58.681	-	25.942	PULL-OUT
<i>P8C1BCN12</i>	Barra nervata CFRP	12	20.889	3.311	9.056	PULL-OUT
<i>P9C1BAN10S</i>	Barra nervata acciaio	10	13.094	0.115	8.336	SPLITTING
<i>P10C1BCN10S</i>	Barra nervata CFRP	10	8.814	2.138	5.611	SPLITTING

- Φ è il diametro nominale della barra
- F_{max} è il valor medio del massimo carico di trazione (Pull-Out)
- δ_{peak} è il valor medio dello scorrimento al carico di picco
- τ è il valor medio della tensione tangenziale massima di aderenza

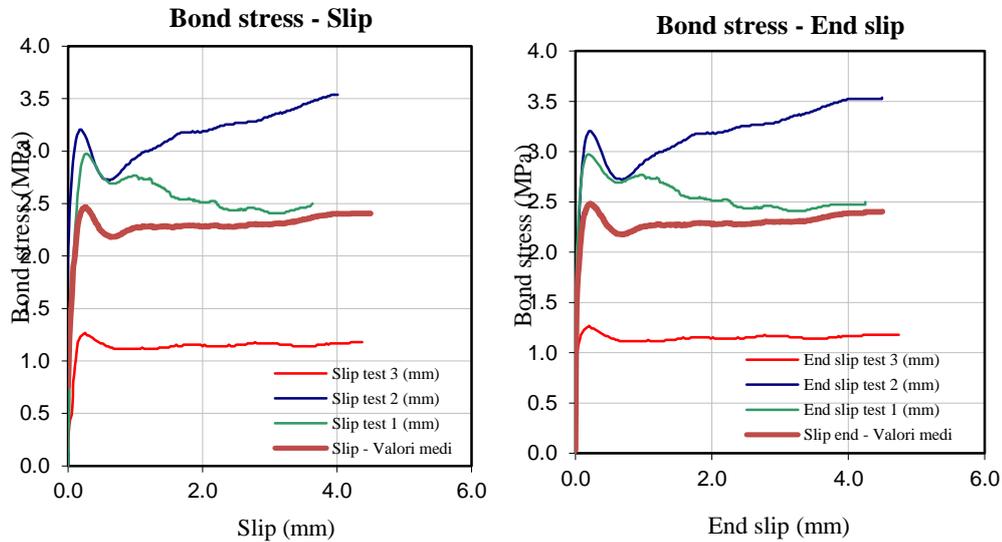
- PIC2BAN10:



I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 25MPa e con le barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm. Si nota una certa differenza tra i tre test, dovuti principalmente alla disomogeneità del calcestruzzo. È stata costruita una curva media dividendo prima in intervalli regolari gli scorrimenti, poi prendendo la τ ad ogni singolo intervallo, ed infine facendo la media dei tre test. Si nota anche un certo sfasamento del picco di tensione tangenziale tra il lato inferiore e il lato superiore del calcestruzzo. Questo è dovuto principalmente alla minore deformazione che si ha nel tratto finale della barra (“*at the end*”) annegata nel calcestruzzo.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

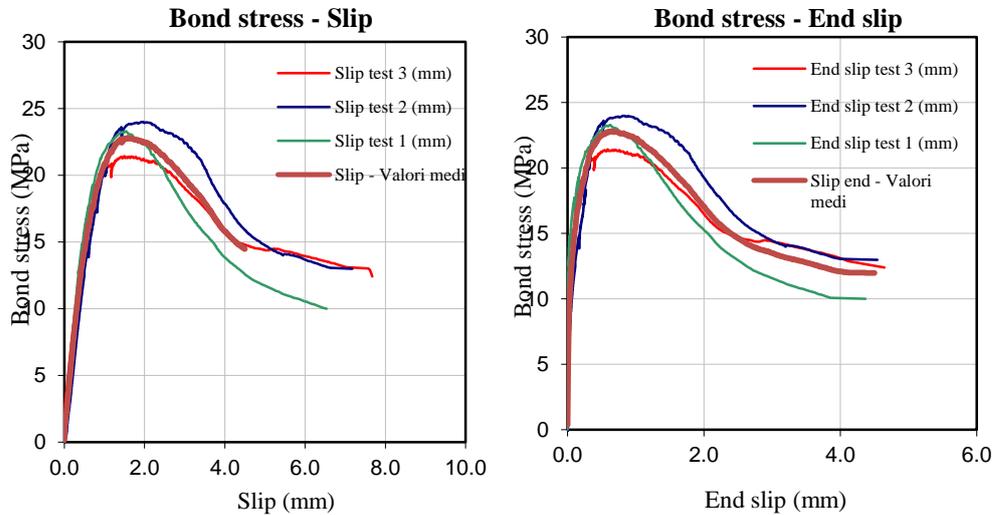
- P2C2BCN10:



I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 25MPa e con le barre pultruse in CFRP ad aderenza migliorata di diametro 10 mm. Come in precedenza è presente una certa differenza tra i tre test, dovuti alla disomogeneità del calcestruzzo.

In questo caso, rispetto alle barre in acciaio, il ramo di “softening” è molto più breve, mentre è confrontabile la fase di puro attrito, nella quale si hanno valori di tensioni tangenziali simili. Sia per le barre in acciaio, sia per quelle in CFRP, la rottura è avvenuta nei denti di calcestruzzo interposti fra le nervature delle barre. Per un basso valore di resistenza del calcestruzzo quindi, la nervatura della barra in CFRP ha resistito, è ha permesso di ottenere valori di tensione tangenziale massima leggermente inferiori a quelli delle barre in acciaio.

- P3C1BAN10:

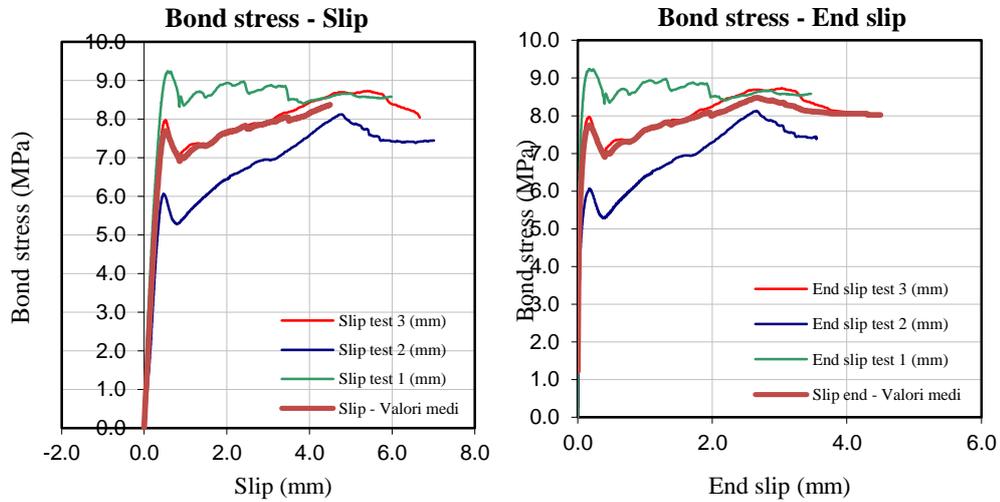


I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm. In questo caso si nota una minore differenza tra i tre test.

Si può vedere che utilizzando un calcestruzzo di due classi superiore si ottiene una resistenza di aderenza circa 4 volte maggiore, mentre la forma del diagramma rimane del tutto simile a quella della prova P1.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

- P4C1BCN10:

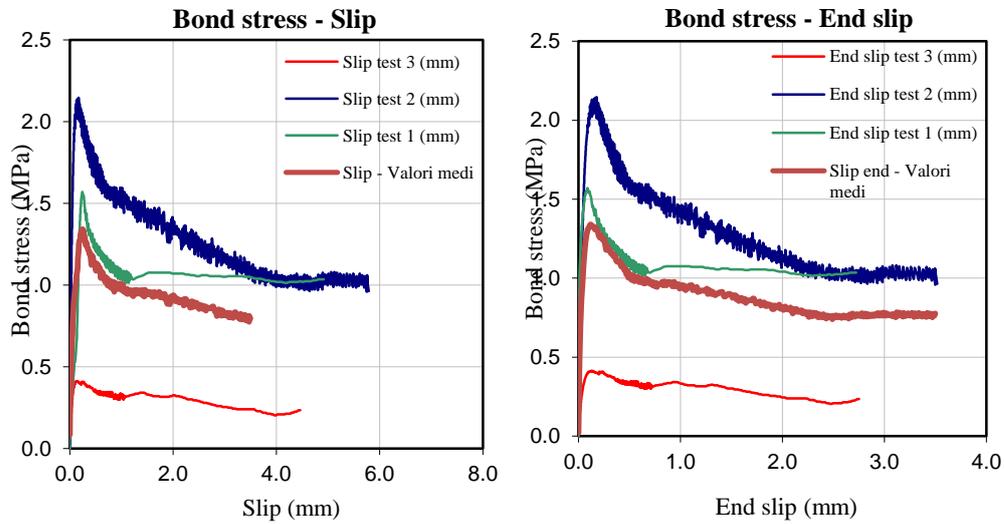


I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre pultruse in CFRP ad aderenza migliorata di diametro 10 mm.

Due test su tre hanno mostrato che la massima tensione tangenziale di aderenza si manifesta dopo il primo picco, a causa probabilmente dell'effetto "incastro" delle nervature con il calcestruzzo dopo un primo assestamento. In questo caso, la rottura si è manifestata nel distaccamento della spirale che avvolgeva la barra e non nel calcestruzzo, come in precedenza, per cui è presente una caduta di tensione subito dopo il picco.

Si è visto che, con l'aumentare della classe di calcestruzzo, la tensione tangenziale di aderenza è più che triplicata.

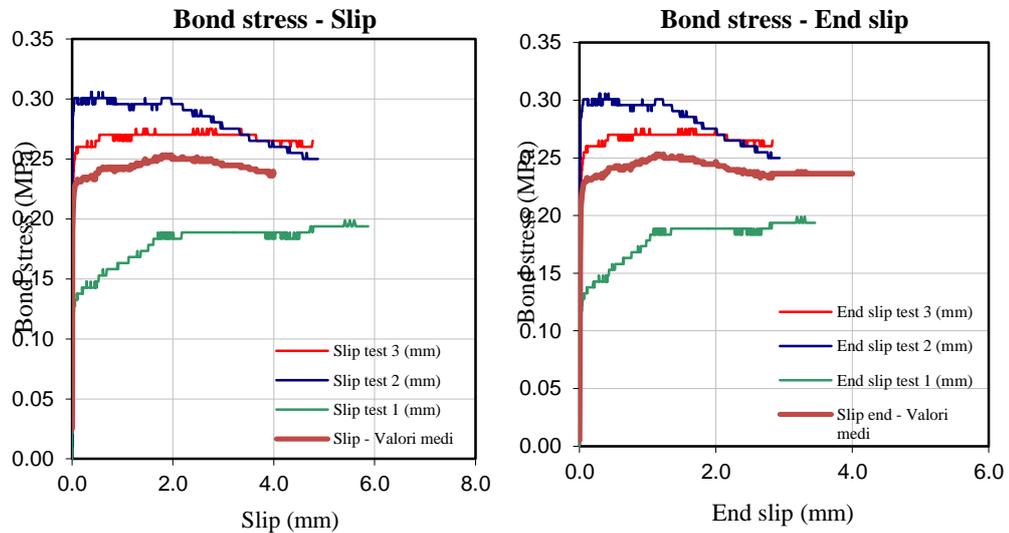
- P5C1BAL10:



I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre in acciaio lisce di diametro 10 mm. Qui si raggiungono valori molto bassi di aderenza, circa di un ordine inferiore rispetto alle barre ad aderenza migliorata. È possibile vedere che dopo un primo tratto ascendente, caratterizzato dalla resistenza dei legami chimici barra-calcestruzzo, c'è un brusco calo di aderenza, fino a valori costanti in cui il meccanismo resistente è il puro attrito.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

- P6C1BCL10:



I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre pultruse in fibra di carbonio lisce di diametro 10 mm. Qui si raggiungono soglie bassissime di tensioni tangenziali, inferiori a quelle delle barre in acciaio. L'adesione chimica è quasi ininfluenza e il meccanismo resistente è il puro attrito.

- P7C1BAN12:

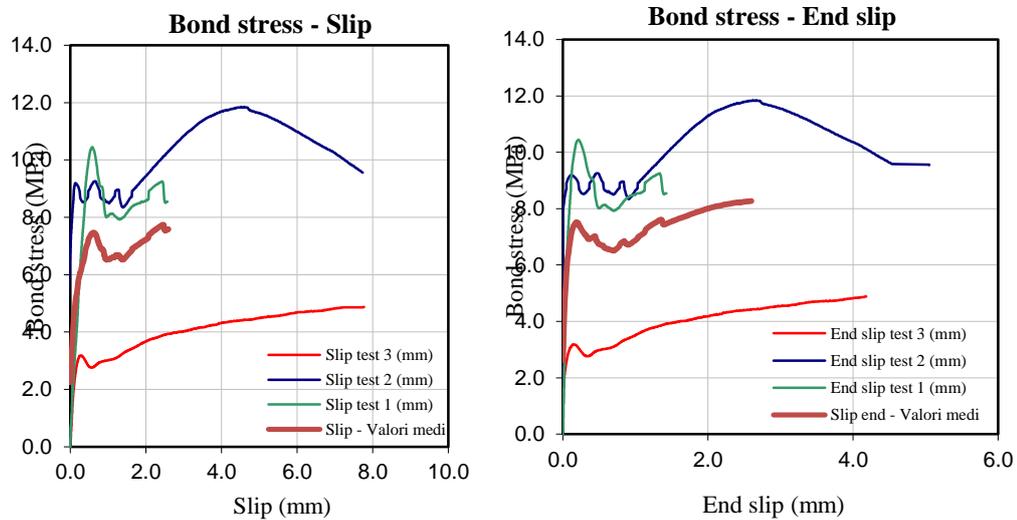
Questa prova prende in esame i tre provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 12 mm.

I risultati di questo set di prove non sono stati riportati in quanto non sono completi. Come è stato detto in precedenza c'è stata un'anomalia nella registrazione del carico oltre i 5000 daN. Probabilmente un errore nell'impostazione della scala di acquisizione è la causa di questa anomalia, per cui, per questa prova si dispone solo del carico massimo e non di tutto il legame costitutivo carico-spostamenti.

Nonostante ciò, si può affermare che la tensione tangenziale determinata su questi provini è maggiore rispetto a quella risultata dai provini con stesso calcestruzzo con barre dal diametro di 10 mm.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

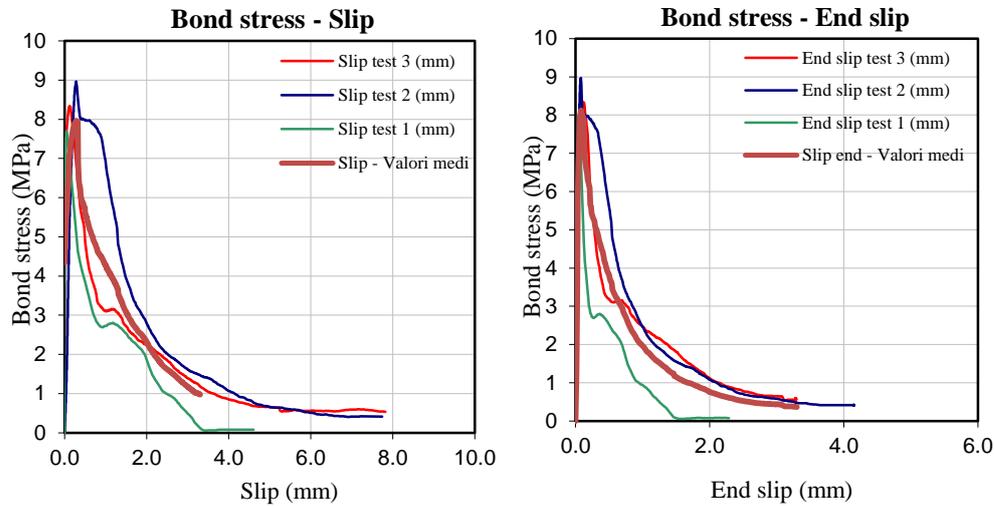
- P8C1BCN12:



I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre pultruse in CFRP ad aderenza migliorata di diametro 12 mm.

Due test su tre hanno mostrato che la massima tensione tangenziale di aderenza si manifesta dopo il primo picco, a causa probabilmente dell'effetto "incastro" delle nervature con il calcestruzzo dopo un primo assestamento. La rottura si è manifestata nel distaccamento della spirale che avvolgeva la barra. Come per le barre in acciaio, all'aumentare del diametro della barra aumenta anche la tensione tangenziale di aderenza.

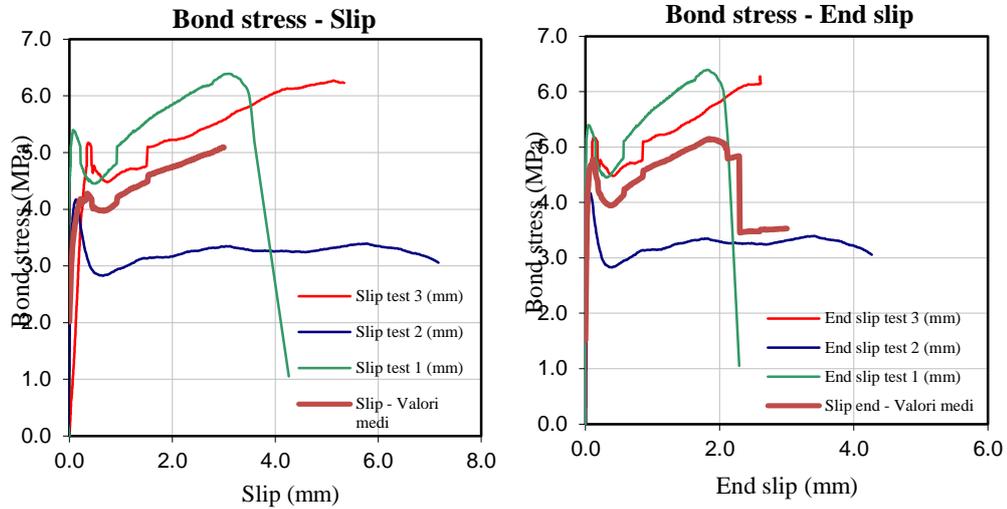
- P9C1BAN10S:



I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini “da splitting” realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre in acciaio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm. In questa prova avviene la propagazione delle fessure fino alla superficie del copriferro, e si può vedere dal grafico come, subito dopo il picco di tensione tangenziale, c'è un brusco calo di aderenza, mostrando così una rottura di tipo fragile. Si può quindi constatare che, a parità di barra e calcestruzzo, il confinamento prodotto dal cubetto della prova P3 produce valori di tensioni tangenziali circa tre volte maggiori quelli di questa prova.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

- P10C1BCN10S:



I diagrammi sopra riportati confrontano i tre provini “da splitting” realizzati con il calcestruzzo R_{ck} 35MPa e con le barre pultruse in CFRP ad aderenza migliorata di diametro 12 mm.

In questa prova la fessurazione da splitting è stata osservata solamente nel primo test, visibile anche graficamente dal brusco calo dell'ultimo tratto. Gli altri due test hanno mostrato solo fessurazioni lievi attorno alla barra, ma il collasso è avvenuto per sfilamento di essa, per cui i diagrammi del secondo e terzo test sono simili a quelli delle prove P4, ma con valori minori, a causa del minor confinamento.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

- Calibrazione Modelli teorici - P2C2BCN10:

Sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- $\tau_m = 2,468$ MPa
- $\alpha = 0,213$
- $s_m = 0,231$ mm
- $p = 0,0048$
- $s_r = 0,079$ mm
- $F = 3,764$
- $\beta = 0,453$
- $G = 12,44$

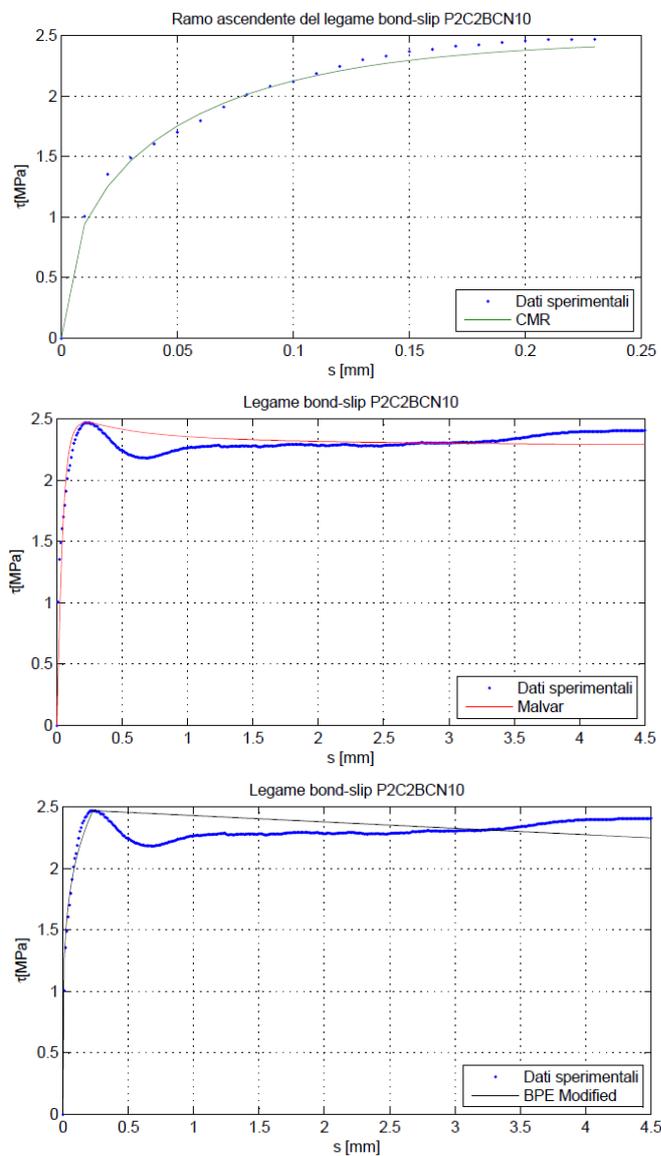


Figura 115. P2C2BCN10 – Modellazione dati sperimentali – CMR Model – Malvar Model – Modified BPE Model

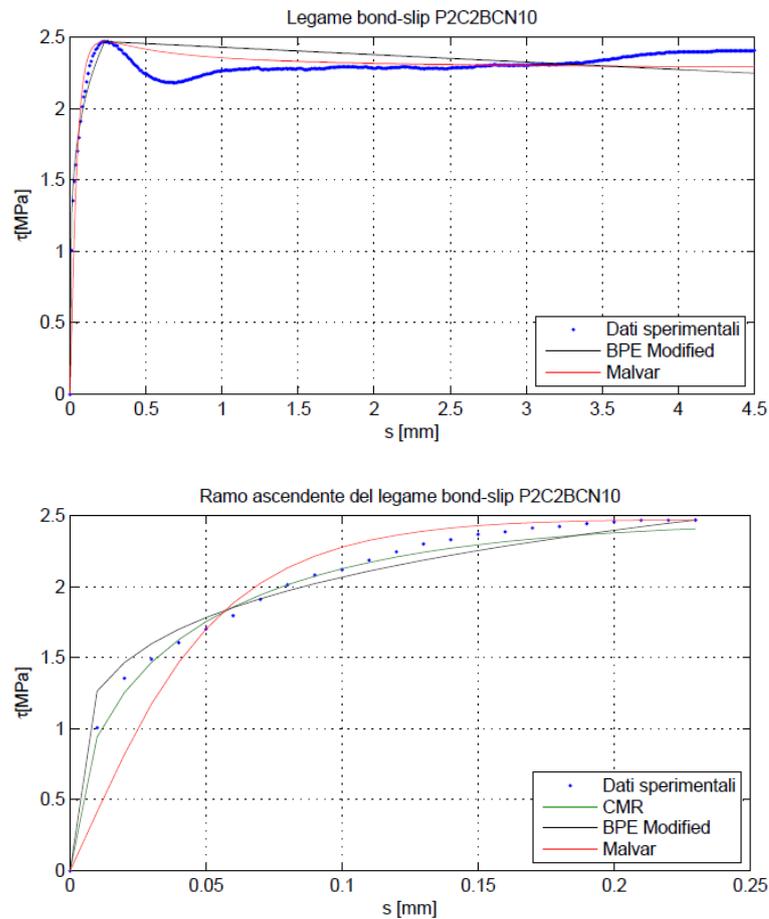


Figura 116. P2C2BCN10 – Modellazione dati sperimentali – confronto fra i tre modelli per l'intero tratto e per il tratto iniziale

Come si può vedere nelle Figure 115 e 116 il CMR Model [7] rappresenta molto bene i risultati sperimentali. Questo modello però raffigura solamente il ramo ascendente della curva tensioni tangenziali-scorrimenti.

Il BPE Modified Model [8] invece, ricostruisce la curva con due diverse equazioni, il che porta ad un ottimo risultato nella rappresentazione dell'intera curva.

Il modello di Malvar [17], utilizzando un'unica relazione per l'intera curva, riesce a simulare abbastanza bene i dati sperimentali di questa prova, anche se con maggiori imprecisioni nel tratto iniziale.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

- Calibrazione Modelli teorici – P4C1BCN10:

Sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- $\tau_m = 7,41$ MPa
- $\alpha = 0,243$
- $s_m = 0,552$ mm
- $p = -0,0178$
- $s_r = 0,189$ mm
- $F = 54,38$
- $\beta = 0,491$
- $G = 61,39$

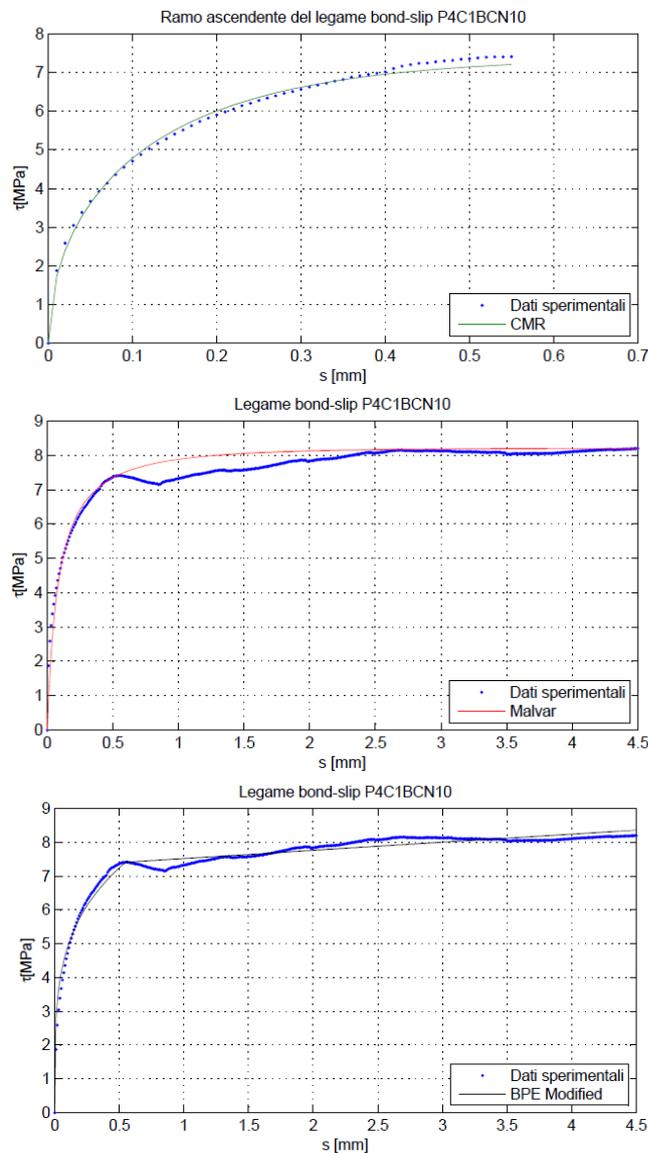


Figura 117. P4C1BCN10 – Modellazione dati sperimentali – CMR Model – Malvar Model – Modified BPE Model

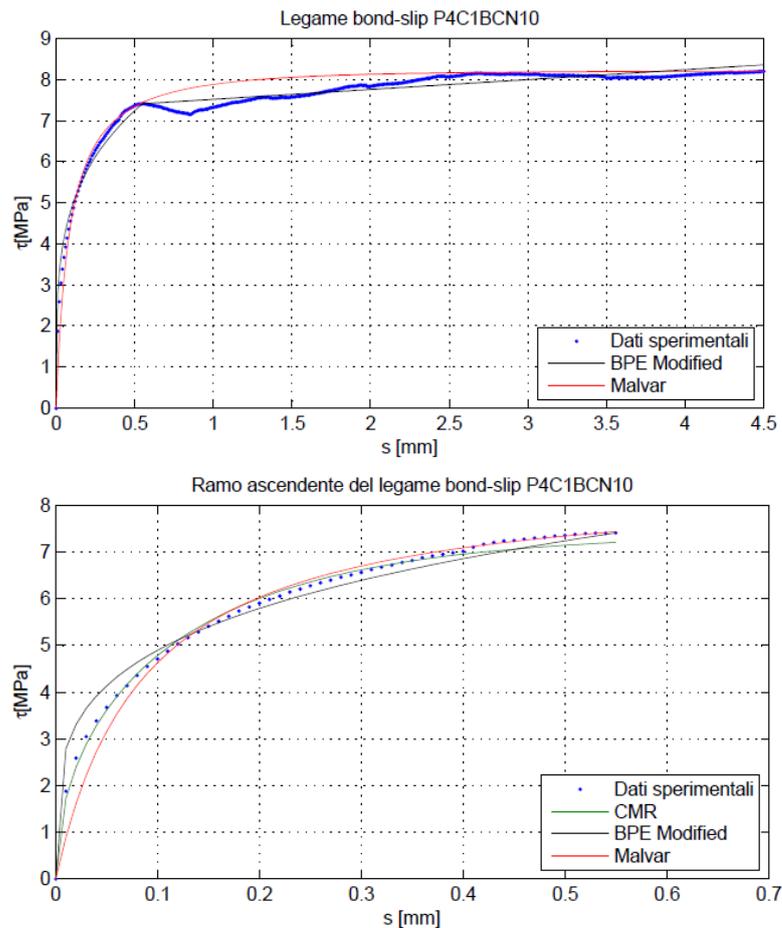


Figura 118. P4C1BCN10 – Modellazione dati sperimentali – confronto fra i tre modelli per l'intero tratto e per il tratto iniziale

Come si può vedere nelle Figure 117 e 118 il CMR Model [7] rappresenta molto bene i risultati sperimentali. Questo modello però raffigura solamente il ramo ascendente della curva tensioni tangenziali-scorrimenti.

Il Modified BPE Model [8] invece, ricostruisce la curva con due diverse equazioni, il che porta ad un ottimo risultato nella rappresentazione dell'intera curva.

Il modello di Malvar [17], utilizzando un'unica relazione, riesce a simulare abbastanza bene i dati sperimentali di questa prova, sia per il solo tratto iniziale che per l'intera curva.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

- Calibrazione Modelli teorici – P6C1BCL10:

Sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- $\tau_m = 0,251$ MPa
- $\alpha = 0,042$
- $s_m = 1,661$ mm
- $p = 0,0443$
- $s_r = 1,153$ mm
- $F = 151,8$
- $\beta = 0,0375$
- $G = 286,5$

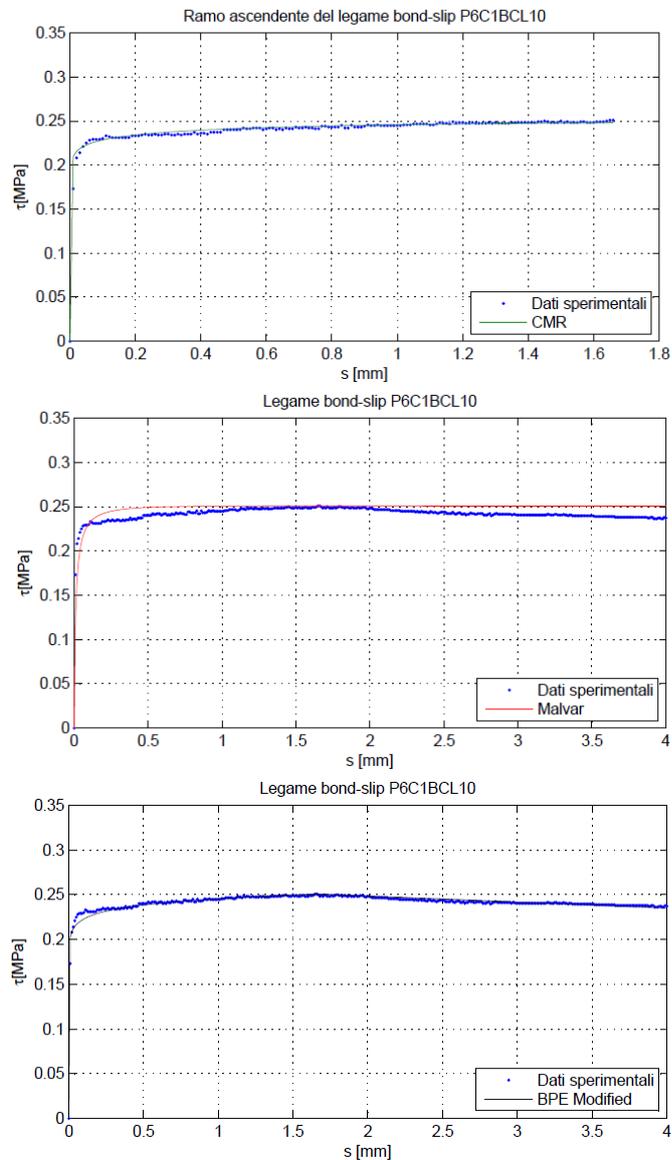


Figura 119. P6C1BCL10 – Modellazione dati sperimentali – CMR Model – Malvar Model – Modified BPE Model

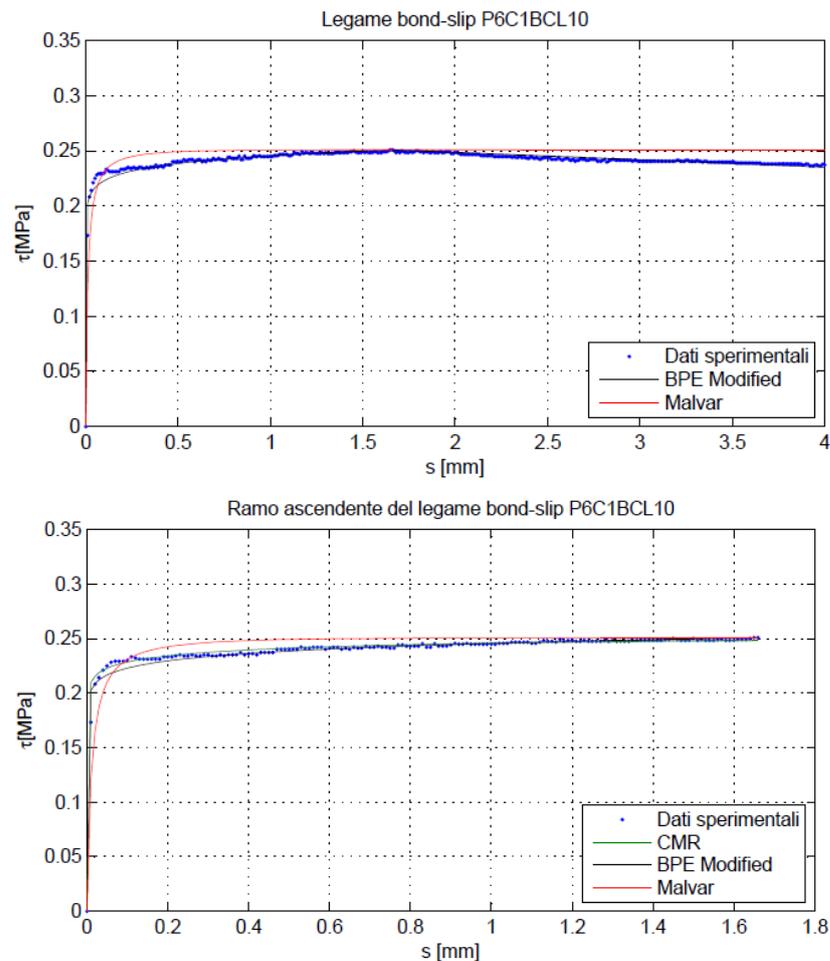


Figura 120. P6C1BCL10 – Modellazione dati sperimentali – confronto fra i tre modelli per l'intero tratto e per il tratto iniziale

Come si può vedere nelle Figure 119 e 120 il CMR Model [7] rappresenta molto bene i risultati sperimentali. Questo modello però raffigura solamente il ramo ascendente della curva tensioni tangenziali-scorrimenti.

Il Modified BPE Model [8] invece, ricostruisce la curva con due diverse equazioni, il che porta ad un ottimo risultato nella rappresentazione dell'intera curva.

Il modello di Malvar [17], utilizzando un'unica relazione per l'intera curva, riesce a simulare abbastanza bene i dati sperimentali di questa prova, soprattutto la parte iniziale.

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

- Calibrazione Modelli teorici – P8C1BCN12:

Sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- $\tau_m = 7,051$ MPa
- $\alpha = 0,1257$
- $s_m = 0,56$ mm
- $p = -0,0283$
- $s_r = 0,130$ mm
- $F = 13,76$
- $\beta = 0,357$
- $G = 97,71$

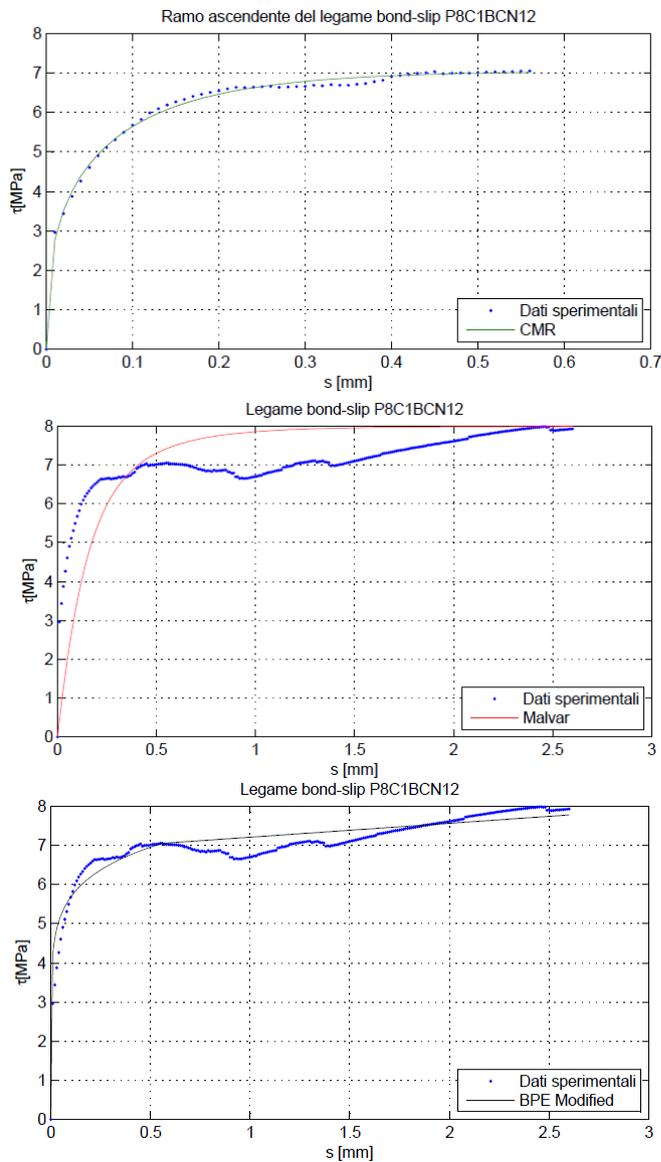


Figura 121. P8C1BCN12 – Modellazione dati sperimentali – CMR Model – Malvar Model – Modified BPE Model

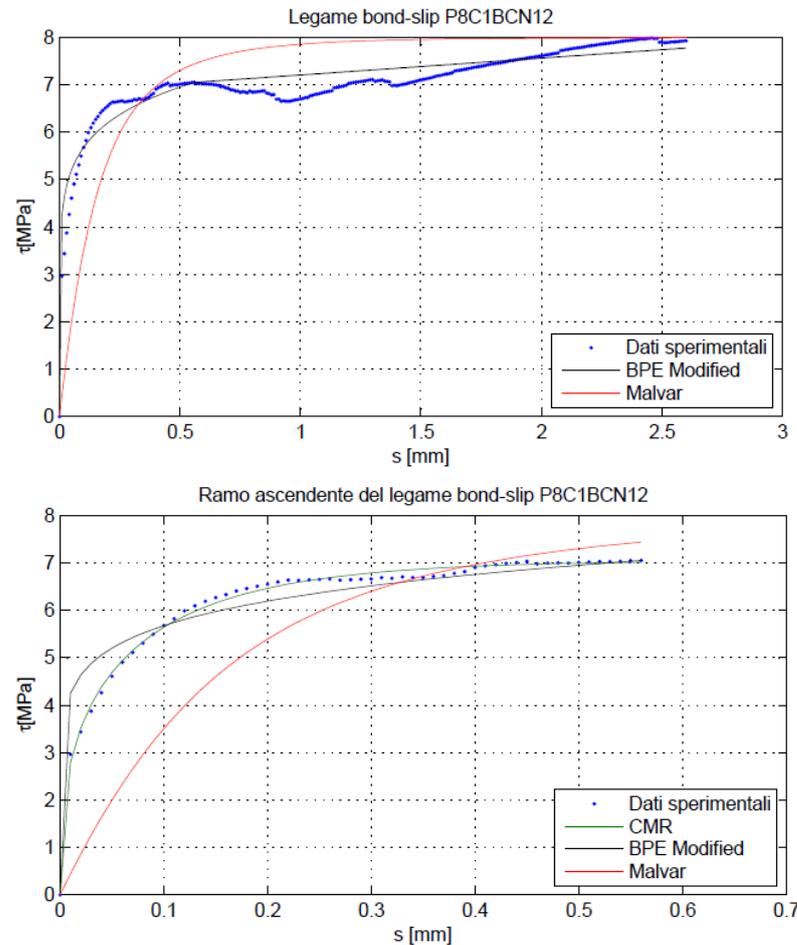


Figura 122. P8C1BCN12 – Modellazione dati sperimentali – confronto fra i tre modelli per l'intero tratto e per il tratto iniziale

Come si può vedere nelle Figura 121 e 122 il CMR Model [7] rappresenta molto bene i risultati sperimentali. Questo modello però raffigura solamente il ramo ascendente della curva tensioni tangenziali-scorrimenti.

Il Modified BPE Model [8] invece, ricostruisce la curva con due diverse equazioni, il che porta ad un ottimo risultato nella rappresentazione dell'intera curva.

Il modello di Malvar [17] invece, utilizzando un'unica relazione per l'intera curva, non riesce a simulare sufficientemente bene i dati sperimentali di questa prova, a differenza delle precedenti.

Riporto in seguito i due script in linguaggio Matlab utilizzati per P2C2BCN10:

```
1) % curve fitting

clear
clc
load -ascii P2.txt
P2;
x=(P2(:,1))';
y=(P2(:,2))';
tmax=max(y)
pos=find(y==tmax);
sm=x(1,pos)
xm=(P2(1:pos,1))';
ym=(P2(1:pos,2))';
xu=(P2(pos:end,1))';
yu=(P2(pos:end,2))';
su=(P2(end,1))';
tu=(P2(end,2))';
figure (1)
plot(x,y);
figure (2)
plot(xm,ym);
cftool

% CMR ((1-(exp(-x/sr)))^b)*tmax
% Malvar (((F*x/sm)+(G-1)*((x/sm)^2)))/(1+((F-2)*x/sm)+(G*(x/sm)^2))*tmax
```

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

```
2) % Modelli Teorici
clear
clc
load -ascii P2.txt
P2;
x=(P2(:,1))';
y=(P2(:,2))';
tmax=max(y);
pos=find(y==tmax);
sm=x(1,pos);
xm=(P2(1:pos,1))';
ym=(P2(1:pos,2))';
xu=(P2(pos:end,1))';
yu=(P2(pos:end,2))';
su=(P2(end,1))';
tu=(P2(end,2))';
sr=0.07882; %CMR
b=0.4528; %CMR
G=12.44; %Malvar
F=3.764; %Malvar
yCMR=((1-(exp(-xm./sr))).^b).*tmax;
area_c=cumtrapz(xm,ym);
Area=area_c(end);
alfa=(tmax*sm/Area)-1;
yBPEarea=((xm./sm).^alfa).*tmax;
area_sec_tr=cumtrapz(xu,yu);
Area_sec=area_sec_tr(end);
%y2BPE=(1-(p*((xu/sm)-1)))*tmax curve fitting
p_cf=0.004838; %BPE
y2_cf_BPE=(1-(p_cf*((xu/sm)-1)))*tmax;
yMalv=((F.*x./sm)+(G-1).*((x./sm).^2))./(1+((F-2).*(x./sm)+(G.*((x./sm).^2))).*tmax;
yMalv1=((F.*xm./sm)+(G-1).*((xm./sm).^2))./(1+((F-2).*(xm./sm)+(G.*((xm./sm).^2))).*tmax;
subplot 221
plot(xm,ym,'.',xm,yCMR)
title('Ramo ascendente del legame bond-slip
P2C2BCN10')
xlabel('s [mm]')
ylabel('\tau[MPa]')
grid on
legend('Dati sperimentali','CMR')
set(legend,'Location','SouthEast');
subplot 222
plot(x,y,'.',x,yMalv,'r')
title('Legame bond-slip P2C2BCN10')
xlabel('s [mm]')
ylabel('\tau[MPa]')
grid on
legend('Dati sperimentali','Malvar')
set(legend,'Location','SouthEast');
subplot 223
```

7. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI E CALIBRAZIONE DEI MODELLI TEORICI

```
plot(x, y, '.', xm, yBPEarea, 'k', xu, y2_cf_BPE, 'k')
title('Legame bond-slip P2C2BCN10')
xlabel('s [mm]')
ylabel('\tau[MPa]')
grid on
legend('Dati sperimentali', 'BPE Modified')
set(legend, 'Location', 'SouthEast');
figure(2)
subplot 221
plot(x, y, '.', xm, yBPEarea, 'k', x, yMalv, 'r', xu, y2_cf_BPE, 'k')
title('Legame bond-slip P2C2BCN10')
xlabel('s [mm]')
ylabel('\tau[MPa]')
grid on
legend('Dati sperimentali', 'BPE Modified', 'Malvar')
set(legend, 'Location', 'SouthEast');
figure(2)
subplot 222
plot(xm, ym, '.', xm, yCMR, xm, yBPEarea, 'k', xm, yMalv1, 'r')
title('Ramo ascendente del legame bond-slip P2C2BCN10')
xlabel('s [mm]')
ylabel('\tau[MPa]')
grid on
legend('Dati sperimentali', 'CMR', 'BPE Modified', 'Malvar')
set(legend, 'Location', 'SouthEast');
```

8. CONCLUSIONI

In questa tesi è stato affrontato un tema innovativo nel mondo dell'edilizia, e particolarmente interessante per il rinforzo e il consolidamento strutturale.

Le barre in FRP presentano molti vantaggi rispetto alle tradizionali barre in acciaio, per cui stanno prendendo sempre più piede nella progettazione strutturale, nonostante i costi ancora alquanto elevati.

L'indagine sperimentale condotta in questa tesi ha lo scopo di determinare il comportamento dell'aderenza di queste barre in materiale composito nel calcestruzzo. La condizione di perfetta aderenza barra-calcestruzzo, infatti, rappresenta un'ipotesi fondamentale di calcolo per la progettazione con il metodo semiprobabilistico agli stati limite.

Perciò sono state eseguite delle prove sperimentali di pull-out su provini caratterizzati da: diverse tipologie di calcestruzzo, diversi diametri delle barre, diverse deformazioni superficiali e diverse condizioni di copriferro. Queste sono le variabili principali da cui dipende il fenomeno dell'aderenza; al variare di tali parametri sono pervenuti risultati differenti. Oggetto di queste prove sono state le barre pultruse in fibra di carbonio (CFRP) e le tradizionali barre in acciaio.

I risultati ottenuti dall'indagine sperimentale condotta nel laboratorio LISG dell'Università di Bologna portano alle seguenti considerazioni.

Le barre lisce in CFRP sono inadeguate per l'utilizzo in strutture di cemento armato. Infatti il legame tensione tangenziale – scorrimento di tali barre mostra valori molto bassi di tensioni di aderenza, dovuta quasi esclusivamente all'attrito tra le due interfacce. Si sono ottenuti per queste barre valori inferiori a quelli relativi alle barre lisce in acciaio, a causa probabilmente della minore adesione chimica prodotta tra le due interfacce.

Diversamente, per le barre ad aderenza migliorata, il filamento di fibra di carbonio che avvolge la barra porta decisamente a migliori risultati di aderenza rispetto alle barre lisce. Per il calcestruzzo R_{ck} 25MPa si hanno valori di tensione tangenziale massima inferiori a quelle delle barre in acciaio, che

disponevano di una deformazione superficiale molto più accentuata. Con questo tipo di calcestruzzo avviene il collasso per la rottura dei denti di calcestruzzo interposti tra le nervature delle barre, sia per le barre in CFRP, sia per quelle in acciaio.

Utilizzando invece un calcestruzzo più resistente, $R_{ck}=35\text{MPa}$, si ottiene, oltre ad un aumento notevole di aderenza, anche una diversa modalità di collasso, in quanto il filamento in fibra di carbonio che avvolge la barra si stacca bruscamente, determinando in tal modo una rottura di tipo fragile, mentre il calcestruzzo a contatto con la barra non è stato macinato.

Le prove sulle barre con diametro maggiore invece hanno portato, contrariamente a quanto ci si aspettava, a valori di tensioni tangenziali massime maggiori rispetto a quelli delle barre con diametro minore.

Infine nelle prove di splitting l'avanzamento della barra ha causato la propagazione delle fessurazioni fino in superficie, arrivando così al collasso per espulsione del copriferro. Si è quindi constatato che un buon confinamento prodotto dal calcestruzzo circostante la barra, porta a risultati notevolmente migliori rispetto ad un confinamento esercitato da un copriferro di soltanto due centimetri.

Sono state poi considerate tre formulazioni analitiche per rappresentare il comportamento del fenomeno dell'aderenza, calibrando tali modelli sui risultati sperimentali ottenuti. Il modello Malvar, che è in grado di riprodurre l'intera curva costitutiva $\tau-s$ mediante una sola relazione, sembra il meno affidabile, soprattutto per modellare il ramo ascendente del diagramma; il CMR Model invece è risultato il più adeguato nel simulare tale tratto, ma non prevede la modellazione del resto della curva; il Modified BPE Model, in cui si utilizzano due equazioni, sembra il più attendibile nel riprodurre l'intera curva, ma con minor precisione nel primo tratto.

Per concludere, nonostante le tantissime peculiarità delle barre in FRP nella progettazione strutturale, l'aderenza di queste nel calcestruzzo rimane, a mio parere, un aspetto delicato e non generalizzabile, a causa dell'elevata quantità di variabili da cui questa dipende.

9. ALLEGATI

In questo capitolo sono riportate le schede tecniche dei materiali utilizzati:

- Tondino pultruso in fibra di carbonio a matrice epossidica per l'armatura di rinforzo ad elevate prestazioni di opere e strutture murarie, SEICO Compositi s.r.l.
- Cemento Tipo II/A-LL 42,5 R, Buzzi Unicem
- Misto Getto 0-14 mm , Bacchi S.p.a

TONDINO UD

Tondino pultruso in fibra di carbonio a matrice epossidica per l'armatura di rinforzo ad elevate prestazioni di opere e strutture murarie



DESCRIZIONE

Le barre di tondo in carbonio vengono usate a completamento dei sistemi di rinforzo in materiali compositi (es. chiodature passanti e non) e nell'armatura di manufatti in fase di realizzo o di restauro (es. innesti armati sintetici in travi di legno). Le barre di tondo in carbonio possono essere fornite nella versione liscia o nella nostra versione speciale ad aderenza migliorata che prevede la formazione del prodotto in assenza di sostanze distaccanti: la particolare formula della resina epossidica usata conferisce al prodotto una migliore adesione al supporto incollante. Inoltre dei filamenti di carbonio avvolti elicoidalmente al prodotto ne danno la giusta configurazione superficiale per una ideale rugosità e adesione alla resina.

Tondino UD
Mod. da mm 8/10/12

CARATTERISTICHE DEI TONDINI IN CARBONIO

- Alta resistenza a trazione
- Alto modulo elastico
- Eccezionale rapporto rigidità leggerezza
- Stabilità dimensionale
- Resistenza alla corrosione chimica
- Resistenza all'attrito e all'usura
- Assorbimento delle vibrazioni

NOTE LEGALI:

I consigli tecnici relativi all'impiego, che noi forniamo verbalmente o per iscritto come assistenza al cliente o all'applicatore in base alle nostre esperienze, corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono impegnativi e non dimostrano alcuna relazione legale contrattuale né obbligo accessorio col

contratto di compravendita. Essi non dispensano l'acquirente dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto concerne la loro idoneità relativamente all'uso previsto. Per il resto sono valide le nostre condizioni commerciali. Il contenuto della presente scheda si ritiene vincolante per quanto sopra ai fini della veridicità del contenuto, solo se corredata di apposito timbro e di controfirma apposti presso la ns. sede e da personale delegato a quanto sopra. Difformità dall'originale predetto per contenuto e/o utilizzo non implicherà alcuna responsabilità da parte della società SEICO COMPOSITI srl. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che la presente scheda E GLI EVENTUALI VALORI RIPORTATI siano validi per la partita di prodotto di suo interesse e non siano superati in quanto sostituiti da edizioni successive E/O NUOVE FORMULAZIONI DEL PRODOTTO. Nel dubbio, contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.

CARATTERISTICHE FILATO

N° filamenti			Resistenza a trazione			Modulo elastico			Densità (gr/cm ³)			Allungamento %		
Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12
24K	24K	24K	MPa 4200	MPa 4200	MPa 4200	GPa 234	GPa 234	GPa 234	1,8	1,8	1,8	2,0	2,0	2,0

DIMENSIONI PRODOTTO

CARATTERISTICHE FONDAMENTALI	UNITA' DI MISURA	TONDO LISCIO			TONDO CON ADERENZA MIGLIORATA		
		Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12
Diametro tondo (D)	mm	8	10	12	8	10	12
Area nominale (A)	mm ²	50,2	78,5	113	50,2	78,5	113
Perimetro nominale (P)	mm	25,1	31,4	37,7	25,1	31,4	37,7

CARATTERISTICHE TEORICHE PRODOTTO

PROPRIETÀ PRODOTTO	UNITA' DI MISURA	TONDO LISCIO			TONDO CON ADERENZA MIGLIORATA		
		Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12	Ø mm 8	Ø mm 10	Ø mm 12
Modulo di elasticità normale a trazione (E)	GPa	152	152	152	98	98	98
Resistenza alla trazione (f _t)	MPa	2590	2590	2590	1680	1680	1680
Deformazione a rottura (ε _r)	%	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Tensione di rottura (F _u)	KN	130	203	293	84	132	190
Contenuto fibra (V _{FB})	mm ²	32,6	51	73,5	25,1	32,6	73,5

segue → →



SEICO COMPOSITI s.r.l.

via G. Palatucci, 7/6 | 47122 Forlì (FC)

T. +39 0543 729919 | F. +39 0543 729955

www.seicocompositi.it info@seicocompositi.it



info@carbon-compositi.it

www.carbon-compositi.it

SCHEMA TECNICA PRODOTTO

 Cemento Tipo/Classe: **II/A-LL 42,5 R**

 Standard di Riferimento **UNI EN 197-1**

 Stabilimento di: **Travesio**

 Marcatura CE **0970-CPD-0172/CE/0202**

CARATTERISTICHE CHIMICHE

Determinazioni:	Unità di misura	Metodo di prova	Valori Tipici di Riferimento
Perdita al fuoco	(%)	UNI EN 196-2	-
Residuo insolubile	(%)		-
Solfati	(%)		3,5
Cloruri	(%)		0,040
Cromo VI solubile in acqua	(%)	UNI EN 196-10	<0,0002
Saggio pozzolanicità		UNI EN 196-5	-

CARATTERISTICHE FISICHE

Stabilità di volume	(mm)	UNI EN 196-3	0
Tempo di inizio presa	(min)		150
Spandimento	(%)	UNI 7044	90
Superficie specifica	(cm ² /g)	UNI EN 196-6	3600

RESISTENZE MECCANICHE

Resistenze a compressione dopo:		UNI EN 196-1	
2 giorni	(MPa)		29,0
7 giorni	(MPa)		-
28 giorni	(MPa)		51,0

Emissione	Data	Doc. n.	Approvazione
DQ/AT	01/01/2014	STPST01TRA2AL4R	<i>Massimo Veglia</i>

 Note:

I valori contenuti nel presente documento sono indicativi delle caratteristiche medie della produzione corrente su base annua e non costituiscono impegno di alcun tipo; possono essere modificati ad insindacabile giudizio del produttore senza preavviso ed obbligo alcuno di comunicazione specifica. Riproduzione vietata. Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte del seguente documento può essere riprodotta o diffusa con un mezzo qualsiasi, fotocopie, microfilm o altro, senza il consenso scritto della Buzzi Unicem S.p.A. .

MISTO GETTO

DEL FIUME PO



1381-CPD-MI-048

Codice	
S107SAC	

Peso del sacco in polietilene: 25 Kg
 Sacchi per ogni pallet: n° 70
 Peso del pallet: 1750 Kg

Descrizione prodotto:

Miscela di sabbia silicea naturale, lavata e vagliata, proveniente solo da cave di sabbia finalizzate alla riqualificazione delle aree golenali del fiume Po.

Dimensioni: 0 ÷ 14 mm

Granulometria:

Setaccio	Passante (% peso)
20	100
14	95
12.5	90
8	75
4	52
2	36
1	24
0,063	0,9



Applicazioni:

- Formazione di malta per calcestruzzi sia strutturali grezzi che a faccia vista;
- Getti in calcestruzzo armato, riempimenti di fondazioni, di fognature, manufatti in genere, ecc.



Disponibile anche in BigBag da circa 1 m³ (1600 Kg)

Codice	
S107BIG	



CARATTERISTICHE:

NORMATIVA UNI EN 12620

Granulometria	G _A 90
Forma dei granuli	FI ₁₅ SI ₁₅
Massa volumica dei granuli	2,74 Mg/m ³
Assorbimento d'acqua	1,73 %
Massa volumica in mucchio	1,782 Mg/m ³
Qualità dei fini	Quantità < 3%
Contenuto di fini	f ₃
Resistenza alla frammentazione	LA ₂₅
Resistenza all'usura	M _{DE} 20
Durabilità gelo/disgelo	F ₁
Contenuto di cloruri	0,0016 %
Contenuto di solfati solubili in acido	AS _{0,2}
Contenuto di zolfo totale	Quantità < 1%
Contenuto di sostanza umica	Assente
Reattività alcali-silice	Non reattivo
Sostanze pericolose	Assenti
Classificazione petrografica	Sabbia eterogenea di composizione prevalentemente silicatica (arenarie, rocce magmatiche, metamorfiti, selce, quarzo, miche, plagioclasti) e subordinatamente calcarea (calcarei e dolomie).

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Achillides Z., Pilakoutas K., (2004), “*Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions*”, J. Comp. Constr., 8, pp. 173-181.
- [2] Arduini M., Nicoletti A., Corrado P., “*Il rinforzo con materiali compositi fibrosi FRP per strutture in cemento armato, muratura, legno*”, Maggioli editore, Rimini, 2010.
- [3] Borruto A., “*Meccanica della frattura*”, Hoepli, 2002.
- [4] Brigante D., “*Strutture in legno rinforzate con FRP*”, Grafill s.r.l. editore, Palermo, 2013.
- [5] Clementi F., Lenci S., “*I compositi nell’ingegneria strutturale- L’adeguamento statico e sismico di strutture in c.a. e muratura secondo il CNR-DT 200/2004, la NTC e le relative circolari applicative*”, Società editrice Esculapio, Bologna, 2009.
- [6] Collepari M., “*Scienza e tecnologia del calcestruzzo*”, Hoepli editore, 1991.
- [7] Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R., (1995), “*Analytical modelling of bond between FRP reinforcing bars and concrete*”, Taerwe L. editor. Nonmetallic (FRP) reinforcement for concrete structures, London, pp. 164-171.
- [8] Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R., (1996), “*Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars*”, Proc., 2nd Int. Conf. on Advanced Compos. Mat. In Bridge struct., M. El-Badry ed.

- [9] Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R., (1997), “*Behavior and modelling of bond of FRP rebars to concrete*”, J. Comp. Constr., 1, pp. 40-51.
- [10] Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R., Pecce M., (2001), “*Experimental and analytical evaluation of bond properties of FRP bars*”, J. Mater. Civ. Eng., 13, pp. 282-290.
- [11] Eligehausen R., Popov E. P., Bertero V. V., (1983), “*Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations*”, Rep. N° 83/23, Earthquake Eng. Res. Ctr. (EERC), Univ. of California, Berkeley, California.
- [12] Fib CEB-FIP, “*Bond of reinforcement in concrete*”, Bulletin 10, 2000.
- [13] Fib CEB-FIP, “*FRP reinforcement in RC structures*”, Bulletin 40, 2007.
- [14] Gravina R. J., Smith S. T., (2008), “*Flexural behaviour of indeterminate concrete beams reinforced with FRP bars*”, Eng. Struct. 30, pp. 2370-2380.
- [15] Gugliotta A., “*Introduzione alla meccanica della frattura lineare elastica*”, Levrotto & Bella editrice, Torino, 2002.
- [16] Round Robin Tests, “*Development of guidelines for the design of concrete structures, reinforced, prestressed or strengthened with advanced composites-Technical Specifications on Pullout and Splitting Test*”, CONFIBRECRETE, University of Sheffield, 2000.
- [17] Malvar L. J., (1994), “*Bond Stress-Slip Characteristics of FRP rebars*”, TR-2013-SHR – Naval facilities engineering service center. Port Hueneme, CA.

- [18] Rossetti A., Galeota D., Giammatteo M., (1995), “*Local bond Stress-Slip relationships of glass fibre reinforced plastic bars embedded in concrete*”, *Materials and Structures*, 28, pp. 340-344.
- [19] Tepfers R., (1973), “*A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars*”, Phd thesis. Work N°723, Publication N° 73:2. Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- [20] Tepfers R., Karlsson M., (1997), “*Pull-out and tensile reinforcement splice tests using FRP CBARs*”, Chalmers University of Technology, Division of Building Technology. Work N° 13. Publication N° 97:2, Göteborg, Sweden.

NORMATIVE DI RIFERIMENTO:

- [21] ACI 440.1R-06, “*Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*”.
- [22] ACI 440.3R-04, “*Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*”.
- [23] CNR-DT 200/2004, “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. Materiali , strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*”, CNR, Roma, 2004.
- [24] CNR-DT 203/2006, “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito Fibrorinforzato*”, CNR, Roma, 2007.

- [25] CNR-DT 200 R1/2013, “*Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. Materiali , strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*”, CNR, Roma, 2013.
- [26] D.M. 14 gennaio 2008, “*Norme Tecniche per le Costruzioni*”, G.U. 4 febbraio 2008, n.29, Ministero delle Infrastrutture, dell’Interno e Dip. Protezione Civile, Roma, 2008.
- [27] Fib CEB-FIP, “*Model Code 1990*”, 1990.
- [28] Fib CEB-FIP, “*Model Code 2010*”, 2010.
- [29] Linee Guida LLPP 24/07/2009, “*Linee guida per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP*”, Assemblea Generale Consiglio Superiore LL.PP, Roma, 2009.

Ringraziamenti

Sono tante le persone a cui vorrei dire grazie per avermi accompagnato in questo percorso seguendo tutta, o anche solo in parte, la strada per giungere al tanto atteso traguardo.

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Giovanni Pascale, Relatore, per aver accettato di seguirmi durante la preparazione di questa tesi di laurea e di essere sempre stato disponibile e cordiale per ogni eventualità.

Grazie allo studio associato di Ingegneria “Perazzini & Pierini” nel quale ho avuto la straordinaria opportunità di effettuare il tirocinio didattico. È stato questo per me un momento molto formativo, sia da un punto di vista professionale che umano, prendendo parte attivamente a quello che spero sarà il mio futuro lavorativo.

In particolare vorrei ringraziare l’Ing. Christian Pierini, Correlatore, per essersi reso più che disponibile nella scelta e nella preparazione della mia tesi di laurea. Il suo prezioso aiuto mi ha permesso di arrivare qui oggi, di appassionarmi e specializzarmi sempre di più in questa materia.

Grazie anche al responsabile del laboratorio LISG, il sig. Carli Roberto, che ha avuto un ruolo fondamentale nella parte tecnica delle prove sperimentali.

Non posso non ringraziare i miei genitori Francesca e Antonio per il sostegno dimostratomi in questi anni, per la fiducia, l’affetto, i consigli e l’opportunità di imparare dai miei errori. Mio fratello Vincenzo con il quale condivido buona parte delle mie passioni e sul quale posso sempre contare.

I miei amici: Andrea, Matteo, Giacomo, Lorenzo, Belinda, Mattia, Luca, Ivan, Matteo e Marco perché con loro le fatiche si possono dividere e le gioie raddoppiare. Vi ringrazio per avermi sempre supportato e spronato senza mai giudicarmi, per tutti i bei momenti passati insieme, con alcuni di voi fin da piccoli con altri fin dalle scuole superiori e spero che, nonostante ci troviamo spesso davanti a delle tappe che impongono significative scelte nella nostra vita, queste ultime non siano occasione di allontanamento, ma al contrario ancora una volta di cammino insieme.

Grazie alla famiglia Montanari per avermi calorosamente accolto nella loro casa e supportato in ogni circostanza.

Grazie a tutto lo staff dell'agriturismo San Paolo di Rimini in cui da tanti anni lavoro. Siete stati sempre disponibili nei miei confronti e se sono arrivato dove volevo essere, il merito è anche vostro.

Un pensiero va al progetto Erasmus che ho avuto l'opportunità di intraprendere nell'Università Politecnica di Valencia, in Spagna. Questi mesi vissuti all'estero sono stati davvero indimenticabili. L'Università è stata molto ospitale e mi ha permesso di ampliare le mie conoscenze, sia sulle specifiche materie di studio, sia sull'apprendimento della lingua spagnola. L'esperienza si è rivelata una sfida vincente. Grazie a tutti i miei compagni di viaggio che sono diventati come una famiglia.

Infine un grazie con immenso affetto va alla mia fidanzata Miriam per aver condiviso con me questa esperienza e questi ultimi anni, per non aver mai dubitato di me e per avermi sempre incoraggiato e supportato in ogni occasione.