



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea Marzo 2026

Dal campo al cantiere: corde da tennis riciclate come rinforzo per calcestruzzo

Relatori:

Prof. Ing. Gabriele Bertagnoli

Prof. Ing. Pier Paolo Riviera

Candidato:

Angelo Gaetano

ABSTRACT

L'impiego diffuso di materiali plastici di natura polimerica, e la loro contestuale limitata biodegradabilità, rende prioritario lo sviluppo di strategie di recupero per flussi di rifiuti plastici non sempre facilmente riciclabili. In tale contesto, le corde per racchette da tennis costituiscono un caso di studio significativo: realizzate prevalentemente in poliestere o polimeri complessi e soggette a sostituzioni frequenti per esigenze prestazionali (dopo circa 10-20 ore di gioco), generano volumi rilevanti di rifiuti plastici speciali la cui valorizzazione è ancora marginale, anche per la carenza di tecnologie dedicate alla filiera del loro riutilizzo sul territorio italiano.

La presente tesi propone un approccio di reimpiego orientato al mantenimento della struttura originaria del materiale, sfruttandone le proprietà meccaniche residue e la geometria filiforme. Le corde esauste vengono, infatti, trasformate in fibre di riciclo di lunghezza definita, evitando trattamenti chimico-termici e ottenendo un prodotto con caratteristiche morfologiche e compositive comparabili alle fibre sintetiche commerciali impiegate nel calcestruzzo fibrorinforzato. L'obiettivo, infatti, è stato verificare la loro efficacia come rinforzo della matrice cementizia, in termini di controllo della fessurazione e miglioramento della risposta post-fessurativa.

La validazione sperimentale si è basata su dieci miscele cementizie differenziate per dimensioni, tipologia e dosaggio di fibre. Sono stati confezionati 39 provini cubici e cilindrici e 29 campioni prismatici, sottoposti a prove di compressione, trazione e flessione. I risultati hanno evidenziato un contributo positivo delle fibre da corde riciclate, con prestazioni assimilabili ai rinforzi sintetici tradizionali nel limitare l'apertura delle fessure e incrementare la duttilità in post-fessurazione.

Ulteriori prospettive di ricerca risiedono nella valutazione della resistenza al fuoco del calcestruzzo fibrorinforzato con fibre ricavate dalle corde esauste. La natura polimerica di tali fibre suggerisce, infatti, la loro potenziale efficacia nel contrastare lo spalling esplosivo del calcestruzzo in caso di incendio. La fusione delle fibre a temperature relativamente basse crea una rete capillare di canali di sfogo, riducendo le pressioni interne che causerebbero altrimenti il distacco violento degli strati superficiali di calcestruzzo, preservandone l'integrità in caso di incendio.

La ricerca conferma pertanto la fattibilità tecnica del reimpiego e ne evidenzia il potenziale come soluzione di riciclo a ridotto impatto ambientale, individuando indicazioni utili alla definizione della configurazione ottimale (morfologia e dosaggio) per la massimizzazione delle prestazioni del composito cementizio.

INDICE

Abstract.....	1
1 Introduzione.....	17
1.1 Fondamenti e meccanismi di funzionamento del calcestruzzo fibrorinforzato .	17
1.2 frc come risorsa per il riciclo dei rifiuti plastici	19
1.2.1 Difficoltà di riciclo delle corde sintetiche.....	20
2 Il calcestruzzo fibrorinforzato (frc).....	23
2.1 Principi di base.....	23
2.2 Prestazioni e proprietà meccaniche.....	24
2.2.1 Il legame costitutivo del calcestruzzo fibrorinforzato.....	27
2.2.2 La dipendenza delle proprietà meccaniche da concentrazione e orientamento delle fibre.....	28
2.2.3 Influenza delle fibre sul comportamento a compressione del calcestruzzo....	30
3 Studi preliminari	33
3.1 Effetti generali delle fibre sintetiche sul comportamento meccanico del calcestruzzo fibrorinforzato.....	34
3.2 Influenza dell'aggiunta di fibre sulla lavorabilità della miscela cementizia	35
3.3 Interazione chimica tra fibre sintetiche ed alcalinità del calcestruzzo	36
4 Materiali impiegati per le operazioni sperimentali	39
4.1 Calcestruzzo strutturale predosato	40
4.2 Aggregati lapidei, acqua di impasto e additivi	43
4.3 Miscela di riferimento standardizzata	45
5 Fibre sintetiche ricavate dalle corde delle racchette da tennis.....	47
5.1 Caratterizzazione delle corde: analisi dei materiali e geometria	48
5.1.1 Classificazione dei materiali	48
5.1.2 Geometria e calibro	50
5.1.3 Proprietà meccaniche.....	51
5.2 Tipologie di corde impiegate per la ricerca.....	53
6 Procedure di produzione delle fibre e dei campioni in calcestruzzo.....	59
6.1 Produzione e caratterizzazione geometrica delle fibre	59
6.2 Mix design e confezionamento dei campioni in calcestruzzo fibrorinforzato	64
6.2.1 Realizzazione delle miscele di calcestruzzo fibrorinforzato	66
7 Caratterizzazione sperimentale del calcestruzzo fibrorinforzato	73

7.1	Programma sperimentale e metodologie di prova.....	73
7.2	Prove di compressione	75
7.3	Prove di trazione indiretta.....	78
7.4	Prove di flessione	81
8	Risultati sperimentali.....	85
8.1	Analisi del comportamento a compressione.....	88
8.1.1	Campioni serie "G1-Nostrings".....	88
8.1.2	Campioni serie "G2 - STR30B (0.25)".....	90
8.1.3	Campioni serie "G3 - STR30B (0.50)".....	92
8.1.4	Campioni serie "G4 - STR30B (1.00)".....	94
8.1.5	Campioni serie "G5 - STR20B (0.25)".....	96
8.1.6	Campioni serie "G6 - STR20B (0.50)".....	98
8.1.7	Campioni serie "G7 - STR20B (1.00)".....	100
8.1.8	Campioni serie "G8 - STR30M (0.25)".....	102
8.1.9	Campioni serie "G9 - STR30M (0.50)".....	105
8.1.10	Campioni serie "G10 - STR30M (1.00)".....	107
8.2	Confronto globale dei risultati a compressione.....	110
8.2.1	L'influenza della tipologia di fibre sul comportamento a compressione	115
8.3	Analisi del comportamento a trazione.....	117
8.3.1	Campioni serie "G1-Nostrings".....	118
8.3.2	Campioni serie "G2 - STR30B (0.25)".....	120
8.3.3	Campioni serie "G3 - STR30B (0.50)".....	122
8.3.4	Campioni serie "G4 - STR30B (1.00)".....	123
8.3.5	Campioni serie "G5 - STR20B (0.25)".....	125
8.3.6	Campioni serie "G6 - STR20B (0.50)".....	127
8.3.7	Campioni serie "G7 - STR20B (1.00)".....	128
8.3.8	Campioni serie "G8 - STR30M (0.25)".....	130
8.3.9	Campioni serie "G9 - STR30M (0.50)".....	131
8.3.10	Campioni serie "G10 - STR30M (1.00)".....	132
8.4	Confronto globale dei risultati a trazione.....	134
8.4.1	L'influenza della tipologia di fibre sul comportamento a trazione	141
8.5	Analisi del comportamento a flessione.....	144
8.5.1	Campioni serie "G1-Nostrings".....	149

8.5.2	Campioni serie "G2 - STR30B (0.25)"	153
8.5.3	Campioni serie "G3 - STR30B (0.50)"	158
8.5.4	Campioni serie "G4 - STR30B (1.00)"	162
8.5.5	Campioni serie "G5 - STR20B (0.25)"	166
8.5.6	Campioni serie "G6 - STR20B (0.50)"	170
8.5.7	Campioni serie "G7 - STR20B (1.00)"	174
8.5.8	Campioni serie "G8 - STR30M (0.25)"	178
8.5.9	Campioni serie "G9 - STR30M (0.50)"	182
8.5.10	Campioni serie "G10 - STR30M (1.00)"	186
8.6	Confronto globale dei risultati a flessione.....	190
8.6.1	L'influenza della tipologia di fibre sul comportamento a flessione.....	197
8.6.2	Definizione della classe di resistenza dei vari FRC contenuti fibre riciclate...	199
9	Prospettive future e ulteriori scenari di impiego delle fibre	201
9.1	Resistenza al fuoco del calcestruzzo fibrorinforzato	201
9.2	Miglioramento dell'aderenza all'interfaccia tra fibre e calcestruzzo.....	203
9.3	Capacità di controllo del ritiro del calcestruzzo.....	204
9.4	Ibridazione con altre tipologie di fibre di rinforzo e impiego in elementi in calcestruzzo armato	205
10	Conclusioni	207
11	Bibliografia.....	213
12	Sitografia.....	215
13	Appendice	217

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1: corde delle racchette da tennis convertite in fibre di rinforzo.	21
Figura 2-1: Miscela di FRC prodotta in laboratorio: particolare della distribuzione delle fibre sintetiche nella pasta cementizia.	24
Figura 2-2: Tipica curva di una prova di flessione condotta secondo la EN 14651 (fonte: Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC).....	26
Figura 2-3: legame costitutivo sforzo-apertura fessura, modello lineare [2]	27
Figura 2-4: legame costitutivo sforzo-apertura fessura, modello rigido-plastico [2].....	27
Figura 2-5: esempio di differente orientamento delle fibre rispetto alle fessure (immagine generata con IA).....	29
Figura 2-6: esempio di effetto confinamento generato dalle fibre distribuite all'interno del cubo sottoposto a compressione (immagine generata con IA)	30
Figura 4-1: produzione dei campioni tramite miscelazione dei componenti del calcestruzzo in betoniera	40
Figura 4-2: sacco di calcestruzzo predosato "Betonpiù" prodotto da GrasCalce e utilizzato per la produzione dei campioni da testare	41
Figura 4-3: vista dei componenti del calcestruzzo predosato contenuti nel sacco di "Betnpiù" suddiviso in due scompartimenti.....	42
Figura 4-4: granulato di origine naturale con diametro $8\text{ mm} \leq D \leq 12\text{ mm}$ inserito nel mix design della miscela	43
Figura 5-1: vista accurata della struttura delle tre principali tipologie di corde presenti in commercio (immagine realizzata con IA).....	49
Figura 5-2: vista di due corde con sezione trasversale diversa sia per forma che per calibro	50
Figura 6-1: fibre ricavate da STR 1 - Black	60
Figura 6-2: lunghezze di riferimento impiegate per le fibre	62
Figura 6-3: fibre omogenee STR 1 – Black lunghe 30 mm	62
Figura 6-4: fibre omogenee STR 1 - Black lunghe 20 mm	63
Figura 6-5: fibre eterogenee ricavate da corde miste, lunghezza 30 mm	63
Figura 6-6: quantitativo di calcestruzzo e casseri impiegati per ogni getto.....	67
Figura 6-7: betoniera a bicchiere utilizzata per la realizzazione dei getti in laboratorio	71
Figura 7-1: vista di un provino cubico (150x150x150 mm) prodotto per l'attività di ricerca svolta	76
Figura 7-2: test di compressione su campioni cubici eseguito presso il laboratorio MastrLAB.....	77
Figura 7-3: test di trazione indiretta su campioni cilindrici eseguito presso il laboratorio MastrLAB.....	79
Figura 7-4: provino cilindrico sottoposto a trazione indiretta. Particolare della fessurazione diametrale e delle fibre che si oppongono alla sua apertura	80
Figura 7-5: casseforme metalliche (100x100x500 mm) utilizzate per la produzione dei campioni prismatici.....	81

Figura 7-6: dispositivo di applicazione del carico per la prova di flessione su 4 punti (fonte: Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato)	82
Figura 7-7: vista del sistema di carico e misurazione utilizzato per le prove di flessione..	83
Figura 8-1: esempio esplicativo della nomenclatura utilizzata	86
Figura 8-2: Tre provini cubici facenti parte della serie con miscela priva di fibre (G1-Nostrings).....	88
Figure 8-3: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G1-Nostrings	89
Figure 8-4: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G2-STR30B (0.25)	91
Figura 8-5: vista interna di un campione cubico della serie G2-STR30B (0.25) post rottura per compressione.....	92
Figura 8-6: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G3-STR30B (0.50)	93
Figura 8-7: vista interna di un campione cubico della serie G3-STR30B (0.50) post rottura per compressione.....	94
Figura 8-8: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G4-STR30B (1.00)	95
Figura 8-9: vista interna di un campione cubico della serie G4-STR30B (1.00) post rottura per compressione.....	96
Figura 8-10: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G5-STR20B (0.25)	97
Figura 8-11: vista interna di un campione cubico della serie G5-STR20B (0.25) post rottura per compressione.....	98
Figura 8-12: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G6-STR20B (0.50)	99
Figura 8-13: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G7-STR20B (1.00)	101
Figura 8-14: fibre visibili sulla faccia del provino cubico sottoposto a test di compressione	101
Figura 8-15: vista interna di un campione cubico della serie G7-STR20B (1.00) post rottura per compressione.....	102
Figura 8-16: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G8-STR30M (0.25).....	103
Figure 8-17: fibre miste di diverso colore osservabili internamente ad un campione cubico della serie G8-STR30M (0.25) post rottura per compressione.....	104
Figura 8-18: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G9-STR30M (0.50).....	106
Figura 8-19: vista interna di un campione cubico della serie G9-STR30M (0.50) post rottura per compressione.....	107
Figura 8-20: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G10-STR30M (1.00).....	108

Figura 8-21: vista interna di un campione cubico della serie G10-STR30M (1.00) post rottura per compressione	109
Figura 8-22: cubo aperto per osservare la distribuzione delle fibre miste nella sezione centrale.....	109
Figura 8-23: resistenza media a compressione dei differenti dosaggi a parità di tipologia di fibre (STR30B)	110
Figura 8-24: andamento della resistenza media a compressione in funzione del dosaggio (STR30B).....	111
Figura 8-25: resistenza media a compressione dei differenti dosaggi a parità di tipologia di fibre (STR20B)	112
Figura 8-26: andamento della resistenza media a compressione in funzione del dosaggio (STR20B).....	113
Figura 8-27: resistenza media a compressione dei differenti dosaggi a parità di tipologia di fibre (STR30M)	114
Figura 8-28: andamento della resistenza media a compressione in funzione del dosaggio (STR30M)	115
Figura 8-29: confronto tra le resistenze compressione a parità di dosaggio di fibre (0.25%)	115
Figura 8-30: Tre provini cilindrici facenti parte della serie con miscela priva di fibre (G1-Nostrings).....	118
Figura 8-31: cilindro senza fibre diviso in due frammenti in seguito a rottura per prova di trazione indiretta	119
Figura 8-32: campione cilindrico fessurato ma tenuto chiuso dall'effetto di collegamento dovuto alle fibre.....	121
Figura 8-33: distribuzione delle fibre nella sezione di rottura.....	121
Figura 8-34: campione cilindrico aperto forzatamente. Particolare dei frammenti trattenuti insieme dall'azione delle fibre	123
Figura 8-35: campioni cilindrici fessurati ma tenuti chiusi dall'effetto di collegamento dovuto alle fibre.....	124
Figura 8-36: vista delle fibre, in situazione di massimo dosaggio, distribuite lungo la sezione di rottura.....	125
Figura 8-37: campioni della serie G5-STR20B (0.25) fessurati ma tenuti chiusi dall'azione delle fibre	126
Figura 8-38: vista della sezione di rottura del campione rinforzato con fibre lunghe 20 millimetri	126
Figura 8-39: vista in sezione delle fibre da 20 millimetri distribuite lungo la fessura diametrale.....	128
Figura 8-40: distribuzione delle fibre, da 20 mm e in massimo dosaggio, lungo la sezione di rottura.....	129
Figura 8-41: vista del campione cilindrico della serie G7-STR20B (1.00) aperto lungo la fessura diametrale	129
Figura 8-42: distribuzione delle fibre miste all'interno del provino cilindrico della serie G8-STR30M (0.25).....	131

Figura 8-43: fessura di ampiezza ridotta osservabile su campioni della serie G9-STR30M (0.50) post prova di trazione indiretta	132
Figura 8-44: dettaglio della dispersione delle fibre miste con massimo dosaggio all'interno del provino cilindrico (aperto post-prova)	133
Figura 8-45: resistenza media a trazione dei differenti dosaggi (STR30B) a parità di tipologia di fibre	135
Figura 8-46: andamento della resistenza media a trazione in funzione del dosaggio (STR30B)	135
Figura 8-47: confronto interno tra i campioni rinforzati con dosaggi differenti di fibre da 30 mm (da sinistra: fibre assenti, 0.25% in peso, 0.50% in peso, 1.00% in peso).....	136
Figura 8-48: resistenza media a trazione dei differenti dosaggi (STR20B) a parità di tipologia di fibre	137
Figura 8-49: andamento della resistenza media a trazione in funzione del dosaggio (STR20B)	138
Figura 8-50: resistenza media a trazione dei differenti dosaggi (STR30M) a parità di tipologia di fibre	139
Figura 8-51: andamento della resistenza media a trazione in funzione del dosaggio (STR30M)	140
Figura 8-52: confronto tra le resistenze a trazione a parità di dosaggio di fibre (0.25%)..	141
Figura 8-53: rappresentazione della configurazione di prova utilizzata per i test a flessione	145
Figura 8-54: particolare del sistema di trasduttori in grado di misurare la freccia in mezzeria e l'allungamento all'intradosso.....	145
Figura 8-55: esempio che mostra l'andamento dei dati prima e dopo il tratto discendente dovuto alla fessurazione.....	147
Figura 8-56: campioni privi di fibre portati a rottura per flessione	149
Figura 8-57: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G1-Nostrings	150
Figura 8-58: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G1-Nostrings..	150
Figura 8-59: correlazione dell'allungamento all'intradosso con carico e sforzo. Campioni G1-Nostrings.....	152
Figura 8-60: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G1-Nostrings.....	152
Figura 8-61: test di flessione su un campione della serie G2-STR30B (0.25). Vista della fessura formatasi in mezzeria.....	153
Figura 8-62: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G2-STR30B (0.25)	154
Figura 8-63: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G2-STR30B (0.25)	154
Figura 8-64: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	155
Figura 8-65: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione.....	156
Figura 8-66: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G2-STR30B(0.25).....	156

Figura 8-67: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G3-STR30B (0.50).....	158
Figura 8-68: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G3-STR30B (0.50)	159
Figura 8-69: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	160
Figura 8-70: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G3-STR30B(0.50).....	160
Figura 8-71: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione	161
Figura 8-72: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G4-STR30B (1.00).....	162
Figura 8-73: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G4-STR30B (1.00)	163
Figura 8-74: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	164
Figura 8-75: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G4-STR30B(1.00).....	164
Figura 8-76: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione	165
Figura 8-77: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G5-STR20B (0.25).....	166
Figura 8-78: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G5-STR20B (0.25)	167
Figura 8-79: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	168
Figura 8-80: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione	168
Figura 8-81: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G5-STR20B(0.25).....	169
Figura 8-82: distribuzione di fibre in corrispondenza della sezione di rottura di un campione con dosaggio 0.25% di fibre	169
Figura 8-83: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G6-STR20B (0.50).....	170
Figura 8-84: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G6-STR20B (0.50)	171
Figura 8-85: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	171
Figura 8-86: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione	172
Figura 8-87: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G6-STR20B(0.50).....	172
Figura 8-88: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G7-STR20B (1.00).....	174
Figura 8-89: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G7-STR20B (1.00)	175
Figura 8-90: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	176
Figura 8-91: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione	176
Figura 8-92: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G7-STR20B(1.00).....	177
Figura 8-93: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G8-STR30M (0.25)	178

Figura 8-94: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G8-STR30M (0.25)	179
Figura 8-95: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	180
Figura 8-96: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione.....	180
Figura 8-97: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G8-STR30M(0.25).....	181
Figura 8-98: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G9-STR30M (0.50)	182
Figura 8-99: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G9-STR30M (0.50)	183
Figura 8-100: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	184
Figura 8-101: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione.....	184
Figura 8-102: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G9-STR30M(0.50).....	185
Figura 8-103: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G10-STR30M (1.00)	186
Figura 8-104: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G10-STR30M (1.00)	187
Figura 8-105: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico.....	187
Figura 8-106: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione.....	188
Figura 8-107: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G10-STR30M(1.00).....	188
Figura 8-108: prova di flessione su un campione della serie G10-STR30M (1.00)	189
Figura 8-109: fibre miste in azione tra i due piani di fessura generati a flessione	189
Figura 8-110: confronto del legame carico-freccia in mezzeria per i tre differenti dosaggi della miscela.....	191
Figura 8-111: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i tre differenti dosaggi della miscela.....	191
Figura 8-112: confronto del legame carico-freccia in mezzeria per i tre differenti dosaggi della miscela.....	193
Figura 8-113: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i tre differenti dosaggi della miscela.....	193
Figura 8-114: prova di flessione su campione rinforzato con fibre lunghe 20 millimetri .	194
Figura 8-115: confronto del legame carico-freccia in mezzeria per i tre differenti dosaggi della miscela.....	195
Figura 8-116: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i tre differenti dosaggi della miscela.....	195
Figura 8-117: test su campione con dosaggio massimo di fibre ottenute da corde miste.	196
Figura 8-118: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i diversi rinforzi a parità di dosaggio (1.00%)	197
Figura 8-119: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i diversi rinforzi a parità di dosaggio (0.50%)	198

Figura 9-1: MAPEFIBRE ST30, particolare della struttura superficiale ad aderenza migliorata [12].....	203
Figure 13-1: operazioni di taglio delle corde riciclate e fibre prodotte.....	217
Figure 13-2: materiali utilizzati e produzione della miscela fibrorinforzata	218
Figure 13-3: produzione dei campioni per i test	219
Figure 13-4: esecuzione delle prove di compressione, flessione e trazione indiretta	220
Figure 13-5: vista delle fibre all'interno dei campioni post rottura	221

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1-1- tipologie di fibre sintetiche utilizzabili nel calcestruzzo fibrorinforzato.	18
Tabella 1-2: miscele prodotte in laboratorio per le attività sperimentali.....	22
Tabella 2-1: valori di f_R , $3k$ in MPa in funzione dei parametri per la definizione della classe di resistenza residua	26
Tabella 2-2: Coefficienti di sicurezza parziali per la verifica di elementi in FRC agli stati limite (fonte: Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in FRC)	28
Tabella 4-1: componenti dell'impasto di riferimento impiegato per ogni getto.....	45
Tabella 4-2: caratteristiche tecniche del calcestruzzo realizzato in fase di getto	45
Tabella 5-1: catalogazione delle diverse tipologie di corde in funzione di struttura e materiale	49
Tabella 5-2: principali materiali costituenti le corde delle racchette e loro propensione al riciclo.....	49
Tabella 5-3: catalogazione delle corde in funzione delle caratteristiche geometriche (sezione trasversale e calibro).....	51
Tabella 5-4: catalogazione delle diverse tipologie di corde riciclate impiegate per la ricerca	55
Tabella 5-5: proprietà delle corde STR 1 - Black.....	55
Tabella 5-6: proprietà delle corde STR 2 - White.....	55
Tabella 5-7: proprietà delle corde STR 3 - YELLOW	56
Tabella 5-8: proprietà delle corde STR 4 - Green	56
Tabella 5-9: proprietà delle corde STR 5 - Red	56
Tabella 5-10: proprietà delle corde STR 6 - Orange	56
Tabella 5-11: proprietà delle corde STR 7 - White.....	56
Tabella 5-12: proprietà delle corde STR 8 - Yellow	57
Tabella 5-13: proprietà delle corde STR 9 - Pink	57
Tabella 5-14: proprietà delle corde STR 10 - Blue	57
Tabella 5-15: proprietà delle corde STR 11 - White.....	57
Tabella 5-16: proprietà delle corde STR 12 - Brown.....	57
Tabella 6-1: matrice delle 10 miscele utilizzate in funzione della concentrazione in peso di fibre di rinforzo.....	66
Tabella 6-2: matrice delle 10 miscele utilizzate in funzione del peso di fibre di rinforzo inserite.....	68
Tabella 6-3: getti di calcestruzzo effettuati e relative caratteristiche di rinforzo.....	69
Tabella 8-1: riepilogo del numero di ogni campione per miscela sottoposto a test.....	87
Tabella 8-2: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G1- Nostrings	89
Tabella 8-3: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G2- STR30B (0.25)	90
Tabella 8-4: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G3- STR30B (0.50)	92

Tabella 8-5: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G4-STR30B (1.00).....	94
Tabella 8-6: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G5-STR20B (0.25).....	96
Tabella 8-7: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G6-STR20B (0.50).....	98
Tabella 8-8: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G7-STR20B (1.00).....	100
Tabella 8-9: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G8-STR30M (0.25)	103
Tabella 8-10: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G9-STR30M (0.50)	105
Tabella 8-12: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G10-STR30M (1.00)	107
Tabella 8-13: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G1-Nostrings	118
Tabella 8-14: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G2-STR30B (0.25).....	120
Tabella 8-15: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G3-STR30B (0.50).....	122
Tabella 8-16: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G4-STR30B (1.00).....	123
Tabella 8-17: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G5-STR20B (0.25).....	125
Tabella 8-18: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G6-STR20B (0.50).....	127
Tabella 8-19: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G7-STR20B (1.00).....	128
Tabella 8-20: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G8-STR30M (0.25)	130
Tabella 8-21: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G9-STR30M (0.50)	131
Tabella 8-22: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G10-STR30M (1.00)	133
Tabella 8-23: confronto tra i valori medi dei carichi di rottura per miscele con dosaggio dello 0.25%.....	142
Tabella 8-24: valori medi dei carichi di rottura per miscele con stesso rinforzo e differente dosaggio.....	142
Tabella 8-25: valori del carico di picco dei campioni della serie G1-Nostrings	151
Tabella 8-26: valori del carico di picco dei campioni della serie G2-STR30B (0.25)	155
Tabella 8-27: parametri di resistenza residua $f_R, 1k$ e $f_R, 3k$ dei campioni della serie G2-STR30B (0.25).....	157
Tabella 8-28: valori del carico di picco dei campioni della serie G3-STR30B (0.50)	159

Tabella 8-29: parametri di resistenza residua $fR, 1k$ e $fR, 3k$. dei campioni della serie G3-STR30B (0.50)	161
Tabella 8-30: valori del carico di picco dei campioni della serie G4-STR30B (1.00)	163
Tabella 8-31: parametri di resistenza residua $fR, 1k$ e $fR, 3k$ dei campioni della serie G4-STR30B (1.00)	165
Tabella 8-32: valori del carico di picco dei campioni della serie G5-STR20B (0.25)	167
Tabella 8-33: parametri di resistenza residua $fR, 1k$ e $fR, 3k$ dei campioni della serie G5-STR20B (0.25)	169
Tabella 8-34: valori del carico di picco dei campioni della serie G6-STR20B (0.50)	170
Tabella 8-35: parametri di resistenza residua $fR, 1k$ e $fR, 3k$ dei campioni della serie G6-STR20B (0.50)	173
Tabella 8-36: valori del carico di picco dei campioni della serie G7-STR20B (1.00)	175
Tabella 8-37: parametri di resistenza residua $fR, 1k$ e $fR, 3k$ dei campioni della serie G7-STR20B (1.00)	177
Tabella 8-38: valori del carico di picco dei campioni della serie G8-STR30M (0.25)	179
Tabella 8-39: parametri di resistenza residua $fR, 1k$ e $fR, 3k$ dei campioni della serie G8-STR30M (0.25)	181
Tabella 8-40: valori del carico di picco dei campioni della serie G9-STR30M (0.50)	183
Tabella 8-41: parametri di resistenza residua $fR, 1k$ e $fR, 3k$ dei campioni della serie G9-STR30M (0.50)	185
Tabella 8-42: valori del carico di picco dei campioni della serie G10-STR30M (1.00)	187
Tabella 8-43: parametri di resistenza residua $fR, 1k$ e $fR, 3k$ dei campioni della serie G10-STR30M (1.00)	189
Tabella 8-44: tabella per la classificazione del calcestruzzo fibrorinforzato [17]	199
Tabella 8-45: calcolo della classe prestazione delle miscele di calcestruzzo fibrorinforzato prodotte con fibre riciclate	200

1 INTRODUZIONE

Il principio secondo cui l'integrazione di un materiale fibroso di rinforzo all'interno della massa di un materiale a comportamento fragile (ad esempio terra cruda, gesso o cemento) potesse compensarne alcune debolezze strutturali, ha origini molto antiche. Basti pensare all'usanza, già diffusa in epoche lontane, di mescolare la paglia all'argilla per la produzione dei mattoni in terra cruda, al fine di ridurre la formazione di crepe causate dal naturale processo di essiccazione. Riferendosi invece a periodi più recenti, a partire dalla fine dell'Ottocento emerse l'esigenza di realizzare elementi in cemento caratterizzati da spessori contenuti, per i quali si rese necessario introdurre fibre allo scopo di migliorarne la resistenza meccanica. Ciò portò a un largo utilizzo di fibre naturali derivate dall'amianto, materiale che solo in seguito si rivelò nocivo per la salute umana e venne progressivamente sostituito con alternative più sicure. Le prime sperimentazioni legate all'impiego di fibre metalliche per potenziare le prestazioni del calcestruzzo risalgono alla metà del secolo scorso, seguite poi dall'impiego di fibre di vetro, fino a giungere, a partire dalla metà degli anni Settanta, all'impiego di fibre realizzate in materiali polimerici.

1.1 FONDAMENTI E MECCANISMI DI FUNZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

Il calcestruzzo è un materiale con comportamento fragile che, a causa della sua bassa resistenza a trazione e della naturale tendenza a contrarsi per effetto del ritiro idraulico, tende a fessurarsi. Nella maggior parte dei casi, le fessure generate dal normale ritiro della pasta cementizia rappresentano un problema prevalentemente estetico piuttosto che strutturale. Tuttavia, considerando gli aspetti legati alla durabilità delle strutture, tali fessure possono compromettere la vita utile dell'opera facilitando la penetrazione di agenti aggressivi, i quali raggiungono rapidamente le armature con la conseguente formazione di ruggine ed il possibile distacco del copriferro. Per limitare gli effetti legati alla fessurazione da ritiro, è solito procedere inserendo nelle zone più esposte degli elementi in cemento armato un'armatura di ripartizione costituita da barre di piccolo diametro disposte in reticoli a maglia fitta e quadrata. Tuttavia, queste armature riescono a contrastare solo gli sforzi che si sviluppano nelle direzioni in cui sono orientati i ferri, ma le tensioni di trazione generate dagli effetti della contrazione per ritiro agiscono in tutte le direzioni,

rendendo meno efficace l'effetto delle armature tradizionali. Da queste considerazioni è nata l'idea di inserire all'interno dell'impasto un rinforzo diffuso in tutte le direzioni, capace di compensare la scarsa resistenza a trazione del calcestruzzo e di ridurre la formazione delle fessure da ritiro. Tale rinforzo diffuso è fornito dalle fibre inserite nella matrice cementizia durante l'impasto, le quali si distinguono in fibre metalliche e fibre non metalliche. Nello specifico, le fibre non metalliche possono essere realizzate in vetro oppure in materiali di natura organica, come: il poliacrilonitrile, il poliestere e soprattutto il polipropilene.

Fibre sintetiche utilizzabili nel calcestruzzo				
Polipropilene [PPF]	Polietilene [PE]	Nylon [PA6]	Poliacrilonitrile [PAN]	Poliestere [PES]

Tabella 1-1- tipologie di fibre sintetiche utilizzabili nel calcestruzzo fibrorinforzato.

Molti elementi, sia strutturali che non strutturali, vengono oggi progettati utilizzando calcestruzzo rinforzato con fibre, impiegato sia in parziale sia in totale sostituzione dell'armatura tradizionale. Tra le principali applicazioni si possono citare:

- pavimentazioni industriali
- elementi prefabbricati
- rivestimenti di gallerie
- spritz-beton e betoncini.

Dal punto di vista progettuale, esistono documenti tecnici di comprovata validità che consentono di dimensionare elementi strutturali realizzati con calcestruzzo fibrorinforzato, tra i quali il Model Code 2010 [1] rappresenta uno dei principali riferimenti normativi a livello internazionale. Tuttavia, il documento ufficiale che approfondisce con maggiore accuratezza le specificità di tale materiale, e che è stato assunto come riferimento per la definizione delle procedure sperimentali affrontate in tale ricerca di tesi, è rappresentato dalle "Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio o polimeriche"[2]. Tale apparato normativo è stato redatto per rispondere alle prescrizioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018)[3], [4], le quali stabiliscono che ogni materiale o prodotto da costruzione destinato a uso strutturale debba essere correttamente identificato e provvisto di una specifica

qualificazione (Cap. 11.1). Di conseguenza, i calcestruzzi fibrorinforzati per impiego strutturale richiedono il rilascio di un "Certificato di Valutazione Tecnica" (CVT) da parte del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, sulla base delle procedure di verifica indicate nelle linee guida sopracitate. Queste ultime definiscono i criteri per la progettazione, l'esecuzione e il controllo dei calcestruzzi fibrorinforzati, identificati con l'acronimo FRC (Fibre Reinforced Concrete), impiegati sia nella costruzione di nuovi elementi strutturali sia negli interventi di consolidamento del patrimonio edilizio esistente in cemento armato.

Nel dettaglio, l'impiego di fibre come rinforzo della matrice cementizia permette, dal punto di vista strutturale, di ridurre l'ampiezza delle fessure, migliorando così la durabilità dell'opera e incrementando la resistenza del materiale a fatica, all'abrasione e ai carichi impulsivi. Inoltre, nel caso di elementi strutturali progettati con modelli a traliccio, le fibre possono sostituire completamente l'armatura trasversale e, fino al 30%, l'armatura principale. Nel caso dei rivestimenti delle gallerie, vista la loro configurazione strutturale, è possibile eliminare anche totalmente l'armatura ordinaria utilizzando un calcestruzzo fibrorinforzato con determinate prestazioni minime. Dal punto di vista esecutivo, l'utilizzo del calcestruzzo fibrorinforzato consente inoltre di ridurre i tempi di realizzazione e i costi di manodopera, poiché elimina la necessità di posare l'armatura tradizionale.

1.2 FRC COME RISORSA PER IL RICICLO DEI RIFIUTI PLASTICI

La naturale predisposizione dei materiali plastici a essere trasformati in fibre ne favorisce l'impiego come componente di rinforzo all'interno del calcestruzzo, offrendo al contempo interessanti opportunità per il riutilizzo di plastiche riciclate in ambito strutturale. Attraverso opportuni processi industriali, relativamente semplici e a basso costo, è infatti possibile convertire i rifiuti plastici in fibre di lunghezza e diametro adeguati, idonee a essere disperse nella matrice cementizia. Tali fibre possono contribuire in modo significativo a migliorare la resistenza a trazione del materiale e a contrastare l'apertura e la propagazione delle fessure, incrementando così le prestazioni meccaniche e la durabilità complessiva del calcestruzzo. Sulla base di queste considerazioni, è stato scelto di prendere come riferimento le corde impiegate nelle racchette da tennis, le quali richiamano la morfologia e la geometria tipiche di un elemento fibroso di rinforzo. Tali corde, infatti, presentano un diametro paragonabile a quello delle macrofibre comunemente utilizzate nelle matrici cementizie, di conseguenza l'unico

trattamento richiesto consiste nel taglio della singola corda in fibre di lunghezza adeguata al successivo impiego. Inoltre, la matrice polimerica delle corde da tennis, costituita essenzialmente da co-poliestere, presenta una stretta analogia chimica con il materiale delle macro-fibre sintetiche già comunemente impiegate per il rinforzo del calcestruzzo.

Il presente lavoro di tesi si propone pertanto di analizzare la risposta strutturale del calcestruzzo fibrorinforzato ottenuto mediante l'utilizzo di fibre derivate dal riciclo di corde per racchette da tennis, considerate "esauste" quando perdono le loro caratteristiche originarie di elasticità e precisione. In ambito professionistico, tale decadimento prestazionale si manifesta molto rapidamente, rendendo necessario sostituire l'incordatura della racchetta anche più volte nel corso della stessa giornata. Al di fuori del contesto agonistico, invece, i produttori raccomandano generalmente la sostituzione delle corde dopo circa 15 ore di gioco. Pertanto, sebbene possa sembrare che la quantità di corde esauste da smaltire sia limitata, il volume complessivo generato risulta comunque significativo, al punto da rendere opportuno affrontare il tema del loro recupero e reimpiego.

1.2.1 Difficoltà di riciclo delle corde sintetiche

Le corde sintetiche, come quelle in polipropilene o poliestere, sono costituite da plastiche tecniche che possono impiegare centinaia di anni per decomporsi. Un loro errato smaltimento comporta il rischio di rilascio di microplastiche nell'ambiente, in particolare nei mari, dove possono danneggiare gli ecosistemi. Smaltirle nel modo corretto o avviarne il riciclo industriale significa ridurre questi rischi e recuperare risorse preziose, trasformandole in nuovi materiali o prodotti. Inoltre, il poliestere richiede processi di riciclo chimico e termomeccanico per essere trasformato in nuovi materiali, rendendo il riciclo poco sostenibile. Dunque, il riciclo delle corde sintetiche per racchette da tennis non è una pratica comune, poiché esse sono realizzate con materiali polimerici difficilmente riciclabili e, in Italia, solo pochi operatori ecologici dispongono delle tecnologie necessarie per il loro trattamento e recupero.

In questo contesto, il reimpiego delle corde esauste come fibre di rinforzo nel calcestruzzo rappresenta una soluzione ecologicamente sostenibile, in quanto consente di ottenere un rapido processo di riciclo richiedendo un numero minimo di operazioni preliminari. Tale considerazione ha costituito un'ulteriore motivazione per sperimentare l'inserimento di questo materiale all'interno della matrice cementizia, con l'obiettivo di verificare se l'intuizione iniziale trovasse conferma anche sotto il profilo dei risultati sperimentali ottenuti sui campioni di calcestruzzo fibrorinforzato.



Figura 1-1: corde delle racchette da tennis convertite in fibre di rinforzo.

Nei calcestruzzi fibrorinforzati, le principali proprietà delle fibre che influenzano in termini di prestazioni reologiche e meccaniche il calcestruzzo sono:

- materiale
- lunghezza della fibra
- diametro equivalente
- rapporto di forma, dato dal rapporto tra lunghezza e diametro.

Le corde impiegate nella fase sperimentale presentano tutte lo stesso diametro, ma differiscono per le proprietà del materiale costituente. Dunque, le fibre sintetiche prodotte dal loro riciclo sono state suddivise in due macrogruppi:

- **fibre omogenee**: ricavate da una singola tipologia di corda le cui informazioni tecniche sono note e approfondite;
- **fibre miste**: ottenute dal riciclo di corde di diversa tipologia, presentano una composizione eterogenea sia chimicamente che geometricamente.

Questa suddivisione è stata adottata al fine di analizzare il comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato anche in condizioni realistiche di impiego, in cui le fibre derivano da corde riciclate non selezionate in base alla loro tipologia o composizione. Le attività di laboratorio hanno previsto la realizzazione di dieci differenti miscele, di cui una priva di fibre, utilizzata come riferimento per determinare le proprietà del calcestruzzo non rinforzato. Le restanti miscele differivano tra loro per tipologia di fibre (6 miscele con fibre omogenee e 3 con fibre miste), lunghezza delle fibre (6 miscele con fibre lunghe 30 mm e 3 con fibre lunghe 20 mm) e quantità di fibre, espressa in percentuale sul peso del calcestruzzo. In particolare, per ciascuna combinazione di tipologia e lunghezza, sono state testate concentrazioni pari a 0.25%, 0.50% e 1.00% in peso di fibre.

Tipo di rinforzo	Tipologia di corde	Lunghezza delle fibre	Concentrazione di fibre (% in peso)
Rinforzo assente	Fibre assenti	Fibre assenti	0.00%
Fibre omogene	STR 1 - Black	30 mm	0.25%; 0.50%, 1.00%
Fibre omogene	STR 1 - Black	20 mm	0.25%; 0.50%, 1.00%
Fibre miste	Mix eterogeneo di corde	30 mm	0.25%; 0.50%, 1.00%

Tabella 1-2: miscele prodotte in laboratorio per le attività sperimentali.

2 IL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO (FRC)

2.1 PRINCIPI DI BASE

Il calcestruzzo fibrorinforzato rientra nella famiglia dei calcestruzzi speciali, si tratta di un materiale composito caratterizzato da una matrice cementizia corrispondente al calcestruzzo ordinario e da elementi fibrosi discontinui dispersi in essa. L'aggiunta di tali fibre modifica le proprietà meccaniche e fisiche del conglomerato cementizio, in particolare, il rinforzo fibroso esercita sul calcestruzzo una vera e propria azione di cucitura delle aperture, contrastando dunque lo sviluppo di fessure.

L'efficacia del rinforzo disperso si manifesta prevalentemente nella fase post-elastica, ovvero nel momento in cui la matrice cementizia inizia a fessurarsi. In tale stadio, l'azione di cucitura esercitata dalle fibre garantisce al composito un comportamento duttile, assicurando al materiale fessurato:

- una rilevante resistenza residua a trazione;
- un netto incremento della tenacità a frattura e della durabilità;
- eccellenti prestazioni nei confronti delle sollecitazioni dinamiche (urti e fatica) e dell'usura superficiale.

Dunque, è proprio la capacità portante residua l'aspetto principale per il quale si inseriscono fibre di rinforzo nella matrice cementizia con finalità strutturali. La presenza del rinforzo viene anche sfruttata esclusivamente per limitare la propagazione delle fessure dovute al ritiro igrometrico; perciò, i calcestruzzi fibrorinforzati sono spesso impiegati per la realizzazione di pavimentazioni industriali.

Il calcestruzzo fibrorinforzato si configura come un materiale multifase, nel quale una matrice legante composta da cemento, acqua, inerti ed eventuali additivi, interagisce con un rinforzo discontinuo costituito dalle fibre. Affinché il materiale risponda ai requisiti di progetto, è indispensabile che tali costituenti siano proporzionati con rigore, garantendo sia la corretta lavorabilità allo stato fresco che le prestazioni meccaniche attese allo stato indurito.



Figura 2-1: Miscela di FRC prodotta in laboratorio: particolare della distribuzione delle fibre sintetiche nella pasta cementizia.

Di conseguenza, la produzione di un FRC a prestazioni certificate non può limitarsi alla semplice aggiunta di fibre a una miscela ordinaria. È infatti necessario che il proporzionamento del composito sia oggetto di una specifica progettazione finalizzata a ottimizzare l'interazione tra la pasta cementizia e gli elementi di rinforzo.

2.2 PRESTAZIONI E PROPRIETÀ MECCANICHE

L'introduzione delle fibre incrementa notevolmente la duttilità del conglomerato, esplicando la propria efficacia in particolar modo nella fase successiva all'innescio del quadro fessurativo. Dal punto di vista meccanico, poiché la deformazione ultima a trazione delle fibre risulta superiore di circa due o tre ordini di grandezza rispetto a quella della matrice cementizia, la crisi fragile di quest'ultima sopraggiunge ben prima che si raggiunga il limite di rottura del rinforzo. Di conseguenza, le fibre mitigano il naturale comportamento fragile della pasta cementizia.

Una volta superata la deformazione di prima fessurazione, il calcestruzzo fibrorinforzato esibisce una risposta meccanica di tipo elasto-plastico, ciò significa che il materiale conserva una capacità residua di sostenere i carichi applicati anche in presenza di lesioni diffuse.

Rispetto ai calcestruzzi ordinari, i compositi fibrorinforzati garantiscono ulteriori benefici prestazionali, tra cui si evidenziano:

- una più elevata resistenza alla fatica;
- una migliore risposta ai carichi impulsivi e agli urti;
- una maggiore resistenza agli shock termici;
- una superiore resistenza all'abrasione superficiale.

Per quanto concerne le limitazioni, la principale criticità operativa risiede nella riduzione della lavorabilità della miscela allo stato fresco, infatti l'inserimento delle fibre modifica la reologia dell'impasto aumentandone la viscosità. Tuttavia, tale problematica è risolvibile mediante l'impiego di specifici additivi superfluidificanti. Tale accorgimento è stato adottato anche nel corso della presente campagna sperimentale, durante la quale si è fatto ricorso ad un calcestruzzo predosato opportunamente additivato per garantire il mantenimento della fluidità necessaria.

In merito alle proprietà meccaniche del materiale, la determinazione della resistenza a compressione caratteristica per un calcestruzzo fibrorinforzato segue i medesimi criteri e protocolli definiti per i calcestruzzi ordinari. Al contrario, la caratterizzazione della resistenza residua a trazione, in conformità con le Linee Guida per la qualificazione degli FRC, avviene attraverso l'individuazione, tramite prova di flessione, dei valori caratteristici $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, determinati sulla base della classe di resistenza specificata nel Certificato di Valutazione Tecnica (CVT) del prodotto. Nello specifico, il parametro $f_{R,1k}$ (espresso in MPa) rappresenta la resistenza post-fessurazione calcolata in corrispondenza di un'apertura della fessura (CMOD - Crack Mouth Opening Displacement) pari a 0.5 mm, ed è il valore di riferimento per definire la classe di resistenza residua del materiale. Il parametro $f_{R,3k}$ indica invece la resistenza residua riferita a un'ampiezza della fessura di 2.5 mm. Il rapporto tra quest'ultimo parametro e la resistenza $f_{R,1k}$ consente di dedurre la classe di resistenza residua del materiale, consentendo la formazione di una tabella di correlazione di seguito riportata.

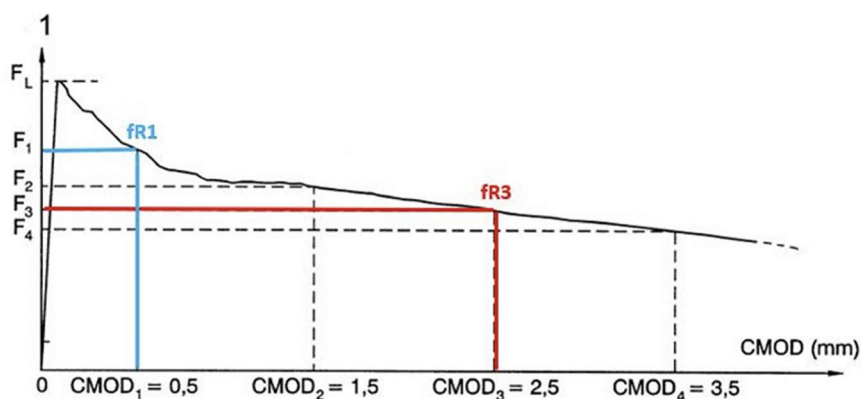


Figura 2-2: Tipica curva di una prova di flessione condotta secondo la EN 14651 (fonte: Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC)

In sintesi, la classificazione di un FRC viene espressa mediante un codice alfanumerico: il valore numerico corrisponde alla resistenza $f_{R,1k}$, la lettera invece definisce il rapporto di proporzionalità con la resistenza $f_{R,3k}$. Attraverso questa coppia di parametri è dunque possibile risalire a tutte le informazioni relative alla resistenza a trazione del materiale.

		$f_{R,1k}$ [MPa]											
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0
Classificazione sulla base del rapporto $\frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}}$	a	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
	b	0.70	1.05	1.40	1.75	2.10	2.80	3.50	4.20	5.60	7.00	8.40	9.80
	c	0.90	1.35	1.80	2.25	2.70	3.60	4.50	5.40	7.20	9.00	10.8	12.6
	d	1.10	1.65	2.20	2.75	3.30	4.40	5.50	6.60	8.80	11.0	13.2	15.4
	e	1.30	1.95	2.60	3.25	3.90	5.20	6.50	7.80	10.4	13.0	15.6	18.2

Tabella 2-1: valori di $f_{R,3k}$ in MPa in funzione dei parametri per la definizione della classe di resistenza residua

La resistenza nominale $f_{R,1k}$ è determinata in maniera sperimentale e corrisponde al numero, tra quelli riportati, immediatamente inferiore al valore di $f_{R,1k}$ ottenuto dagli esperimenti (valori assegnabili alla resistenza nominale: 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0 [MPa]). Il rapporto $\frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}}$ corrisponde invece ad una delle lettere in tabella, ciascuna delle quali indica un intervallo di valori, come specificato nel seguito:

$$\mathbf{a} \text{ per } 0.5 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \leq 0.7$$

$$\mathbf{b} \text{ per } 0.7 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \leq 0.9$$

$$c \text{ per } 0.9 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \leq 1.1$$

$$d \text{ per } 1.1 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} \leq 1.3$$

$$e \text{ per } 1.3 \leq \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}}$$

2.2.1 Il legame costitutivo del calcestruzzo fibrorinforzato

Nel caso di elementi strutturali realizzati in FRC, varia l'approccio in sede di verifica della sicurezza. Nello specifico, nell'analisi allo Stato Limite Ultimo (SLU), assume un ruolo determinante il contributo della resistenza residua a trazione nella fase post-fessurativa, parametro che viene invece trascurato nel calcolo degli elementi in calcestruzzo ordinario. Tale capacità portante residua post fessurazione viene considerata tramite l'impiego di legami costitutivi semplificati che mettono in relazione lo sforzo agente all'apertura della fessura. Le linee guida riportano due tipologie di modelli per descrivere tale comportamento meccanico:

- **modello lineare**, che può presentare un ramo incrudente oppure degradante oppure degradante a seconda delle prestazioni del materiale;

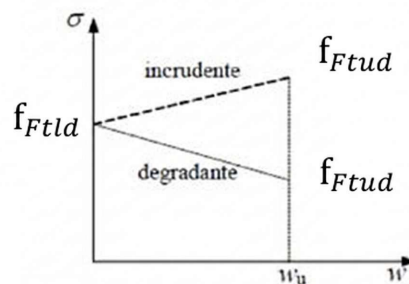


Figura 2-3: legame costitutivo sforzo-apertura fessura, modello lineare [2]

- **modello rigido-plastico**, che assume una tensione costante al variare dell'apertura della fessura.

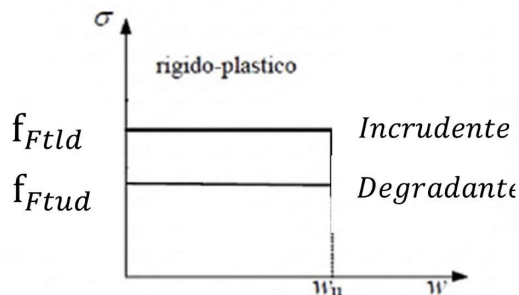


Figura 2-4: legame costitutivo sforzo-apertura fessura, modello rigido-plastico [2]

Analizzando i legami costitutivi adottati per la modellazione del calcestruzzo fibrorinforzato, si osserva che la risposta meccanica è governata da due parametri fondamentali. Il primo, indicato con la sigla f_{Ftd} , rappresenta la resistenza di progetto definita in corrispondenza di un'apertura di fessura nulla ($w = 0$). Il secondo parametro, denominato f_{Ftud} , identifica la resistenza di progetto allo Stato Limite Ultimo, assunta pari al valore di resistenza residua che il materiale è in grado di offrire in corrispondenza dell'apertura ultima della fessura ($w = w_u$).

Tali resistenze rappresentano i valori di progetto, determinati dividendo i rispettivi valori efficaci per uno specifico coefficiente parziale di sicurezza dedicato al calcestruzzo fibrorinforzato (γ_{cf}). L'entità di tale coefficiente, variabile in un intervallo compreso tra 1.0 e 1.5, viene definita in funzione della specifica situazione di carico agente sull'elemento strutturale:

FRC in compressione	$\gamma_{cf} = 1.5$
FRC in trazione	$\gamma_{cf} = 1.5$
FRC in situazioni di esercizio eccezionali	$\gamma_{cf} = 1.0$

Tabella 2-2: Coefficienti di sicurezza parziali per la verifica di elementi in FRC agli stati limite (fonte: Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in FRC)

2.2.2 La dipendenza delle proprietà meccaniche da concentrazione e orientamento delle fibre

I valori efficaci delle resistenze sono ricavati, mediante specifiche relazioni analitiche, dai parametri di resistenza residua a trazione $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ precedentemente illustrati. L'entità di tali grandezze è inoltre influenzata da molteplici fattori, tra i quali assumono un ruolo predominante l'orientamento spaziale e la distribuzione delle fibre all'interno della matrice cementizia.

Dunque, in fase di progetto di una struttura in calcestruzzo fibrorinforzato, nel definire le resistenze bisogna tener conto di appositi coefficienti dipendenti dell'orientamento e della distribuzione delle fibre. Nello specifico, si utilizza un coefficiente κ_0 , il quale correla il comportamento del FRC nel generico punto della struttura ed in una specifica direzione, al comportamento rilevato nella prova di flessione appositamente eseguita per classificare il materiale.

Difatti, la caratterizzazione del comportamento a flessione rappresenta l'aspetto discriminante per la classificazione di tale materiale. Alla luce di ciò, la campagna sperimentale condotta in questo lavoro di tesi si è focalizzata prevalentemente sull'esecuzione di prove flessionali su provini prismatici.

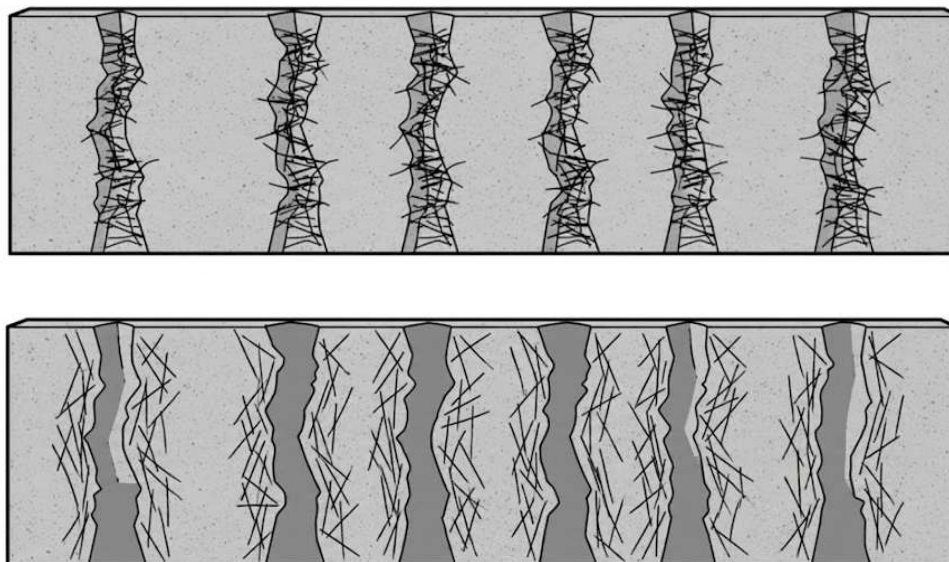


Figura 2-5: esempio di differente orientamento delle fibre rispetto alle fessure (immagine generata con IA)

Il fattore di orientamento κ_0 rappresenta un coefficiente correttivo applicato alla resistenza del materiale per tenere conto di quanto essa sia influenzata dall'orientamento delle fibre nella matrice. Trattandosi di un fattore moltiplicativo, esso assume un valore inferiore all'unità qualora la distribuzione risulti disomogenea o l'orientamento delle fibre sia sfavorevole, come avviene tipicamente quando queste si allineano parallelamente al piano di frattura riducendo l'efficacia del meccanismo di cucitura. In assenza di informazioni sperimentali dettagliate, le Linee guida impongono di adottare convenzionalmente un valore cautelativo pari a $\kappa_0=0.5$ per compensare possibili anisotropie o irregolarità locali del materiale.

Al contrario, nell'ipotesi di una distribuzione favorevole in cui le fibre risultano disposte prevalentemente in direzione ortogonale al piano di fessurazione, è possibile assumere un coefficiente κ_0 compreso tra 1.0 e 1.7, a condizione che tale incremento sia rigorosamente comprovato da specifiche indagini di laboratorio. È tuttavia essenziale osservare che l'impiego di un valore superiore all'unità comporta la necessità di considerare un comportamento meccanico di tipo ortotropo del materiale, pertanto, all'incremento di resistenza in una direzione deve

corrispondere una riduzione proporzionale nelle direzioni ortogonali, assegnando un valore di κ_0 inferiore ad 1.

2.2.3 Influenza delle fibre sul comportamento a compressione del calcestruzzo

Come precedentemente illustrato, sebbene la determinazione della resistenza a compressione caratteristica del calcestruzzo fibrorinforzato segua i medesimi protocolli normativi previsti per i calcestruzzi ordinari, la classificazione meccanica del materiale è legata a valori di resistenza residua post-fessurazione ($f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$). È proprio su tali parametri che si basa la valutazione della resistenza a compressione uniassiale del calcestruzzo fibrorinforzato e la definizione della relativa legge costitutiva. Le “Linee Guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in FRC” [2] stabiliscono infatti che il contributo del rinforzo fibroso debba essere valutato in funzione dell'entità della resistenza residua a flessione $f_{R,1k}$. Nello specifico, per calcestruzzi fibrorinforzati con $f_{R,1k} \leq 5 \text{ MPa}$ è possibile trascurare il contributo delle fibre alla resistenza a compressione ed assumere la legge costitutiva uniassiale in compressione relativa al calcestruzzo ordinario. Viceversa, qualora il materiale abbia una resistenza $f_{R,1k} \geq 5 \text{ MPa}$, il legame costitutivo sforzo-deformazione in compressione, definito nelle Norme tecniche, risulta modificato per effetto del confinamento passivo esercitato dalle fibre nella direzione ortogonale alla direzione dello sforzo di compressione.

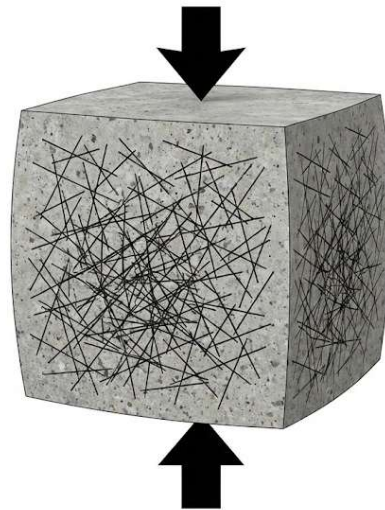


Figura 2-6: esempio di effetto confinamento generato dalle fibre distribuite all'interno del cubo sottoposto a compressione (immagine generata con IA)

Ne consegue che l'interpretazione della prova di compressione sui campioni in calcestruzzo fibrorinforzato risulta strettamente correlata agli esiti della prova a flessione eseguita su campioni della medesima matrice cementizia. È infatti il valore

di $f_{R,1k}$, ottenuto dai test a flessione, a fungere da indicatore predittivo, permettendo di stabilire se attendersi o meno l'attivazione di quel meccanismo di confinamento capace di incrementare la risposta resistente dei provini cubici sottoposti a compressione.

L'incremento della resistenza a compressione risulta dunque correlabile al dosaggio delle fibre, nonché al loro orientamento e lunghezza. Nello specifico, è soprattutto un'elevata concentrazione di fibre a favorire l'interconnessione tra i singoli filamenti che, se uniformemente distribuiti, tendono a costituire un vero e proprio reticolo strutturale interno in grado di esercitare un'azione di confinamento diffuso sulla matrice. Durante la fase di carico, tale scheletro tridimensionale contrasta efficacemente la dilatazione trasversale del provino, opponendosi alle deformazioni ortogonali alla direzione dello sforzo assiale. Poiché è noto, in accordo con le normative tecniche, che il confinamento incrementa la capacità portante del conglomerato, l'efficacia dall'azione delle fibre qualifica questa tecnologia come un'alternativa alle armature convenzionali anche sotto il profilo della risposta a compressione.

Alla luce delle eccellenti caratteristiche prestazionali esibite dal calcestruzzo fibrorinforzato, è possibile superare la concezione che lo relega a semplice materiale ausiliario per interventi di ripristino o rinforzo locale, considerandolo un materiale con capacità portante e dunque utilizzabile direttamente per impieghi strutturali. Coerentemente con tale possibilità di impiego, le Linee Guida stabiliscono i requisiti minimi di ammissibilità affinché il materiale possa essere utilizzato nella realizzazione di nuovi elementi portanti. In particolare, il calcestruzzo fibrorinforzato può essere usato per scopi strutturali se la sua resistenza a compressione rispetta i livelli stabiliti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni [3] per il calcestruzzo privo di fibre. In sostanza, le prestazioni della miscela con fibre devono essere almeno pari a quelle di un calcestruzzo tradizionale di pari classe. Inoltre, il calcestruzzo fibrorinforzato può sostituire, parzialmente o integralmente, l'armatura metallica tradizionale qualora venga rigorosamente verificata la seguente condizione:

$$f_{R1,k} > 0.1 \cdot (f_{ck})^{2/3}$$

3 STUDI PRELIMINARI

Prima di procedere con le attività sperimentali di laboratorio, si è ritenuto opportuno sviluppare una comprensione approfondita del comportamento delle fibre sintetiche all'interno della matrice cementizia. Tale fase preliminare è risultata fondamentale per definire in maniera rigorosa i metodi di prova da adottare, individuare le dosi ottimali dei componenti della miscela e selezionare la tipologia di cemento e di additivi più idonea a garantire una corretta interazione con le fibre polimeriche, evitando al contempo possibili alterazioni o danni alla loro struttura. A tal proposito, è stata condotta un'analisi critica della letteratura scientifica di settore, dalla quale sono state tratte informazioni di rilievo per l'impostazione metodologica e la pianificazione delle successive prove sperimentali in laboratorio.

Numerose ricerche hanno affrontato il tema dell'integrazione di fibre all'interno del calcestruzzo, non soltanto al fine di valutarne il contributo al miglioramento delle proprietà meccaniche, ma anche per approfondire in modo sistematico gli effetti complessivi che tali elementi esercitano sul comportamento del materiale composito. Gli studi più avanzati si concentrano, infatti, su diversi aspetti: dalla variazione della lavorabilità della pasta cementizia in presenza di fibre, al comportamento chimico dei materiali polimerici che le costituiscono in seguito all'interazione con l'ambiente fortemente alcalino del calcestruzzo, fino all'analisi delle prestazioni del materiale esposto a temperature elevate o a condizioni di incendio. Parallelamente, una parte della letteratura si focalizza su approcci più tradizionali, volti principalmente alla valutazione delle prestazioni meccaniche (resistenza a compressione, trazione e flessione) in funzione della tipologia, della geometria e del dosaggio delle fibre impiegate, nonché sullo studio del comportamento del materiale in presenza di fenomeni di ritiro.

Tali ricerche risultano di particolare interesse per la definizione dei parametri di progetto della miscela da sperimentare, poiché consentono di individuare la dimensione ottimale delle fibre, il relativo dosaggio e di valutare se il materiale costituente le corde delle racchette da tennis possa essere considerato idoneo e comparabile ai materiali sintetici comunemente impiegati negli studi sul calcestruzzo fibrorinforzato. Si è infine fatto riferimento a tali studi per individuare le prove sperimentali più appropriate da condurre sul calcestruzzo, con l'obiettivo

di comprendere in modo approfondito l'influenza esercitata dalle fibre sulle proprietà del materiale.

Nel presente capitolo sono riportate le principali pubblicazioni scientifiche analizzate, alle quali si è fatto riferimento per orientare e pianificare l'attività sperimentale sviluppata nell'ambito della tesi.

3.1 EFFETTI GENERALI DELLE FIBRE SINTETICHE SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

Per approfondire le modifiche comportamentali indotte nel calcestruzzo dall'aggiunta di fibre sintetiche, sono state analizzate tre pubblicazioni scientifiche, ciascuna focalizzata su aspetti differenti. In primo luogo, si è analizzata la risposta strutturale fornita da provini di calcestruzzo rinforzati tramite l'incorporazione di fibre di polipropilene pretrattate (PPF) con l'obiettivo di migliorarne le proprietà meccaniche e microstrutturali [5]. Per tale ricerca sono state testate diverse percentuali di fibre (0,5%, 1%, 1,5% e 2% in peso rispetto alla miscela) e il contenuto ottimale è risultato pari all'1,5%, con incrementi significativi nelle prestazioni a compressione, flessione, trazione e modulo elastico. Lo studio ha quindi evidenziato come l'aggiunta di fibre di polipropilene (PPF) possa migliorare in maniera consistente le prestazioni complessive del calcestruzzo.

Oltre al comportamento meccanico del calcestruzzo, è noto che l'inserimento di fibre ha lo scopo principale di limitare l'apertura di fessure indotte dal ritiro del materiale. In quest'ottica, precedenti studi hanno valutato sperimentalmente come i parametri delle fibre di poliestere, in particolare lunghezza e dosaggio, influenzino i ritiri del calcestruzzo, al fine di determinare configurazioni ottimali per ridurre la fessurazione e migliorare la durabilità delle pavimentazioni [6]. La ricerca studiata si focalizza sull'analisi dell'effetto della lunghezza e del contenuto delle fibre di poliestere sul ritiro a secco e sul ritiro termico del calcestruzzo fibrorinforzato. In dettaglio, sono riportati i risultati dei test effettuati su campioni contenenti fibre di cinque lunghezze differenti (da 1 a 9 cm) e sei concentrazioni variabili dallo 0.1% all'1.1% in peso. I coefficienti di ritiro misurati sono stati confrontati con le prestazioni meccaniche dei campioni (resistenza a compressione e trazione indiretta) a diverse età di maturazione, al fine di identificare le combinazioni di lunghezza e dosaggio più efficaci per limitare le fessurazioni e ottimizzare la durabilità del materiale.

Il presente studio ha evidenziato che l'integrazione di fibre di poliestere migliora significativamente la resistenza del calcestruzzo al ritiro per essiccazione.

Infine, il terzo aspetto indagato riguarda l'impiego dei composti cementizi ingegnerizzati [7] sviluppati come materiali ad alte prestazioni per interventi su strutture esistenti, in particolare ponti soggetti a fessurazioni superficiali, con l'obiettivo di prevenire l'infiltrazione di agenti aggressivi e i conseguenti fenomeni di corrosione. Lo studio esaminato approfondisce l'effetto dell'inclusione di fibre miste all'interno della matrice cementizia, costituite da materiali plastici di diversa natura, nonché di sistemi ibridi combinanti fibre sintetiche e metalliche. L'indagine valuta il comportamento flessionale di travi in ECC rinforzate con fibre ibride di polivinilalcol (PVA), polietilene (PE) e acciaio. Per tale ricerca sono state effettuate delle prove di flessione su quattro punti, necessarie per analizzare l'influenza della tipologia di fibra. Tale metodologia di prova è stata assunta come riferimento per la definizione della campagna sperimentale di questa tesi, volta a caratterizzare e certificare il comportamento delle fibre ricavate dalle corde da tennis e certificarne il funzionamento.

I risultati dell'indagine hanno evidenziato come l'aggiunta di fibre incrementi significativamente la rigidità e la capacità portante ultima delle travi rispetto al calcestruzzo ordinario, favorendo al contempo una riduzione dell'ampiezza fessurativa. Inoltre, da tale paper si sono tratte importanti informazioni relative alla capacità delle fibre d'acciaio di lavorare insieme a quelle sintetiche per migliorare ulteriormente la resistenza flessionale, evidenziando un marcato effetto sinergico tra le due tipologie.

3.2 INFLUENZA DELL'AGGIUNTA DI FIBRE SULLA LAVORABILITÀ DELLA MISCELA CEMENTIZIA

Una miscela cementizia contenente fibre presenta caratteristiche di lavorabilità allo stato fresco differenti rispetto a una miscela tradizionale priva di rinforzi fibrosi. In particolare, ci si attende una riduzione della fluidità e, di conseguenza, una maggiore difficoltà nelle operazioni di messa in opera. Al fine di approfondire questo aspetto e di prevedere il comportamento delle miscele prodotte in laboratorio con differenti concentrazioni di fibre, ci è basati sulle osservazioni fatte da uno studio che esamina in modo sistematico l'effetto delle fibre di polipropilene (PPF) sulle proprietà reologiche e tribologiche del calcestruzzo ordinario [8], ambiti

ancora relativamente poco indagati rispetto alle più note influenze delle PPF sulle prestazioni meccaniche e sulla durabilità. Lo studio ha previsto la preparazione di campioni contenenti fibre di polipropilene con differenti morfologie, lunghezze e dosaggi, testati in due fasi sperimentali distinte: una in assenza di additivi superfluidificanti e una con l'aggiunta di un additivo a base di policarbossilati. I risultati sperimentali hanno evidenziato che, in assenza di additivi, l'aumento del contenuto di fibre comporta un incremento della viscosità plastica e una riduzione della scorrevolezza, mentre la lunghezza delle fibre incide in misura limitata su tale comportamento, inoltre a dosaggi elevati si osservano fenomeni di segregazione e un peggioramento della pompabilità del calcestruzzo.

L'impiego di un additivo superfluidificante consente invece di ripristinare la lavorabilità della miscela, riducendo sia la viscosità plastica sia la costante viscosa, con conseguenti miglioramenti nella fluidità e nella facilità di messa in opera. Inoltre, la combinazione di fibre di diversa lunghezza e morfologia si è dimostrata più efficace nel migliorare la fluidità rispetto all'utilizzo di un solo tipo di fibra. Dunque, tale studio propone l'impiego combinato di fibre e superfluidificanti come strategia ottimale per bilanciare le esigenze di lavorabilità e le prestazioni meccaniche del materiale. Sulla base di tali premesse analizzate in letteratura, si è optato per l'utilizzo di un calcestruzzo predosato additivato con agenti fluidificanti. Tale scelta ha permesso di garantire un'adeguata lavorabilità della miscela, prevenendo difficoltà operative durante le fasi di confezionamento e getto dei provini in laboratorio.

3.3 INTERAZIONE CHIMICA TRA FIBRE SINTETICHE ED ALCALINITÀ DEL CALCESTRUZZO

Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda l'interazione tra le fibre sintetiche e la matrice cementizia, in particolare la compatibilità chimica tra i due componenti e l'eventuale influenza dell'ambiente alcalino del calcestruzzo sulle proprietà meccaniche delle fibre. Considerando la nota alcalinità della pasta cementizia, risulta essenziale approfondire le modalità di interazione con fibre di natura polimerica, quali quelle in poliestere e polietilene derivanti dal materiale costitutivo delle corde per racchette da tennis. A tal proposito, è stata presa in considerazione una pubblicazione scientifica che indaga in maniera comparativa il comportamento

chimico e meccanico di fibre di polietilene tereftalato (PET) e di polipropilene (PP) utilizzate come rinforzo nel calcestruzzo fibrorinforzato [9].

L'elevata alcalinità della matrice cementizia può innescare fenomeni di idrolisi e conseguente degradazione delle fibre di PET, lo studio valuta dunque la loro stabilità chimica e l'impatto sulle prestazioni del composito rispetto alle fibre di polipropilene. L'indagine sperimentale ha previsto l'immersione di fibre PET e polipropilene, aventi caratteristiche fisiche e meccaniche comparabili, in una soluzione alcalina di idrossido di sodio per simulare l'ambiente del calcestruzzo. I parametri di degrado monitorati corrispondono a variazioni di massa, di diametro o di resistenza. In seguito all'azione dell'agente alcalino, le fibre sono state impiegate in matrici cementizie e sottoposte a prove meccaniche di compressione, trazione e flessione dopo 28 giorni di maturazione. I risultati hanno evidenziato che le fibre di PET sono soggette a fenomeni di idrolisi alcalina con una perdita iniziale di massa e riduzione della resistenza meccanica. Le fibre di polipropilene (PP), al contrario, hanno mostrato un'elevata stabilità chimica e l'assenza di alterazioni significative. Dunque, dal punto di vista tecnico, lo studio fornisce un contributo rilevante alla comprensione del comportamento delle fibre sintetiche in ambiente alcalino. Entrambe le tipologie di fibre analizzate contribuiscono al miglioramento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo rispetto al materiale di riferimento, incrementando le resistenze a trazione, compressione e flessione grazie alla loro efficacia nel limitare la formazione e la propagazione delle fessure. Tuttavia, i calcestruzzi rinforzati con fibre di polipropilene (PP) hanno evidenziato migliori prestazioni, dunque tali fibre si confermano più stabili e performanti in ambiente alcalino, garantendo un comportamento meccanico più duttile e omogeneo. Le fibre di PET, pur soggette a fenomeni di degradazione parziale, mantengono comunque un'adeguata capacità di adesione alla matrice cementizia e possono offrire prestazioni strutturali soddisfacenti. Pertanto, nel caso di fibre ricavate dalle corde delle racchette da tennis, costituite prevalentemente da poliestere e polietilene, non si prevedono significativi problemi di instabilità chimica in ambiente alcalino, rendendone plausibile l'impiego all'interno di matrici cementizie.

4 MATERIALI IMPIEGATI PER LE OPERAZIONI SPERIMENTALI

L'efficacia delle fibre ricavate dalle corde da tennis nel migliorare le prestazioni del calcestruzzo è stata indagata attraverso una specifica campagna sperimentale. Le proprietà meccaniche del composito sono state verificate tramite test di laboratorio standardizzati, volti a determinare i valori di resistenza ultima portando i campioni a rottura. Si è resa dunque necessaria la produzione di provini di diversa forma in funzione dei test da effettuare, nello specifico sono stati prodotti campioni di forma cubica, cilindrica e prismatica per la definizione della resistenza a compressione, a trazione e a flessione del materiale. La realizzazione dei campioni è parte consistente delle operazioni svolte in laboratorio, sia per l'elevato numero di essi prodotti che per le differenti miscele studiate. Una volta definite le proprietà da dare al calcestruzzo privo di fibre, e dunque il mix design della miscela da realizzare, le attività di produzione si sono basate sulla realizzazione di campioni di uguale calcestruzzo ma differente concentrazione di fibre al loro interno. Dunque, per ogni getto si è utilizzato un mix design definito per la realizzazione di 96 kg di pasta cementizia, alla quale si sono aggiunte fibre ricavate dal taglio delle corde in concentrazioni differenti, precedentemente studiate al fine di testare varie possibilità di comportamento del campione in calcestruzzo fibrorinforzato.

La miscela di calcestruzzo impiegata per la campagna sperimentale è composta da tre costituenti di base:

- Aggregati lapidei
- Calcestruzzo strutturale predosato
- Acqua di impasto

L'introduzione delle fibre ottenute dal recupero delle corde di racchette da tennis costituisce un ulteriore componente, portando dunque alla formazione di un sistema a quattro macro-costituenti prodotto in diverse tipologie in funzione della concentrazione di fibre nella miscela.

4.1 CALCESTRUZZO STRUTTURALE PREDOSATO

Il componente principale della miscela è senza dubbio il calcestruzzo, per il quale si vogliono caratterizzare le proprietà meccaniche prima e dopo l'inserimento delle fibre, al fine di valutare eventuali miglioramenti prestazionali.

Il calcestruzzo è un conglomerato artificiale costituito da una componente legante, corrispondente al cemento, da aggregati fini e grossolani, da additivi con funzioni specifiche e da acqua che agisce da attivatore chimico della miscela. Le metodologie di produzione di tale conglomerato sono semplicemente basate sulla miscelazione dei vari componenti a mano o con appositi macchinari. Nello specifico, per il lavoro di tesi svolto, la produzione dei campioni di materiale è stata effettuata in seguito alla miscelazione dei vari costituenti dell'impasto cementizio all'interno di una betoniera a bicchiere appositamente predisposta in laboratorio.



Figura 4-1: produzione dei campioni tramite miscelazione dei componenti del calcestruzzo in betoniera

I vari componenti del calcestruzzo sono dosati in funzione di una operazione di progettazione della miscela, definita mix-design e corrispondente al procedimento per il calcolo della composizione del calcestruzzo in termini di quantità di cemento, di acqua e di inerti per un metro cubo di calcestruzzo. Il dosaggio e la selezione dei vari costituenti è effettuato con l'obiettivo di raggiungere determinate caratteristiche quali: resistenza caratteristiche del materiale, diametro massimo degli aggregati, classe di consistenza del calcestruzzo fresco che ne influenza la lavorabilità, classe di esposizione ambientale ed eventuali altre proprietà.

Secondo le indicazioni delle “Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio o polimeriche”[2], i calcestruzzi fibrorinforzati possono essere preparati nello stabilimento del Fabbricante e forniti in cantiere come prodotto pronto per l’impiego, oppure forniti in cantiere come prodotto secco premiscelato, al quale va aggiunta l’acqua in cantiere. Volendo semplificare e velocizzare le operazioni di getto, oltre che ridurre al minimo le variazioni prestazionali legate a possibili errori di realizzazione delle varie miscele, si è scelto di impiegare un calcestruzzo premiscelato per impiego strutturale. Il predosaggio dei componenti del calcestruzzo consente di avere un materiale di facile produzione i cui costituenti della miscela sono tutti contenuti in unico sacco, compresi gli additivi. La sola aggiunta di acqua consente di attivare le capacità chimiche della miscela, ottenendo in poco tempo un conglomerato cementizio pratico da usare per piccoli getti come quelli effettuati in laboratorio per la produzione dei campioni di materiale. Inoltre, l’utilizzo di un calcestruzzo predosato ha consentito la realizzazione di una miscela di riferimento uniforme per ciascun getto, alla quale sono state successivamente aggiunte fibre polimeriche in concentrazioni variabili.

Il calcestruzzo impiegato per le operazioni di getto è il Betonpiù[10], un calcestruzzo predosato ecosostenibile per uso strutturale prodotto da GrasCalce, azienda leader nel campo dei calcestruzzi predosati.



Figura 4-2: sacco di calcestruzzo predosato "Betonpiù" prodotto da GrasCalce e utilizzato per la produzione dei campioni da testare

Dalle informazioni riportate sulla scheda tecnica del prodotto, si evince che tale calcestruzzo presenta una resistenza a compressione cubica $R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$, valore confermato anche di test svolti in laboratorio. Perciò si tratta una miscela cementizia impiegabile per elementi strutturali come fosse un classico calcestruzzo di classe C25/30.

Il predosaggio dei componenti costituenti il mix design, comporta la presenza in ogni sacco di Betonpiù dei seguenti elementi:

- Aggregato siliceo (0/10mm)
- 5% di inerte di riciclo certificato
- Legante cementizio
- Additivi

La presenza di una certa quantità di inerte di riciclo consente al prodotto di essere conforme ai criteri ambientali minimi (CAM) per la sostenibilità ambientale.



Figura 4-3: vista dei componenti del calcestruzzo predosato contenuti nel sacco di "Betonpiù" suddiviso in due scompartimenti

4.2 AGGREGATI LAPIDEI, ACQUA DI IMPASTO E ADDITIVI

La miscela prodotta per la realizzazione dei campioni sperimentali presenta alcune variazioni rispetto al predosaggio del Betonpiù, legate alla distribuzione granulometrica ed al quantitativo di aggregato siliceo inserito. Gli inerti, infatti, costituiscono lo scheletro litico portante tenuto insieme dalla capacità legante del cemento, dunque è fondamentale definire una distribuzione granulometrica degli aggregati ben assortita per ottenere una miscela compatta. Il predosaggio del calcestruzzo impiegato presenta aggregati con diametro non superiore ai 10 mm, classificabili dunque come sabbie e ghiaie. Si è scelto di aumentare la concentrazione di aggregati grossolani, rientranti nel campo delle ghiaie, al fine di aumentare le capacità strutturali del materiale e soprattutto di ridurre il quantitativo di acqua di impasto necessario per avere una buona lavorabilità, infatti, all'aumentare del diametro massimo dell'aggregato diminuisce la superficie specifica da bagnare per avere un certo livello di lavorabilità.

Dunque, la miscela è stata arricchita dall'inserimento di un granulato di origine naturale con diametro $8\text{ mm} \leq D \leq 12\text{ mm}$.



Figura 4-4: granulato di origine naturale con diametro $8\text{ mm} \leq D \leq 12\text{ mm}$ inserito nel mix design della miscela

Infine, è noto che l'acqua sia il costituente fondamentale per l'attivazione dei processi chimici che modificano la struttura dei vari costituenti fino ad ottenere una miscela che subisca il fenomeno di presa ed il successivo indurimento. L'acqua d'impasto crea un velo di rivestimento dei granuli di cemento innescando una serie di reazioni chimiche che rientrano in un processo definito di idratazione. Il clinker del cemento costituito da silicati e alluminati interagisce con le molecole di H_2O

tramite delle reazioni esotermiche i cui prodotti di idratazione formano una pasta gelatinosa che subisce un progressivo irrigidimento.

Il dosaggio di acqua nell'impasto è fondamentale in quanto influenza sia la lavorabilità della miscela che le sue proprietà meccaniche. Il valore teoricamente ottimale del rapporto tra la quantità di acqua e quella di cemento in un impasto di calcestruzzo corrisponde al rapporto stechiometrico, pari ad una proporzione acqua/cemento in peso di circa 0.28. Tale rapporto rappresenta la quantità minima di acqua necessaria affinché le reazioni di idratazione del cemento possano avvenire completamente. Tuttavia, questa quantità risulta insufficiente a garantire la totale idratazione del cemento, poiché nell'impasto di calcestruzzo non sarebbe possibile assicurare il contatto diretto tra ogni particella di cemento e l'acqua. Inoltre, anche qualora tale condizione fosse soddisfatta, l'impasto risulterebbe eccessivamente rigido e non idoneo a garantire un'adeguata lavorabilità. Per tali ragioni, il rapporto *acqua/cemento* (*a/c*) viene generalmente adottato con valori superiori a quello stechiometrico, risultando normalmente compreso nell'intervallo tra 0.40 e 0.65.

Tra i costituenti predosati del Betonpiù impiegato come calcestruzzo per la produzione dei campioni, sono presenti anche degli additivi chimici che influenzano il comportamento della miscela. Tra essi spicca la presenza di un additivo fluidificante, definito anche "riduttore d'acqua", il quale modifica in modo significativo la reologia del calcestruzzo rendendolo più lavorabile in modo da facilitare il lavoro di posa in opera e finitura. Ciò comporta una ridotta richiesta di acqua di impasto per l'attivazione dei processi chimici. Le prescrizioni riportate sulla scheda tecnica del prodotto indicano, infatti, un valore ottimale di 2 litri d'acqua per ogni sacco da 25 kg, corrispondente ad un rapporto acqua/cemento:

$$a/c = 0.08$$

4.3 MISCELA DI RIFERIMENTO STANDARDIZZATA

I componenti descritti nei precedenti paragrafi sono stati combinati per ogni singolo getto in specifiche quantità, calcolate in funzione del volume di calcestruzzo necessario per produrre il numero di campioni previsti per ogni miscela contenente diverse concentrazioni e tipologie di fibre di riciclo. Al fine di confezionare 4 provini cubici ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$), 4 provini cilindrici ($200 \times 100 \text{ mm}$) e 3 provini prismatici ($500 \times 100 \times 100 \text{ mm}$), è stato necessario l'impiego di tre sacchi di calcestruzzo predosato Betonpiù, ciascuno di massa pari a 25 kg. Per ogni sacco sono stati aggiunti 5 kg di granulato ($8 \text{ mm} \leq D \leq 12 \text{ mm}$) con l'obiettivo di migliorare la distribuzione granulometrica. Infine, l'acqua di impasto necessaria allo sviluppo delle reazioni di idratazione della pasta cementizia è stata dosata in quantità pari a 2.1 litri per ciascuna formulazione costituita da un sacco di Betonpiù e dal granulato. Dunque, l'impasto di riferimento prodotto per ogni getto presenta una massa complessiva di 96.3 kg, essendo costituito da:

Calcestruzzo predosato Betonpiù	Granulato ($8 \text{ mm} \leq D \leq 12 \text{ mm}$)	Acqua di impasto
75 kg	15 kg	6.3 kg

Tabella 4-1: componenti dell'impasto di riferimento impiegato per ogni getto

In definitiva, si ottiene un calcestruzzo di riferimento che presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

Massa volumica (indurita)	23 kN/m^3
Resistenza a compressione (a 28 gg)	$R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$; Classe C25/30
Resistenza a compressione nel tempo	$3 \text{ gg} \geq 20 \text{ N/mm}^2$; $7 \text{ gg} \geq 25 \text{ N/mm}^2$
Modulo elastico	$E = 33.000 \text{ MPa}$
Rapporto acqua/cemento	$a/c = 0.07$
Classe di consistenza	S4 (fluida)
Classe di esposizione	X0 – XC1 – XC2
Reazione al fuoco	Classe A1 (incombustibile)
Temperatura d'impiego	da $+5^\circ\text{C}$ a $+35^\circ\text{C}$

Tabella 4-2: caratteristiche tecniche del calcestruzzo realizzato in fase di getto

5 FIBRE SINTETICHE RICAVATE DALLE CORDE DELLE RACCHETTE DA TENNIS

Il tennis è uno sport diffuso a livello mondiale, la cui industria genera annualmente tonnellate di materiali plastici sotto forma di corde per le racchette. Tali prodotti sono destinati ad un impiego limitato e commisurato alla capacità di mantenimento delle prestazioni sportive. A livello professionistico, la vita utile di una corda è inferiore alle 20 ore di gioco, dunque un breve impiego prima di diventare rifiuto difficile da smaltire. In particolare, le corde costituite da monofili in poliestere (PET) o poliammidi (Nylon) finiscono quasi interamente in discarica essendo costituite da materiali ad altissima resistenza che attualmente rappresentano un problema ecologico.

A livello globale, si stima che ogni anno vengano utilizzate e sostituite fino a 11.000 tonnellate di corde in poliestere (1), le quali comportano un elevato impatto ambientale avendo tempi di decomposizione che variano tra i 400 ed i 600 anni (2). Il mondo del tennis sta effettuando gradualmente una transizione verso una maggiore ecosostenibilità, ciò è riscontrabile dal fatto che i grandi brand del settore iniziano a pubblicare "Impact Reports" che contengono dati sulla gestione dei rifiuti e sulla transizione verso materiali riciclati. Sono inoltre numerose le iniziative basate sul riciclo di attrezzature esauste, incentrate principalmente sul recupero e riutilizzo delle palline da tennis usate. Negli ultimi anni, grandi eventi sportivi come le ATP Finals hanno preso parte a delle campagne di riciclo di palline, rientranti nel progetto "Return: recycle tennis balls" (3) che mira alla produzione di scarpe dando una seconda vita alle palline da tennis esauste. Dunque, la ricerca per il riciclo delle attrezzature tennistiche è già avviata, ma è poco sviluppata per quanto riguarda il riciclo delle corde sintetiche; perciò, dare una seconda vita a tali elementi, reimpiegandoli sotto forma di fibre di rinforzo nel calcestruzzo, può essere una soluzione innovativa di riciclo.

5.1 CARATTERIZZAZIONE DELLE CORDE: ANALISI DEI MATERIALI E GEOMETRIA

Ogni atleta, in funzione del proprio gioco e delle proprie caratteristiche tecniche, sceglie una specifica tipologia di corda, la quale agisce da interfaccia dinamica fondamentale tra giocatore e pallina. La diversa incordatura influisce su diversi aspetti, quali: la risposta elastica, il controllo direzionale e lo spin, ovvero la capacità di generare rotazioni della pallina in seguito all'impatto. Le prestazioni fornite dalle corde sono strettamente dipendenti dalla diversa composizione chimica, oltre che dalle proprietà geometriche, come il calibro ed il profilo della sezione trasversale.

È stata condotta un'analisi delle diverse soluzioni disponibili in commercio, focalizzando l'attenzione sulle tipologie di corde riciclate impiegate nei campioni di calcestruzzo prodotti in laboratorio e oggetto di indagini.

5.1.1 Classificazione dei materiali

Le corde delle racchette da tennis sono innanzitutto classificabili in funzione della loro conformazione strutturale interna, la quale influisce sulla sollecitazione di impatto trasmessa dalla racchetta. Sono dunque distinguibili due famiglie strutturali di corde:

- corde con struttura monofilamento
- corde con struttura multifilamento

Il monofilamento corrisponde ad un singolo nucleo solido ottenuto tramite processo di estrusione, in grado di garantire elevata rigidità statica e scarsa elasticità. Le corde con struttura a monofilamento sono composte prevalentemente da co-polimeri di poliestere come il PET-polietilene tereftalato, miscelati ad additivi chimici per modificarne l'elasticità.

I multifilamenti presentano invece una struttura complessa, progettata per replicare le proprietà del budello naturale, una categoria a sé stante di corde impiegate storicamente nelle racchette ed in grado di fornire prestazioni elevate in termini di risposta elastica e tenuta alla tensione. Le corde con struttura multifilamento sono formate dall'assemblaggio di numerose microfibre sintetiche (in Nylon o poliammidi) intrecciate attorno ad una matrice centrale ed immerse in una matrice legante poliuretana. La presenza di molteplici filamenti permette un maggiore

assorbimento dell'energia cinetica tramite attrito interno tra le fibre, garantendo un modulo elastico inferiore. Di seguito è riportata una tabella riassuntiva che cataloga le corde in funzione di struttura e materiali:

Corde naturali	Corde sintetiche	
Budello naturale	Struttura monofilamento	Struttura multifilamento
	Co-polimeri di poliestere (PET-polietilene tereftalato)	Nylon, poliammidi o poliestere rivestiti da guaina poliuretana

Tabella 5-1: catalogazione delle diverse tipologie di corde in funzione di struttura e materiale

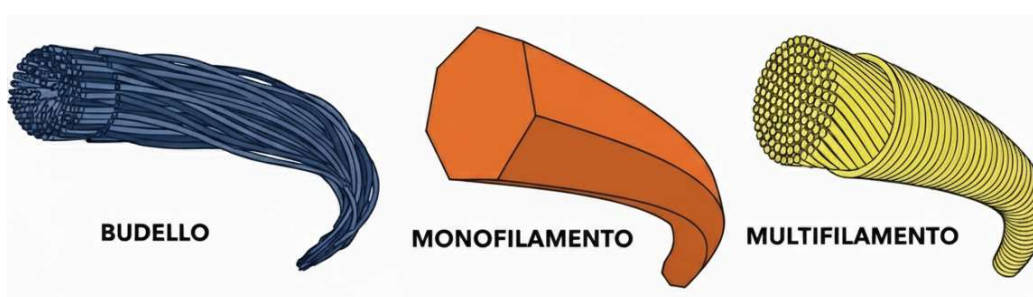


Figura 5-1: vista accurata della struttura delle tre principali tipologie di corde presenti in commercio (immagine realizzata con IA)

Un ulteriore aspetto cruciale relativo alla composizione e alla struttura delle corde è la loro ecosostenibilità, tema strettamente connesso alla gestione del fine vita e al riciclo. Per ciascuno dei principali materiali costituenti, si è svolta un'analisi relativa alla biodegradabilità, allo smaltimento post-consumo ed alle potenzialità di riutilizzo come fibre di rinforzo nel calcestruzzo:

Tipo di corda	biodegradabilità	smaltimento	Potenziale riciclo nel calcestruzzo
Budello naturale	Alta (organico)	Compostaggio	Basso (Degrada nell'ambiente basico del cemento)
Poliestere (PET-polietilene tereftalato)	Nulla (>500 anni)	Discarica	Alto (Alta resistenza meccanica)
Nylon, poliammidi	Molto bassa	Discarica	Alto (Ottima elasticità e legame chimico)

Tabella 5-2: principali materiali costituenti le corde delle racchette e loro propensione al riciclo

5.1.2 Geometria e calibro

Le corde sintetiche differiscono anche per conformazione geometrica della sezione trasversale. Mentre le corde tradizionali presentano una sezione circolare, riscontrabile ancora nelle corde in budello naturale ed in quelle sintetiche multifilamento, l'evoluzione tecnologica ha introdotto profili geometrici complessi per massimizzare le prestazioni soprattutto in termini di capacità di generare rotazione (spin). Le corde sintetiche monofilamento sono dunque prodotte con sezioni trasversali di diverse geometrie di seguito riportate:

- Sezione circolare
- Sezione pentagonale
- Sezione esagonale
- Sezione ottagonale
- Sezione piramidale

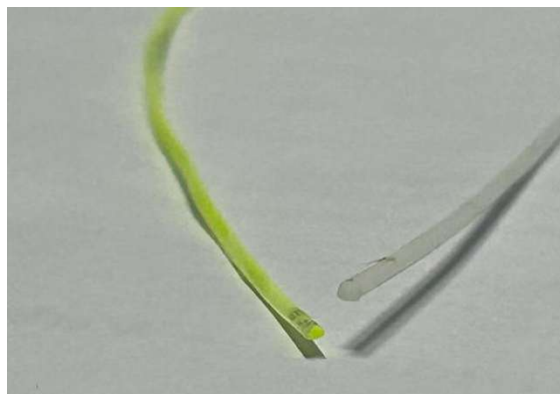


Figura 5-2: vista di due corde con sezione trasversale diversa sia per forma che per calibro

Le corde si differenziano, oltre che per il profilo, anche per le dimensioni. In questo contesto si parla di calibro per indicare il diametro della corda, un parametro che varia in base al modello e alla specifica geometria costruttiva. Nel tennis, il calibro standard ha un valore compreso tra 1.10 millimetri ed 1.40 millimetri per le corde presenti attualmente sul mercato ed influisce sulle caratteristiche elastiche, infatti una corda con calibro ridotto risulta essere più elastica rispetto ad una con calibro elevato.

La tabella 5-3, riportata di seguito, riassume e cataloga le corde in funzione di sezione trasversale e calibro.

	Struttura monofilamento	Struttura multifilamento
Sezione trasversale	Circolare, Pentagonale, Esagonale, Ottagonale, Piramidale	Circolare
Calibro [mm]	1.18 – 1.20 – 1.24 – 1.25 – 1.28 – 1.30 – 1.32 – 1.33 – 1.34 – 1.35 – 1.38 -1.40	

Tabella 5-3: catalogazione delle corde in funzione delle caratteristiche geometriche (sezione trasversale e calibro)

5.1.3 Proprietà meccaniche

I produttori di corde per racchette da tennis tendono a non divulgare specifiche dettagliate sulla composizione dei materiali e sulle proprietà meccaniche della singola corda, ma si concentrano sulle prestazioni sportive del prodotto. Per una caratterizzazione oggettiva delle proprietà meccaniche, il presente studio si basa sui dati forniti dalla Tennis Warehouse University (TWU), considerata la risorsa scientifica e tecnica più autorevole a livello mondiale per quanto riguarda l'attrezzatura da tennis (4). Si tratta di una piattaforma di ricerca indipendente che applica protocolli di laboratorio per analizzare le prestazioni di racchette, corde e palline. Trattandosi di un laboratorio indipendente, a differenza dei dati forniti dai produttori, i test della TWU sono eseguiti in condizioni controllate per garantire l'imparzialità.

I dati relativi alla rigidità delle corde sono stati desunti dalle ricerche della Tennis Warehouse University, culminanti in paper che identifica la rigidità come la proprietà più rilevante del filamento [11]. Essa è il risultato dell'interazione tra diverse variabili: la composizione chimica del materiale, la struttura costruttiva, il calibro e la tensione applicata. Come precedentemente illustrato, le corde per racchette si distinguono per la varietà dei materiali e per la complessità delle loro architetture strutturali. Queste variabili, insieme alla geometria e al calibro della sezione, ne definiscono la rigidità, proprietà che nel contesto sportivo determina la risposta dinamica all'impatto. La presente ricerca trasla tale concetto in ambito ingegneristico, analizzando come la diversa rigidità delle corde, reimpiagate come rinforzo, possa modificare le prestazioni meccaniche del calcestruzzo fibrorinforzato. A tale scopo, sono state testate fibre derivanti da diverse tipologie

di corde, mettendone in relazione le caratteristiche d'origine con il comportamento della matrice cementizia. Inoltre, nell'analisi dei materiali per il calcestruzzo, la forma della sezione è un parametro fondamentale per l'adesione meccanica. Una corda monofilamento a sezione esagonale o pentagonale offrirà una superficie di contatto e un ancoraggio meccanico alla matrice cementizia superiore rispetto a una corda liscia circolare, riducendo potenzialmente il fenomeno dello sfilamento.




Un ulteriore aspetto da considerare è la variazione della rigidità in funzione della tensione applicata alle corde, le quali diventano più rigide in funzione della forza di tesaggio applicata. In una corda rigida la tensione aumenta in misura maggiore per ogni pollice di allungamento rispetto ad una corda più morbida, dunque se le corde vengono portate alla stessa tensione, la corda più rigida si allunga meno. Altro fattore da tenere in considerazione è la perdita di rigidità che riguarda le corde dopo delle ore di impiego, rendendone necessaria la sostituzione.





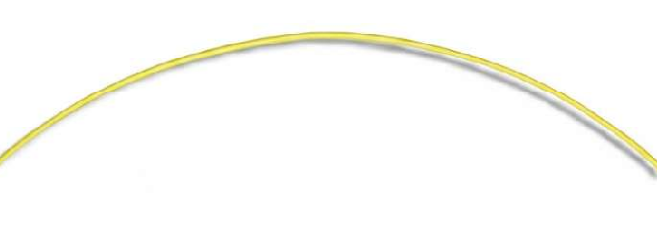

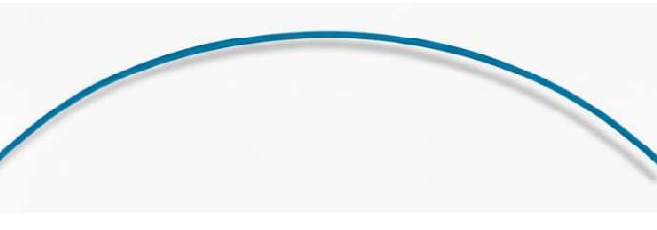
La Tennis Warehouse University dispone di un database completo che cataloga le specifiche di ogni corda presente sul mercato. Attraverso questa risorsa, è possibile risalire a parametri fondamentali quali la tensione di riferimento, la velocità di swing e la composizione dei materiali. Vengono inoltre forniti dati tecnici cruciali come la rigidità (lb/in), la perdita di tensione percentuale e il potenziale di spin. La perdita di tensione percentuale rappresenta un indicatore fondamentale per la manutenzione dell'attrezzatura: tipicamente, la sostituzione avviene quando il calo di tensione si attesta tra il 20% e il 50% rispetto al valore di tesaggio iniziale. Tale intervallo è strettamente correlato alla natura del materiale e alla struttura della corda, poiché poliesteri, multifilamenti e budelli naturali mostrano risposte viscoelastiche differenti. Tali corde esauste, sostituite dopo poche ore di utilizzo, secondo la ricerca sperimentale effettuata generano un rifiuto reimpiegabile come fibre di rinforzo nel calcestruzzo. È tuttavia necessario considerare che tali fibre possiedono una rigidità residua inferiore rispetto ai parametri nominali delle corde nuove, dunque l'analisi del comportamento del conglomerato cementizio è stata parametrata su tali prestazioni ridotte, riflettendo le reali condizioni meccaniche del materiale di recupero.

5.2 TIPOLOGIE DI CORDE IMPIEGATE PER LA RICERCA

Come precedentemente analizzato, l'eterogeneità delle corde per racchette, in termini di composizione e struttura, comporta una significativa variabilità delle loro proprietà meccaniche. Le fibre riciclate sono state dunque catalogate distinguendole per materiale, forma della sezione e calibro. Un ulteriore livello di classificazione riguarda la lunghezza della fibra: tale parametro, tuttavia, è indipendente dalla tipologia di corda ed è determinato esclusivamente dalla dimensione di taglio impostata durante la fase di preparazione dei campioni.

La fase di preparazione delle fibre ha previsto l'impiego di corde esauste di diversa tipologia, appositamente recuperate. È stata dunque svolta un'attività di catalogazione del materiale considerando le caratteristiche tecniche, il colore e le modalità di impiego nei campioni di prova. Complessivamente, sono state selezionate 12 distinte tipologie di corde sintetiche, alle quali è stata assegnata una sigla di riconoscimento:

STR 1 - Black	
STR 2 - White	
STR 3 - Yellow	

<p>STR 4 - Green</p>	
<p>STR 5 - Red</p>	
<p>STR 6 - Orange</p>	
<p>STR 7 - White</p>	
<p>STR 8 - Yellow</p>	
<p>STR 9 - Pink</p>	
<p>STR 10 - Blue</p>	



STR 11 - White	
STR 12 - Brown	

Tabella 5-4: catalogazione delle diverse tipologie di corde riciclate impiegate per la ricerca

Attraverso il database della Tennis Warehouse University (4), è stata effettuata una caratterizzazione completa di ogni corda impiegata in termini di materiale, sezione, calibro e prestazioni meccaniche. Di seguito si riporta la catalogazione dettagliata dei campioni utilizzati per la produzione delle fibre in laboratorio:

STR 1 - Black						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.30	84.9; 38.5	232.6	23.4; 10.6	45.9 %

Tabella 5-5: proprietà delle corde STR 1 - Black

STR 2 - White						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	48; 22	1.25	82.5; 37.4	226	11.5; 5.2	24 %

Tabella 5-6: proprietà delle corde STR 2 - White

STR 3 - Yellow						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.20	87.1; 39.5	194.9	13; 5.9	25.7 %

Tabella 5-7: proprietà delle corde STR 3 - YELLOW

STR 4 - Green						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.60	89.5; 40.6	219.5	13.2; 6.0	26.3 %

Tabella 5-8: proprietà delle corde STR 4 - Green

STR 5 - Red						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.20	81.6; 37	188.6	17.0; 7.70	33.3 %

Tabella 5-9: proprietà delle corde STR 5 - Red

STR 6 - Orange						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.30	72.3; 32.8	172.6	27.6; 12.5	54.5 %

Tabella 5-10: proprietà delle corde STR 6 - Orange

STR 7 - White						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.30	81.4; 36.9	217.7	24.9; 11.3	49.1 %

Tabella 5-11: proprietà delle corde STR 7 - White

STR 8 - Yellow						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.25	78.5; 35.6	208	11.2; 5.1	22 %

Tabella 5-12: proprietà delle corde STR 8 - Yellow

STR 9 - Pink						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.25	82; 37.2	193.2	17.4; 7.9	34.3 %

Tabella 5-13: proprietà delle corde STR 9 - Pink

STR 10 - Blue						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.20	88.2; 40	216.6	14.3; 6.5	28.3 %

Tabella 5-14: proprietà delle corde STR 10 - Blue

STR 11 - White						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	57; 26	1.30	85.2; 38.6	146	12.5; 5.7	22 %

Tabella 5-15: proprietà delle corde STR 11 - White

STR 12 - Brown						
Materiale	Tensione di riferimento [lbs; kg]	Calibro nominale [mm]	Tensione di picco [lbs; kg]	Rigidezza [lbs/in]	Tensione persa a fine vita [lbs; kg]	% di Tensione persa
Poliestere	51; 23	1.25	82.2; 37.3	194.9	17.9; 8.1	35 %

Tabella 5-16: proprietà delle corde STR 12 - Brown

6 PROCEDURE DI PRODUZIONE DELLE FIBRE E DEI CAMPIONI IN CALCESTRUZZO

In questo capitolo vengono descritte le attività di laboratorio dedicate alla trasformazione delle materie prime recuperate. Il percorso sperimentale illustra il processo di conversione delle corde esauste, inizialmente eterogenee per tipologia e configurazione, in macro-fibre sintetiche di lunghezza costante e tipologia predefinita. L'analisi approfondisce inoltre le fasi di confezionamento del calcestruzzo, definendo i criteri di miscelazione dei diversi componenti e i dosaggi utilizzati per la produzione dei campioni sperimentali.

Il capitolo è dunque strutturato in due macro-sezioni: la prima dedicata alla caratterizzazione e taglio delle fibre, la seconda dedicata al progetto della miscela (mix design) e al confezionamento dei provini.

6.1 PRODUZIONE E CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DELLE FIBRE

Durante la fase di sostituzione dell'incordatura, la rimozione delle corde esauste non avviene estraendo un singolo filamento continuo. Per ottimizzare i tempi operativi, infatti, la corda viene recisa in più punti direttamente sul piatto della racchetta. Se da un lato questa procedura agevola l'estrazione, dall'altro comporta la frammentazione del filamento, di conseguenza, il materiale è giunto in laboratorio sotto forma di spezzoni disomogenei, con lunghezze variabili dai 15 ai 120 cm. Tale eterogeneità geometrica rappresenta una criticità per la successiva fase di lavorazione, è stato pertanto necessario definire una specifica tecnica di taglio simultaneo che permettesse di lavorare più filamenti contemporaneamente, garantendo così l'ottenimento di fibre dalla lunghezza costante e controllata.

Tra le diverse tipologie di corde catalogate, la selezione del materiale per la prima fase di test è stata guidata dalla necessità di valutare l'incidenza della sola variabile geometrica, ovvero la lunghezza delle fibre, sulle prestazioni del calcestruzzo. Dunque, l'obiettivo della prima fase di ricerca è stato isolare l'influenza della lunghezza della fibra sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo fibrorinforzato. Per evitare che variabili di disturbo, quali la diversa composizione chimica o la geometria della sezione, alterassero i risultati, si è deciso di operare con un'unica tipologia di corda, mantenendo così costanti le proprietà intrinseche del rinforzo.

La scelta è ricaduta sulla corda indicata con la sigla STR 1 - Black, in virtù della sua ampia disponibilità rispetto agli altri campioni recuperati in laboratorio. Ciò ha consentito la produzione di campioni di calcestruzzo uniformi, nei quali l'unica variabile controllata è rappresentata dalla lunghezza della fibra.



Figura 6-1: fibre ricavate da STR 1 - Black

La determinazione della lunghezza di taglio delle fibre è stata effettuata sulla base dell'analisi tecnica dei prodotti commerciali già consolidati nel settore edile. L'obiettivo di impiegare le corde riciclate come sostituto funzionale delle fibre industriali ha reso necessario allineare le caratteristiche geometriche del materiale di recupero agli standard di mercato. Il principale prodotto di riferimento è stato individuato nelle Mapefibre ST30 prodotte da Mapei[12]: si tratta di fibre polimeriche strutturali (lunghezza 30 mm), progettate per incrementare la resistenza a trazione residua del calcestruzzo in fase post-fessurativa. Tali fibre offrono vantaggi significativi in termini di durabilità, infatti a differenza delle fibre metalliche garantiscono l'assenza di fenomeni corrosivi anche in ambienti aggressivi, inoltre esse possono talvolta sostituire l'armatura metallica tradizionale. Poiché le fibre commerciali garantiscono un incremento della tenacità, della duttilità e della resistenza a flessione residua, l'aspettativa sperimentale è di riscontrare un analogo miglioramento prestazionale nei campioni rinforzati con le fibre derivanti dal riciclo delle corde.

Le fibre sintetiche trovano ampio impiego anche nel rinforzo delle pavimentazioni rigide in calcestruzzo, dove assolvono la funzione primaria di limitare l'apertura delle fessure causate dal ritiro del materiale. In questo specifico ambito, un ulteriore prodotto di riferimento è rappresentato dalle PLAM FIBRE, fibre in polipropilene prodotte da Isoplam e progettate per la realizzazione di pavimentazioni industriali[13]. Una volta miscelate, tali fibre generano un'armatura tridimensionale all'interno dell'impasto, capace di contrastare efficacemente le tensioni da ritiro plastico durante la fase di presa, riducendo sensibilmente il rischio di fessurazione superficiale. Sebbene siano disponibili in diverse lunghezze (da 6 mm a 18 mm), per questa tipologia di applicazioni si predilige solitamente il formato maggiore da 18 mm, al fine di massimizzare l'efficacia del rinforzo. Mentre le Mapefibre ST30 sono fibre strutturali, in grado di reggere i carichi dopo che il calcestruzzo si fessura, le Plam Fibre di Isoplam sono spesso considerate fibre ausiliarie o "micro-fibre", poiché servono principalmente a prevenire la formazione di fessure in fase di ritiro del calcestruzzo, che si verifica nei primi momenti di vita del getto.

È fondamentale precisare che lo studio assume come riferimento la categoria delle macrofibre sintetiche, distinguendole nettamente dalle microfibre.

Tale classificazione, regolata dalla norma UNI EN 14889-2 [14], si basa su un parametro geometrico: il diametro. Le microfibre sono caratterizzate da un diametro ridotto ($d < 0.30 \text{ mm}$), si tratta dunque di filamenti sottili e flessibili che rientrano nella classe delle fibre non strutturali. Il loro scopo primario non è migliorare le proprietà meccaniche del calcestruzzo, bensì limitare la fessurazione da ritiro plastico. Al contrario, le macro-fibre presentano un diametro superiore ($d > 0.30 \text{ mm}$) e una maggiore rigidità, spesso accompagnata da una sagomatura superficiale volta a favorire l'adesione con la matrice. Esse agiscono come rinforzo strutturale, in quanto capaci di garantire una resistenza residua post-fessurazione che deve essere verificata attraverso specifici test normati dalla UNI EN 14651 [15].

Considerando che le corde per racchette da tennis presentano invariabilmente diametri superiori a 1.10 mm , nell'ottica di un loro reimpiego nel calcestruzzo esse rientrano nella categoria delle macrofibre strutturali. Dall'analisi dei prodotti di riferimento precedentemente riportati, e del più ampio panorama commerciale, emerge che il range dimensionale tipico per le macrofibre strutturali varia dai 10 mm ai 42 mm. Allineandosi a questi standard, le fibre ottenute dalle corde sono state dimensionate in due formati: 30 mm e 20 mm. Sotto il profilo metodologico, si è

deciso di evitare l'utilizzo di entrambe le lunghezze all'interno del medesimo impasto. Sono stati invece prodotti getti distinti, rispettivamente con fibre da 30 mm e da 20 mm, con l'obiettivo specifico di isolare la variabile geometrica e valutare la risposta meccanica del materiale in funzione esclusiva della lunghezza di rinforzo.

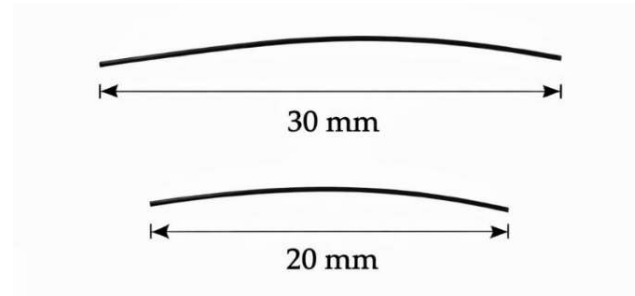


Figura 6-2: lunghezze di riferimento impiegate per le fibre

Il programma sperimentale ha incluso anche delle indagini volte a verificare come le diverse tipologie di corde influiscono sul comportamento del materiale. L'obiettivo è stato confrontare le prestazioni di un sistema rinforzato con fibre uniformi, identiche per materiale, calibro e sezione, rispetto ad uno contenente un mix eterogeneo di fibre. Si è voluto dunque determinare se l'utilizzo di fibre miste, variabili per calibro e sezione, comporti differenze prestazionali significative rispetto all'uso di fibre uniformi. Validare l'uso di miscele eterogenee è fondamentale per ottimizzare la filiera del riciclo, eliminando la necessità di selezionare le corde per tipologia prima del taglio. Operativamente, sono stati confezionati provini in calcestruzzo fibrorinforzato testando tre distinte configurazioni di rinforzo, basate sull'impiego di tre differenti famiglie di fibre:

- **Fibre Omogenee (L = 30 mm):** corde STR 1 - Black, tagliate in fibre lunghe 30 mm;



Figura 6-3: fibre omogenee STR 1 – Black lunghe 30 mm

- **Fibre Omogenee (L = 20 mm):** corde STR 1 - Black, tagliate in fibre lunghe 20 mm;



Figura 6-4: fibre omogenee STR 1 - Black lunghe 20 mm

- **Fibre Eterogenee (L = 30 mm):** costituite da una miscela di tutte le altre corde recuperate, tagliate in fibre lunghe 30 mm.



Figura 6-5: fibre eterogenee ricavate da corde miste, lunghezza 30 mm

Per il mix eterogeneo si è optato esclusivamente per la lunghezza di 30 mm, considerata lo standard di riferimento per le macro-fibre strutturali, al fine di focalizzare l'analisi sulle proprietà meccaniche e sulla capacità di rinforzo strutturale del composito. Poiché la campagna sperimentale è volta a misurare le resistenze meccaniche del calcestruzzo, l'attenzione è rivolta principalmente allo studio del contributo strutturale offerto dalle diverse tipologie di fibre impiegate.

6.2 MIX DESIGN E CONFEZIONAMENTO DEI CAMPIONI IN CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

È dunque indispensabile sottoporre le fibre riciclate a sperimentazione per quantificarne l'effettivo apporto strutturale al conglomerato cementizio. L'aspettativa principale riguarda la capacità di attivare l'effetto di cucitura delle fessure, fondamentale per garantire al materiale una resistenza residua post-fessurazione. Ovvero, si ipotizza che i filamenti agiscano come ponti di collegamento tra i lembi della lesione, trasferendo le tensioni attraverso la frattura ed evitando il collasso fragile della struttura. Tuttavia, le prestazioni finali non dipendono unicamente dalle proprietà intrinseche delle fibre, ma sono fortemente influenzate dalla loro concentrazione all'interno della matrice. Risulta pertanto fondamentale individuare il dosaggio ottimale, ovvero la corretta percentuale volumetrica di fibre da integrare nel mix design per i campioni oggetto di test. È stato quindi necessario definire con precisione il dosaggio di fibre da inserire in rapporto al volume di calcestruzzo, al fine di massimizzare l'efficacia del rinforzo nei provini.

Per risalire ai valori di concentrazione ideale, si è fatto riferimento alle indicazioni riportate sulle schede tecniche dei prodotti analoghi di riferimento e già presenti sul mercato. Per le macro-fibre non metalliche con capacità strutturali, la prassi consolidata prevede un impiego variabile tra i 3 e i 6 kg/m³, quantità che può essere incrementata in funzione della specifica applicazione e del livello di rinforzo richiesto. Assumendo per il calcestruzzo predosato una massa volumica standard pari a 2400 kg/m³ (24 kN/m³), è possibile convertire tali valori in termini percentuali. Ne risulta che la concentrazione di fibre tipicamente adottata dal mercato si attesta in un range compreso tra lo 0.125% e lo 0.25% in peso rispetto alla massa totale del conglomerato. Sulla base di tali informazioni, per i campioni prodotti in laboratorio è stato fissato un dosaggio base pari allo 0.25% in peso rispetto alla massa totale dell'impasto. Volendo però esplorare l'intera curva di risposta del materiale, al fine di valutare il massimo dell'incremento prestazione riscontrabile tramite l'utilizzo di queste fibre, e basandosi sulle concentrazioni di fibre impiegate in altre ricerche di cui sono state studiate le pubblicazioni scientifiche, si è scelto di imporre lo 0.25% come valore minimo di concentrazione di fibre da inserire. Al fine di indagare il potenziale massimo di rinforzo e le prestazioni limite del materiale, il piano

sperimentale ha previsto due ulteriori incrementi di dosaggio rispetto al valore minimo di riferimento:

- Campioni con fibre in concentrazione dello 0.50%: un valore doppio rispetto allo standard, per valutare i benefici di un rinforzo potenziato;
- Campioni con fibre in concentrazione dello 1.00%: una concentrazione molto elevata, introdotta per verificare l'eventuale soglia di saturazione della miscela. L'obiettivo di questo dosaggio limite è accertare se un quantitativo eccessivo di fibre possa indurre effetti controproducenti, come la riduzione della lavorabilità o un decadimento delle prestazioni meccaniche anziché un loro miglioramento.

La campagna sperimentale ha quindi previsto l'applicazione di questi tre tassi di dosaggio a tutte e tre le famiglie di fibre oggetto di studio descritte nel precedente paragrafo, per ognuna delle quali sono stati realizzati provini con concentrazioni pari allo 0.25%, 0.50% e 1.00%. Tali dosaggi di fibre, espressi come percentuale in peso rispetto all'impasto, sono conformi anche alle prescrizioni di normativa, infatti, richiamando quanto riportato dalla Circolare applicativa delle NTC (cap. 11.2.12)[4], si precisa che un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso strutturale, per essere definito tale, deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno non inferiore allo 0.3% in volume. Considerando il ridotto peso specifico delle fibre, un dosaggio di base assunto pari allo 0.25% in peso corrisponde di gran lunga ad una concentrazione superiore allo 0.3% in volume, dunque si entra nel campo dei calcestruzzi fibrorinforzati.

Dall'incrocio tra le tre famiglie di fibre e i relativi dosaggi è scaturita una matrice di prova composta da nove combinazioni, ciascuna corrispondente ad uno specifico getto e ad una differente miscela di calcestruzzo. A queste è stato aggiunto un decimo getto di controllo, costituito da una miscela di solo calcestruzzo priva di fibre di rinforzo (campioni bianchi). Quest'ultima è finalizzata a stabilire i valori di riferimento delle prestazioni meccaniche e quantificare, per confronto, l'effettivo incremento prestazionale apportato dalle diverse tipologie di fibre e dalle diverse concentrazioni. In totale sono dunque dieci i getti effettuati in laboratorio, che hanno portato ad un altrettanto numero di miscele collocabili nella seguente matrice dei campioni:

Tipo di rinforzo	Concentrazione di fibre (% in peso)		
Fibre assenti	0.00%		
STR 1 - Black [30 mm]	0.25%	0.50%	1.00%
STR 1 - Black [20 mm]	0.25%	0.50%	1.00%
Mix eterogeneo di fibre	0.25%	0.50%	1.00%

Tabella 6-1: matrice delle 10 miscele utilizzate in funzione della concentrazione in peso di fibre di rinforzo

6.2.1 Realizzazione delle miscele di calcestruzzo fibrorinforzato

La suddivisione delle attività sperimentali in differenti miscele da produrre ha comportato un impegno laboratoriale focalizzato prevalentemente sulle fasi di impasto del calcestruzzo e confezionamento dei campioni. La pianificazione delle attività è stata strutturata attraverso un cronoprogramma dei getti definito in base alla disponibilità delle casseforme. Per ogni sessione di lavoro, è stata prodotta una miscela conforme al mix design standardizzato (capitolo 4.3), la cui volumetria è stata calcolata in funzione del numero di casseri da riempire e del fabbisogno complessivo di materiale fibrorinforzato per ogni singolo getto. Ogni miscela di calcestruzzo fibrorinforzato deve essere caratterizzata sotto l'aspetto della resistenza a compressione, a trazione indiretta e a flessione. Per questo motivo, per ogni getto è stato necessario il confezionamento di: 4 provini cubici ($150 \times 150 \text{ mm}$), 4 provini cilindrici ($200 \times 100 \text{ mm}$) e 3 provini prismatici ($500 \times 100 \times 100 \text{ mm}$). Come indicato in precedenza, per produrre tali quantità di materiale sono stati impiegati tre sacchi di calcestruzzo predosato Betonpiù da 25 kg ciascuno, ad ognuno dei quali sono stati aggiunti 5 kg di granulato, con l'obiettivo di ottimizzare la distribuzione granulometrica della miscela. Infine, l'acqua d'impasto necessaria per le reazioni di idratazione della pasta cementizia è stata dosata in quantità pari a 2.1 litri per ogni unità composta da un sacco di Betonpiù e relativo granulato. Di conseguenza, l'impasto prodotto per ogni getto presenta una massa complessiva di 96.3 kg.



Figura 6-6: quantitativo di calcestruzzo e casseri impiegati per ogni getto

Questa specifica miscela standard di riferimento è la stessa utilizzata per i campioni bianchi, realizzati durante il primo getto e testati per stabilire i valori di base delle proprietà meccaniche. I risultati ottenuti dai campioni bianchi fungono da termine di paragone per valutare le prestazioni delle diverse configurazioni di calcestruzzo fibrorinforzato. Partendo dalla massa complessiva della miscela standardizzata, sono stati calcolati i quantitativi di fibre necessari per ogni impasto in base alle concentrazioni programmate. La definizione precisa di questi valori è stata fondamentale per organizzare le operazioni di taglio, risultate particolarmente onerose in termini di tempo a causa della leggerezza delle corde riciclate e della produttività limitata dei dispositivi di taglio impiegati a disposizione.

Le fibre in co-poliestere sono infatti caratterizzate da una massa volumica ridotta, il che comporta un ingombro volumetrico elevato anche per ottenere masse contenute. Questa proprietà rappresenta un vantaggio significativo dal punto di vista del recupero ambientale, infatti, volumi elevati di corde esauste, difficili da gestire come rifiuti, possono essere efficacemente smaltiti trasformandoli in rinforzo per l'edilizia. Di conseguenza, ogni getto di calcestruzzo, in base alla sua entità, è in grado di integrare e stoccare al proprio interno un importante volume di materiale riciclato.

Applicando le percentuali di progetto alla massa della miscela di riferimento, sono stati determinati i seguenti dosaggi per ogni getto:

- 240 grammi di fibre per la concentrazione dello 0,25%;
- 480 grammi di fibre per la concentrazione dello 0,50%;
- 960 grammi di fibre per la concentrazione limite dell'1,0%.

La stessa matrice dei campioni, precedentemente riportata sotto forma di concentrazione percentuale di fibre per ogni miscela, può essere riproposta considerando il quantitativo in peso di fibre inserite in ogni impasto:

Tipo di rinforzo	Concentrazione di fibre (grammi per impasto)		
Fibre assenti	0.0 g		
STR 1 - Black [30 mm]	240 g	480 g	960 g
STR 1 - Black [20 mm]	240 g	480 g	960 g
Mix eterogeneo di fibre	240 g	480 g	960 g

Tabella 6-2: matrice delle 10 miscele utilizzate in funzione del peso di fibre di rinforzo inserite

Complessivamente sono state confezionate dieci diverse miscele per analizzare le variazioni nel comportamento meccanico del calcestruzzo fibrorinforzato. La sequenza dei getti è stata pianificata in base alla disponibilità delle casseforme, ottimizzando così sia le fasi di produzione dei provini che i tempi di maturazione necessari prima delle prove di laboratorio. Le caratteristiche di ogni getto e la relativa catalogazione sono riportate nella tabella 6.3.

Sigla campioni	Tipologia di fibre di rinforzo	Lunghezza fibre	Dosaggio (% in peso)	Dosaggio (peso fibre)	Descrizione campioni
G1 - Nostring	Nessuna fibra		0.00%	0 g	Calcestruzzo Bianco
G2	STR 1 - Black	30 mm	0.25%	240 g	Fibrorinforzato omogeneo
G3	STR 1 - Black	30 mm	0.50%	480 g	Fibrorinforzato omogeneo
G4	STR 1 - Black	30 mm	1.00%	960 g	Fibrorinforzato omogeneo
G5	STR 1 - Black	20 mm	0.25%	240 g	Fibrorinforzato omogeneo
G6	STR 1 - Black	20 mm	0.50%	480 g	Fibrorinforzato omogeneo
G7	STR 1 - Black	20 mm	1.00%	960 g	Fibrorinforzato omogeneo

G8	Mix Eterogeneo di fibre	30 mm	0.25%	240 g	Fibrorinforzato misto
G9	Mix Eterogeneo di fibre	30 mm	0.50%	480 g	Fibrorinforzato misto
G10	Mix Eterogeneo di fibre	30 mm	1.00%	960 g	Fibrorinforzato misto

Tabella 6-3: getti di calcestruzzo effettuati e relative caratteristiche di rinforzo

Le attività di produzione del conglomerato cementizio sono dunque il cuore delle operazioni effettuate in laboratorio. Si affronta dunque, in maniera più accurata, l'aspetto relativo ai diversi passaggi che hanno portato alla nascita dei campioni fibrorinforzati da testare, partendo dalle operazioni di preparazione del getto, alle fasi di maturazione e curing dei provini.

“Per il cemento armato si può affermare che l'elemento base, ovvero il conglomerato, è tanto variabile e mutevole quanto possono esserlo gli individui di una stessa specie vivente” [16], così l'ingegnere Pierluigi Nervi descrive le difficoltà nel conoscere le varie incertezze che derivano dalla natura del cemento armato. Tali incertezze dipendono, in primo luogo, dalle proprietà dei singoli componenti della miscela, i quali presentano una naturale variabilità intrinseca. A questo fattore si aggiungono le tolleranze operative relative al dosaggio dei vari ingredienti e, in modo particolare, alla quantificazione dell'acqua d'impasto. Tutti questi aspetti rientrano nella fase di confezionamento del calcestruzzo, durante la quale i diversi costituenti vengono miscelati fino a ottenere una massa omogenea allo stato fresco, pronta per essere gettata nelle casseforme. Risulta determinante anche la fase di compattazione tramite vibrazione, necessaria per garantire la corretta disposizione del materiale ed eliminare eventuali vuoti nel campione indurito. Tuttavia, una vibrazione eccessiva può causare la segregazione dei componenti, portando a una distribuzione non uniforme degli inerti. Infine, assumono un ruolo centrale le procedure di maturazione del calcestruzzo, il quale deve essere adeguatamente protetto per evitare un'evaporazione troppo rapida dell'acqua d'impasto. Tale fenomeno innescherebbe infatti il ritiro igrometrico, generando tensioni interne che porterebbero alla fessurazione dell'elemento nel tentativo di ristabilire il proprio equilibrio interno.

È stata dedicata particolare cura alla fase di confezionamento dei campioni, a partire dalle operazioni preliminari al getto. Tali attività hanno riguardato, in prima

istanza, la preparazione e la pesatura dei singoli costituenti, ciascuno dosato in conformità con la miscela standardizzata di riferimento (si veda il capitolo 4.3).

Per quanto concerne le specifiche delle casseforme e dei loro trattamenti superficiali, si è fatto riferimento alle NTC 2018 [3], secondo le quali: il calcestruzzo fibrorinforzato deve essere prodotto seguendo le stesse modalità di confezionamento dei conglomerati cementizi ordinari ad eccezione di quanto deriva dall'introduzione delle fibre, rispettando tutte le indicazioni presenti nel manuale di preparazione ed installazione, così come definito dalle "Linee guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC"[17]. Si è fatto dunque riferimento a tali linee guida per l'allestimento delle casseforme, selezionate con caratteristiche geometriche e materiali differenti. Nello specifico, per i provini cubici sono stati utilizzati stampi in polistirolo, invece per i provini cilindrici sono state impiegate casseforme in PVC (altezza 200 mm, base metallica diametro 100 mm), dotate di un sistema di apertura volto ad agevolare le successive operazioni di sformatura. Infine, per la realizzazione dei campioni prismatici, si è fatto ricorso a stampi in acciaio a sezione quadrata di lato 100 mm e lunghezza 500 mm, anch'essi smontabili per consentire una più agevole estrazione dell'elemento indurito. Al fine di favorire ulteriormente il distacco dalle pareti, è stato applicato preventivamente a pennello uno specifico agente disarmante (Mapeform DMA 2000) su tutte le superfici interne dei casseri prima del getto.

Infine, è stata predisposta la strumentazione necessaria per l'esecuzione dei lavori. Il macchinario principale per la produzione del conglomerato è stato una betoniera a bicchiere (Loire-Betonniere B150, capacità 115 litri), idonea a garantire il volume di impasto richiesto per ogni ciclo di getto. Altrettanto fondamentale si è rivelato l'impiego del vibratore, strumento essenziale per garantire il corretto costipamento della miscela all'interno delle casseforme ed eliminare l'aria inglobata.



Figura 6-7: betoniera a bicchiere utilizzata per la realizzazione dei getti in laboratorio

Per le procedure di esecuzione dei getti si sono seguite le indicazioni riportate nelle “Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio o polimeriche” [2], secondo le quali si procede con le stesse modalità di produzione dei calcestruzzi ordinari, ad eccezione della fase di introduzione delle fibre che richiede particolari accorgimenti. Per garantire una distribuzione omogenea delle fibre all'interno dell'impasto, si richiede di valutare preliminarmente lo stato del materiale, ovvero verificare se le fibre si presentano sfuse oppure se tendono a formare agglomerati o a incollarsi tra loro. In questi casi sarebbe necessario intervenire con adeguati sistemi di setacciatura per separarle prima della miscelazione. Nel caso specifico delle fibre ricavate dalle corde delle racchette da tennis, la particolare struttura polimerica del materiale impedisce che esse aderiscano l'una all'altra. Inoltre, dal punto di vista geometrico, queste fibre sono prive di ganci o curvature che potrebbero favorire l'aggancio meccanico tra i vari filamenti. Di conseguenza, nella sperimentazione in esame non si sono riscontrati problemi di questo tipo e la dispersione delle fibre è avvenuta senza difficoltà.

Inoltre, la normativa di riferimento attribuisce grande importanza alle corrette procedure di getto e vibrazione. Le linee guida sottolineano infatti che il calcestruzzo fresco deve essere messo in opera in modo da garantire un'adeguata compattazione e una perfetta omogeneità, requisiti indispensabili affinché il materiale possa raggiungere le prestazioni strutturali previste dal progetto. Di conseguenza, è necessario prestare la massima attenzione sia alle modalità di

esecuzione sia alla durata della vibrazione, al fine di evitare la segregazione delle fibre, compromettendone la distribuzione uniforme all'interno della matrice cementizia. Durante le attività sperimentali in laboratorio, si è infatti osservato che una vibrazione eccessiva o prolungata comporta effetti indesiderati, portando le fibre a concentrarsi principalmente sulla superficie del getto o ad accumularsi attorno all'elemento vibrante immerso. Risulta quindi fondamentale limitare i tempi di costipamento per non alterare la corretta disposizione del rinforzo fibroso all'interno del cassero.

7 CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

7.1 PROGRAMMA SPERIMENTALE E METODOLOGIE DI PROVA

Per definire il profilo prestazionale del calcestruzzo fibrorinforzato prodotto in laboratorio, è stata predisposta una specifica campagna sperimentale volta a indagare le proprietà meccaniche del conglomerato. La caratterizzazione di questo materiale richiede un approccio volto alla conoscenza dei diversi aspetti comportamentali, capace di valutare sia la resistenza a compressione tipica della matrice cementizia, sia l'intrinseca capacità portante a trazione conferita dalle fibre, le quali agiscono in parziale sostituzione delle armature metalliche tradizionali. Inoltre, in accordo con le normative vigenti e le specifiche linee guida di settore, il metodo più autorevole per classificare e comprendere le potenzialità di un calcestruzzo fibrorinforzato risiede nell'analisi del suo comportamento a flessione.

La definizione della campagna sperimentale è stata sviluppata in stretta osservanza delle "Linee guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati (FRC)"[17]. Nello specifico, si è fatto riferimento al capitolo 2.3.3 del suddetto documento, il quale elenca rigorosamente le proprietà meccaniche necessarie ai fini della qualificazione del materiale. Tali proprietà hanno costituito la base programmatica per l'individuazione dei test di laboratorio necessari. In particolare, le Linee Guida impongono la determinazione delle seguenti informazioni:

- classe di resistenza a compressione determinata con la stessa procedura di prova prevista per il calcestruzzo senza fibre;
- Valore medio del modulo elastico (E_{fm}): è accettato anche il valore ricavato dalla correlazione con la resistenza a compressione, come previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per il calcestruzzo senza fibre;
- resistenza a trazione uniassiale: anche in tal caso, per i materiali non incrudenti si può utilizzare la correlazione con la resistenza a compressione (f_{ck}), come previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per il calcestruzzo senza fibre (f_{ctm}).

- resistenza a flessione al limite di proporzionalità determinata mediante prova a flessione su provino intagliato secondo la UNI EN 14651;
- resistenza a flessione in fase fessurata ($f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$);
- modulo di Poisson (ν_{fm} , valore medio): si assume corrispondente a quello previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per il calcestruzzo privo di fibre;
- coefficiente di dilatazione termica lineare (α_T): si assume corrispondente a quello previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per il calcestruzzo privo di fibre.

Parte delle proprietà richieste coincide con quelle della matrice cementizia priva di fibre, per la loro definizione si è pertanto fatto riferimento ai parametri tecnici dichiarati nella scheda tecnica del calcestruzzo predosato impiegato in laboratorio. Le restanti grandezze sono state invece ricavate attraverso una specifica attività sperimentale o mediante elaborazioni analitiche basate sui dati ottenuti dai test.

Il programma sperimentale è stato dunque strutturato attraverso diverse tipologie di test sui campioni prodotti. In primo luogo, sono state eseguite le classiche prove di compressione su provini cubici, seguendo i protocolli previsti per i calcestruzzi ordinari. Tali test hanno permesso di confrontare la resistenza a compressione del FRC rispetto a quella della matrice di riferimento priva di fibre. Sulla base di tale valore di resistenza, è stato poi ricavato il valore medio del modulo elastico (E_{fm}) tramite la relazione analitica riportata dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Parallelamente, sono state condotte prove di trazione indiretta (prove brasiliane) su campioni cilindrici, con l'obiettivo di osservare la risposta del materiale sottoposto a sforzo di trazione e analizzare il contributo delle fibre nel contrastare l'apertura delle fessure. Per limitazioni tecniche si è scelto di non procedere tramite prova di trazione uniassiale, ma di basarsi sui risultati ottenuti dalla trazione indiretta, validati anche dall'espressione che correla la resistenza a compressione (f_{ck}) alla resistenza a trazione media del materiale (f_{ctm}).

Il nucleo centrale della ricerca si è poi focalizzato sulle prove di flessione, eseguite in stretta conformità con le indicazioni delle Linee Guida [17]. Questi test rivestono un'importanza cruciale, in quanto permettono di determinare i valori di resistenza residua post-fessurazione ($f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$), parametri fondamentali per la classificazione meccanica del conglomerato.

Sebbene le suddette linee guida prevedano la determinazione di tali parametri mediante prove di flessione su provini intagliati (secondo la norma UNI EN 14651), si è scelto di adottare una procedura differente per ovviare alle complessità tecniche e alle tempistiche legate alla realizzazione dell'intaglio. Si è fatto quindi riferimento alle 'Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato'[2], le quali consentono l'impiego di campioni prismatici privi di intaglio. Tale documento specifica, infatti, che i parametri strutturali di resistenza a flessione possono essere validamente determinati anche attraverso una prova di flessione su quattro punti su provini non intagliati. Inoltre, la prova a flessione rappresenta lo strumento principale per valutare l'efficacia delle corde di racchette da tennis come alternativa sostenibile alle fibre sintetiche industriali: è proprio in questa configurazione di carico, infatti, che si riscontrano le differenze prestazionali più significative tra i campioni fibrorinforzati e quelli non rinforzati.

7.2 PROVE DI COMPRESSIONE

Le prove di compressione sono state condotte in conformità alla norma UNI EN 12390-3 [18], protocollo fondamentale per la determinazione della classe di resistenza del materiale. Tale proprietà è definita dai valori caratteristici della resistenza cubica (R_{ck}) e cilindrica (f_{ck}), riferiti rispettivamente a provini cubici con lato da 150 mm e cilindri di diametro 150 mm con altezza 300 mm. La normativa specifica le procedure per determinare la resistenza del calcestruzzo su campioni appositamente confezionati e stagionati, prevedendo l'esecuzione dei test al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione. Per la presente attività di ricerca, si è scelto di impiegare provini cubici gettati in casseforme di polistirolo da 150 mm di lato, garantendo il pieno rispetto delle prescrizioni dimensionali vigenti. La pianificazione dei getti e delle sessioni di prova è stata rigorosamente organizzata per garantire a ogni tipologia di conglomerato un tempo di maturazione costante di 28 giorni. Tale approccio è stato adottato per assicurare l'uniformità dei risultati e prevenire discrepanze legate a incrementi di rigidità o resistenza derivanti da tempi di stagionatura prolungati o disomogenei.

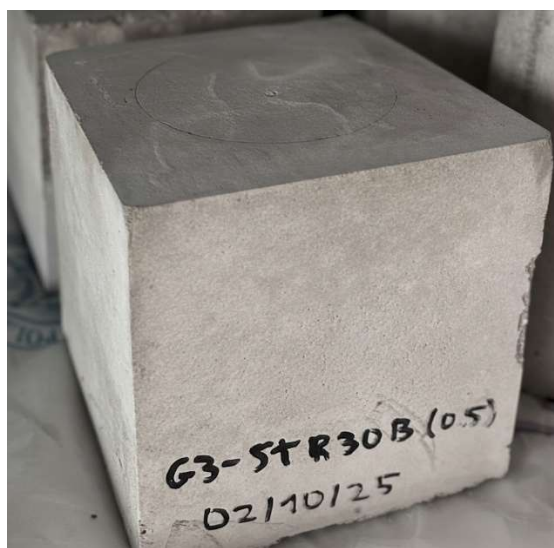


Figura 7-1: vista di un provino cubico (150x150x150 mm) prodotto per l'attività di ricerca svolta

Il getto viene riposto in apposite cubiere, preventivamente trattate con un sottile strato di agente disarmante, e sottoposto a costipazione per garantire la massima densità dell'impasto. Tale operazione è stata effettuata tramite vibrazione meccanica, prestando particolare cautela nel caso delle miscele fibrorinforzate: si è evitato, infatti, un eccessivo tempo di vibrazione per scongiurare il rischio di segregazione o un'alterazione della distribuzione uniforme delle fibre all'interno della matrice. In conformità alle prescrizioni normative, che richiedono una conservazione controllata a circa 20°C per una corretta maturazione, i provini sono stati custoditi in un ambiente a temperatura stabile. Per garantire condizioni igrotermiche ottimali, i campioni sono stati inoltre protetti con teli di plastica. Tale accorgimento ha permesso di limitare l'evaporazione precoce dell'acqua d'impasto, mantenendo un elevato e costante livello di umidità e prevenendo fenomeni di ritiro plastico durante la fase di indurimento. Al termine del periodo di maturazione, i campioni sono stati sottoposti a prova di compressione in conformità alla norma UNI EN 12390-4 [19], che definisce i requisiti prestazionali delle macchine di prova e le modalità di misurazione della resistenza del calcestruzzo. Nello specifico, i test sono stati eseguiti presso il laboratorio MastrLAB del Politecnico di Torino, avvalendosi di strumentazioni adeguatamente tarate e del supporto di personale qualificato.



Figura 7-2: test di compressione su campioni cubici eseguito presso il laboratorio MastrLAB

Prima dell'esecuzione dei test, ogni provino è stato accuratamente pesato e misurato, procedura necessaria per determinare la densità del materiale e definire con precisione le superfici di contatto con i piatti della pressa. Il sistema di prova ha permesso di rilevare la forza massima applicata, consentendo di risalire al valore di R_{ck} (resistenza a compressione) del conglomerato. Contemporaneamente, il software di acquisizione dati ha generato le curve di carico, correlando la forza applicata al tempo trascorso fino al raggiungimento del punto di picco. I risultati dettagliati e le analisi derivanti da tali prove sono presentati nei capitoli successivi. Si è dunque programmata l'esecuzione di tale tipologia di test su ciascuno dei campioni cubici prodotti per ogni miscela, per un totale di 39 provini testati.

7.3 PROVE DI TRAZIONE INDIRECTA

Come precedentemente specificato, in accordo con le linee guida, i parametri strutturali che caratterizzano il comportamento a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato devono essere determinati mediante una prova di trazione diretta su provini non intagliati. Tale prova ha l'obiettivo di definire la curva tensione-deformazione, oltre che la resistenza di prima fessurazione, la resistenza ultima e le relative deformazioni. Essa, tuttavia, richiede l'impiego di provini di complessa realizzazione, dotati di forme specifiche per consentire l'aggrappo delle estremità tramite i morsetti necessari ad applicare lo sforzo di trazione. Sarebbero inoltre necessari campioni a spessore ridotto, al fine di concentrare gli sforzi di trazione nella sezione centrale.

Per ragioni tecniche connesse alla difficile geometria dei provini e alla complessità esecutiva delle prove su conglomerati cementizi, nonché per motivi legati alle tempistiche di produzione e di test, si è scelto di valutare la resistenza a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato mediante la prova di trazione indiretta. Quest'ultima, nota anche come prova brasiliana, risulta di più semplice esecuzione poiché prevede l'impiego di campioni cilindrici, facilmente confezionabili. Inoltre, l'applicazione del carico è agevolata trattandosi di uno sforzo di compressione che genera tensioni di trazione all'interno del cilindro, caricato lungo le generatrici opposte. Si è dunque programmata l'esecuzione di tale tipologia di test su ciascuno dei campioni cilindrici prodotti per ogni miscela, per un totale di 39 provini testati. Per lo svolgimento della prova di trazione indiretta si è fatto riferimento alle prescrizioni della normativa UNI EN 12390-6 [20], la quale illustra anche il principio di funzionamento del test, basato sull'applicazione di un carico di compressione lungo due generatrici opposte del cilindro. Tale sollecitazione induce una distribuzione degli sforzi che genera una tensione di trazione uniforme, ortogonale al piano di carico, lungo il diametro verticale. Di conseguenza, il provino giunge a rottura separandosi in due parti proprio lungo tale piano diametrale.



Figura 7-3: test di trazione indiretta su campioni cilindrici eseguito presso il laboratorio MastrLAB

I test, condotti utilizzando la strumentazione del laboratorio MastrLAB del Politecnico di Torino, forniscono in output esclusivamente il valore del carico di compressione applicato al momento della rottura del campione (fessurazione diametrale). Non è stato dunque possibile tracciare la curva sforzo-deformazione; tuttavia, si è utilizzato il dato sperimentale per determinare la resistenza a trazione del materiale applicando l'espressione riportata dalla norma:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (1.1)$$

dove:

- $f_{ct,sp}$ è la resistenza a trazione indiretta [MPa];
- F è il carico massimo a rottura [Newton].
- L è la lunghezza del provino: pari a 200 mm per le forme utilizzate.
- d è il diametro del provino: pari a 100 mm per le forme utilizzate

Da tale relazione si ottiene il valore della resistenza a trazione indiretta (splitting tensile strength: $f_{ct,sp}$). Tuttavia, sia le NTC 2018 che l'Eurocodice 2 distinguono la resistenza a trazione indiretta così ricavata dalla resistenza a trazione assiale (f_{ctm}), che costituisce il parametro di riferimento per i calcoli strutturali. Poiché la resistenza indiretta tende a sovrastimare quella assiale, la normativa prescrive l'impiego di un coefficiente correttivo che ne riduca il valore del 10%:

$$f_{ctm} = 0.9 \cdot f_{ct,sp} \quad (1.2)$$

Dalle prove di trazione indiretta condotte sui campioni fibrorinforzati, si è osservato che il carico massimo registrato coincide con la prima fessurazione della matrice e, dunque, con la rottura fragile del calcestruzzo. Sulla base di ciò, in termini numerici non si dovrebbe verificare una variazione importante tra i campioni privi di fibre e quelli in FRC, e ciò è stato confermato anche dai risultati dei test effettuati in laboratorio. Pertanto, questa tipologia di prova non è finalizzata a quantificare l'incremento di tenacità offerto dalle fibre, le quali si attivano solo in fase post-fessurativa, ovvero al termine della prova di trazione indiretta, bensì a verificare che i diversi dosaggi di fibre non compromettano le proprietà a trazione della matrice cementizia.

Tuttavia, portare a rottura i campioni è risultato fondamentale per apprezzare visivamente il meccanismo di funzionamento delle fibre, in particolare la loro capacità di cucitura delle fessure. Infatti, mentre i campioni in calcestruzzo ordinario, raggiunto il carico di picco, hanno subito una rottura fragile separandosi nettamente in almeno due parti, i cilindri in calcestruzzo fibrorinforzato, pur fessurandosi, hanno mantenuto la loro integrità fisica. Ovvero, non si verifica il collasso immediato del provino per rottura fragile, grazie all'azione delle fibre che agiscono come rinforzo cucendo le lesioni generate dalla rottura della matrice. Ciò ha prodotto campioni fessurati ma coesi, permettendo di valutare visivamente l'efficacia delle fibre ottenute dal riciclo delle corde delle racchette da tennis, le quali hanno dimostrato un'ottima aderenza alla matrice cementizia e una notevole capacità di opposizione all'apertura delle fessure.



Figura 7-4: provino cilindrico sottoposto a trazione indiretta. Particolare della fessurazione diametrale e delle fibre che si oppongono alla sua apertura

7.4 PROVE DI FLESSIONE

Al fine di quantificare con precisione l'apporto strutturale offerto dalle fibre di rinforzo all'interno della matrice, risulta indispensabile analizzare il comportamento del materiale quando è sottoposto a sollecitazioni di flessione. Questa specifica tipologia di prova rappresenta, di conseguenza, lo strumento decisivo per verificare se una determinata tipologia di fibra agisca concretamente come elemento atto a incrementare le proprietà meccaniche del calcestruzzo.

Durante la fase operativa di getto, si è quindi proceduto al confezionamento di provini prismatici in FRC, destinati a essere testati nel rigoroso rispetto delle prescrizioni definite dalle pertinenti Linee Guida. Tali normative impongono una lunghezza del prisma pari o superiore a 500 mm ($L \geq 500$ mm) e dimensioni trasversali, indicate con h (altezza) e b (larghezza), da selezionare secondo i criteri illustrati di seguito. Nello specifico, indicate con H l'altezza e con B la larghezza dell'elemento strutturale di riferimento, le dimensioni della sezione trasversale del provino (h e b) devono soddisfare le relazioni:

$$h = H \leq 150 \text{ mm} ; b \leq B \leq 450 \text{ mm}.$$

Avvalendosi dei casseri metallici disponibili in laboratorio, idonei a fornire campioni geometricamente conformi alla normativa vigente, sono stati realizzati provini prismatici in calcestruzzo aventi lunghezza pari a 500 mm e caratterizzati da una sezione trasversale quadrata con lato $h = b = 100$ mm. Infine, per quanto concerne la gestione post-getto, la maturazione dei provini realizzati in forme separate è stata condotta in stretta conformità con la norma UNI-EN 12390, seguendo la medesima procedura adottata per gli altri campioni caratterizzati da differenti geometrie.



Figura 7-5: casseforme metalliche (100x100x500 mm) utilizzate per la produzione dei campioni prismatici

La configurazione del test a flessione da eseguire è rigorosamente prescritta dalle Linee Guida per la progettazione degli elementi in FRC [2] e corrisponde a una prova di flessione su quattro punti condotta su provino non intagliato.

Tale metodologia di prova risulta applicabile specificamente nel caso di miscele contenenti aggregati con pezzatura massima $d \leq 32$ mm e fibre di lunghezza $l_f \leq 60$ mm. Di conseguenza, la miscela utilizzata per i test di laboratorio risulta pienamente conforme ai requisiti richiesti da tale procedura.

Nel corso di tali prove, oltre alla registrazione della forza applicata, è fondamentale ricavare un parametro di deformazione specifico, corrispondente all'allungamento δ misurato all'intradosso del provino, assumendo una base di misura di riferimento $a = 200$ mm. A tal fine, vengono fissati due punti di riferimento sulla superficie di intradosso del provino, distanziati esattamente di 200 mm tra loro. Nello spazio compreso tra tali riferimenti viene installato un trasduttore di spostamento, idoneo a misurare in continuo l'incremento di distanza che si verifica tra i due punti durante l'azione di flessione agente sul campione.

Altre prescrizioni riguardano il macchinario di prova, il quale deve essere dotato di idoneo dispositivo che permetta di effettuare le prove in controllo di spostamento. Trattandosi di un test a flessione su quattro punti, l'attrezzatura impiegata per la prova comprende un dispositivo di applicazione del carico dotato di:

- due cilindri superiori;
- un elemento di collegamento tra i due cilindri superiori, in grado di ripartire equamente ed uniformemente il carico applicato dalla macchina di prova;
- due cilindri inferiori di supporto.

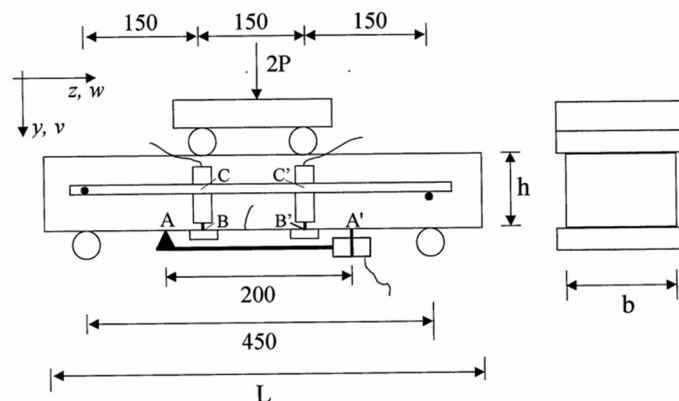


Figura 7-6: dispositivo di applicazione del carico per la prova di flessione su 4 punti (fonte: Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato)

Le Linee Guida forniscono inoltre dettagliate prescrizioni in merito alla geometria e alle caratteristiche meccaniche degli elementi costituenti il sistema di applicazione del carico. Nello specifico, la normativa richiede l'impiego di cilindri realizzati in acciaio a sezione circolare, con un diametro compreso nell'intervallo tra i 20 e i 40 mm, ed una lunghezza che ecceda di almeno 10 mm la larghezza del provino. Inoltre, ciascun rullo deve possedere la libertà di ruotare attorno al proprio asse principale e deve consentire un'inclinazione di $\pm 3^\circ$ nel piano perpendicolare all'asse longitudinale del provino, al fine di adattarsi ad eventuali imperfezioni geometriche.

Per quanto concerne la disposizione degli appoggi, la luce netta tra i cilindri inferiori deve essere fissata a 450 mm, mentre la distanza tra i due cilindri superiori di carico deve essere pari a 150 mm. Il dispositivo di carico utilizzato in laboratorio per le sperimentazioni soddisfa integralmente tali requisiti normativi. Si tratta, infatti, di un'attrezzatura di prova standardizzata, la cui caratteristiche geometriche e la cui disposizione degli appoggi rispettano perfettamente le quote e le tolleranze indicate dalla norma.



Figura 7-7: vista del sistema di carico e misurazione utilizzato per le prove di flessione

La prova di flessione su quattro punti viene condotta in regime di controllo di deformazione, con il preciso obiettivo di misurare l'allungamento δ relativo al tratto di riferimento A-A' (si veda la Figura 7-6) situato in corrispondenza dell'intradosso del provino (assimilabile al COD – *Crack Opening Displacement*). In accordo con le rigorose prescrizioni normative, l'incremento dell'allungamento δ all'intradosso deve essere imposto a una velocità costante fissata a 0.05 ± 0.01 mm/min. Solamente per valori di δ superiori alla soglia di 0.5 mm, è consentito aumentare progressivamente la velocità di spostamento fino a raggiungere un regime di 0.5 ± 0.1 mm/min. La procedura sperimentale deve protrarsi tassativamente almeno fino al raggiungimento di un valore di δ non inferiore a 4 mm.

L'obiettivo della prova è di determinare una curva che correli il carico all'entità di allungamento della fibra di intradosso del provino. Contestualmente, durante l'esecuzione del test si procede alla rilevazione della formazione di una o più fessure, annotandone l'eventuale posizione lungo la luce del provino.

Infatti, per tale specifica prova non si realizza l'intaglio in mezzzeria, di conseguenza non si forza la formazione della fessura in un punto geometrico prefissato, ma si lascia che essa si sviluppi naturalmente. Attraverso l'analisi della curva sperimentale carico-allungamento all'intradosso ($P - \delta$), è possibile derivare i valori dei parametri caratteristici f_{R1} e f_{R3} . Questi rappresentano le tensioni nominali residue nella sezione di mezzzeria, calcolate assumendo convenzionalmente un'ipotesi di distribuzione lineare degli sforzi. Nello specifico:

- f_{R1} identifica lo sforzo nominale in corrispondenza di un allungamento δ pari a 0.5 mm;
- f_{R3} corrisponde allo sforzo nominale misurato in corrispondenza di un allungamento δ di 2.5 mm.

Tali due grandezze risultano essere parametri imprescindibili per descrivere in modo esaustivo il comportamento meccanico post-fessurativo e le capacità strutturali del calcestruzzo fibrorinforzato oggetto di indagine.

8 RISULTATI SPERIMENTALI

Il presente capitolo analizza i risultati sperimentali derivanti dalle prove di laboratorio condotte sui campioni in calcestruzzo, confrontando le prestazioni della matrice ordinaria con quelle dei conglomerati rinforzati mediante diverse tipologie e dosaggi di fibre. La campagna sperimentale si è articolata nella realizzazione di dieci getti distinti, corrispondenti ad altrettante miscele, una delle quali priva di rinforzo e assunta come riferimento.

Per identificare le diverse miscele in funzione della tipologia di fibre impiegate e della loro concentrazione, è stato elaborato uno specifico codice di classificazione alfanumerico. La nomenclatura inizia con un numero progressivo che indica l'ordine cronologico del getto, seguito da una sigla descrittiva: per il calcestruzzo ordinario è stata adottata la dicitura "NoStrings", mentre per le miscele di calcestruzzo fibrorinforzato si è invece usata la sigla STR che indica la presenza di fibre ricavate dalle corde (strings). Tale sigla è seguita da un numero che indica la lunghezza in millimetri delle fibre inserite. Successivamente, una lettera identifica la tipologia di corda impiegata:

- la sigla B (*Black*) denota l'uso di corde nere modello *STR 1 - Black*, caratterizzate da proprietà meccaniche e geometriche uniformi;
- la sigla M (*Mixed*) indica invece l'impiego di un mix eterogeneo di corde di riciclo di diversa natura.

A chiusura della stringa alfanumerica, un valore riportato tra parentesi specifica la concentrazione in peso delle fibre all'interno della miscela, variabile tra i tre dosaggi predefiniti dello 0.25%, 0.50% e 1.00%. Lo schema grafico riportato in figura 8-1 riassume visivamente la struttura della nomenclatura adottata ed esplicita il significato di ogni singolo campo.

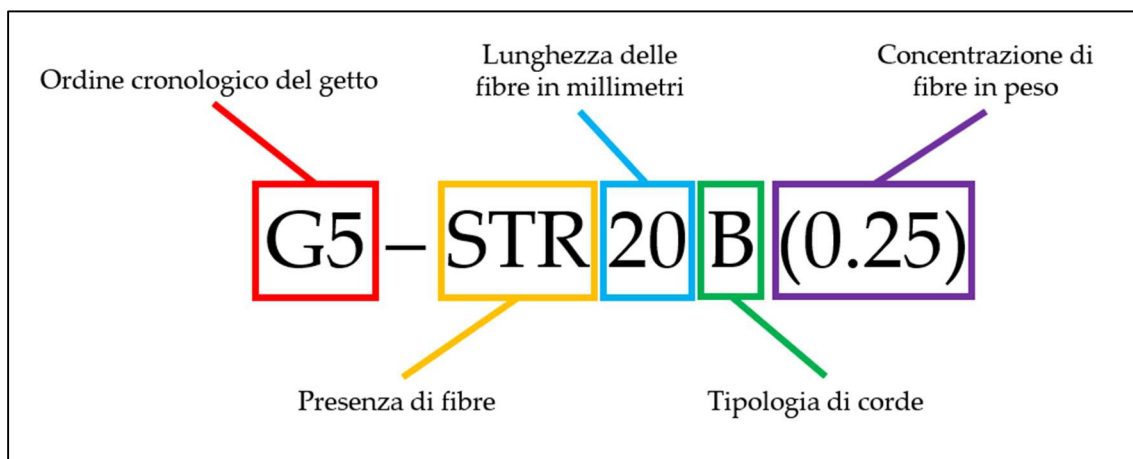


Figura 8-1: esempio esplicativo della nomenclatura utilizzata

Per ciascuna delle dieci miscele indagate, la fase di getto ha previsto il confezionamento di provini di geometria cubica, cilindrica e prismatica, destinati alle rispettive caratterizzazioni meccaniche. Per ogni tipologia di prova si è impiegata una pluralità di campioni, ciò è un requisito imprescindibile nell'ambito della ricerca sperimentale legato all'aleatorietà dei risultati, in tale ambito dovuta principalmente alla natura intrinsecamente eterogenea del calcestruzzo. La ripetizione del test su una serie di almeno tre campioni per ogni miscela consente di ridurre le oscillazioni dei dati sperimentali, permettendo di identificare ed eventualmente scartare valori anomali. In tal modo è stato possibile determinare un valore medio rappresentativo della reale resistenza del materiale e, attraverso il calcolo della deviazione standard, quantificare la dispersione dei risultati, la quale funge da indicatore diretto dell'omogeneità e della qualità del processo produttivo.

I risultati sperimentali sono esposti nel prosieguo del capitolo, organizzati in funzione della specifica tipologia di conglomerato analizzata. A titolo riepilogativo, la tabella 8-1 offre un quadro delle diverse serie prodotte, indicando per ognuna il numero esatto di campioni sottoposti a prova.

Sigla campioni	Numero cubi testati a compressione	Numero cilindri testati a trazione	Numero prismi testati a flessione
<i>G1 - Nostrings</i>	3	3	2
<i>G2 - STR30B (0.25)</i>	4	4	3
<i>G3 - STR30B (0.50)</i>	4	4	3
<i>G4 - STR30B (1.00)</i>	4	4	3
<i>G5 - STR20B (0.25)</i>	4	4	3
<i>G6 - STR20B (0.50)</i>	4	4	3
<i>G7 - STR20B (1.00)</i>	4	4	3
<i>G8 - STR30M (0.25)</i>	4	4	3
<i>G9 - STR30M (0.50)</i>	4	4	3
<i>G10 - STR30M (1.00)</i>	4	4	3

Tabella 8-1: riepilogo del numero di ogni campione per miscela sottoposto a test

8.1 ANALISI DEL COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE

Le prestazioni dei conglomerati cementizi prodotti, sottoposti a compressione, sono state delineate attraverso una campagna di test condotta presso il laboratorio MastrLAB del Politecnico di Torino. Preliminarmente all'esecuzione delle prove, ogni provino cubico è stato oggetto di misurazioni dimensionali e pesatura, procedure necessarie per definire con precisione le caratteristiche geometriche e la densità da correlare alla risposta meccanica. Nei successivi paragrafi sono riportati analiticamente i dati relativi a ciascun provino, inclusi i parametri meccanici fondamentali, quali il carico di rottura (espresso in kN) e la corrispondente resistenza cubica (R_{ck}). Al fine di caratterizzare univocamente ogni miscela, è stato calcolato il valore medio della resistenza, accompagnato dalla deviazione standard per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti.

8.1.1 Campioni serie "G1-Nostrings"

I provini iniziali della campagna sperimentale hanno la funzione di definire i valori di riferimento, essi sono stati realizzati impiegando esclusivamente la matrice cementizia standard priva di rinforzo fibroso, così da consentire un confronto con le prestazioni dei successivi campioni fibrorinforzati. I campioni della serie denominata "NoStrings", sottoposti alle prove di compressione, corrispondono a tre provini cubici confezionati in data 12/09/2025 e testati il 10/10/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma.



Figura 8-2: Tre provini cubici facenti parte della serie con miscela priva di fibre (G1-Nostrings)

Di seguito sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test:

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3
d_1 [mm]	150	150	150
d_2 [mm]	150	150	149
h [mm]	150	150	150
S_0 [mm ²]	22500	22500	22350
ρ [g/cm ²]	2.30	2.34	2.35
F [kN]	818.49	833.43	839.61
R_{ck} [MPa]	36.38	38.04	37.57

Tabella 8-2: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G1-Nostrings

Concentrandosi sui valori di resistenza cubica caratteristica del materiale, è stato possibile determinare un valore medio rappresentativo della sua reale resistenza (R_{ck} medio) pari a $R_{ck,m} = 36.99 \text{ MPa}$. Inoltre, per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 0.49$ e $CoV = 1.30\%$.

In aggiunta a questi dati, il macchinario di prova fornisce un diagramma che correla la forza applicata alla durata della prova:

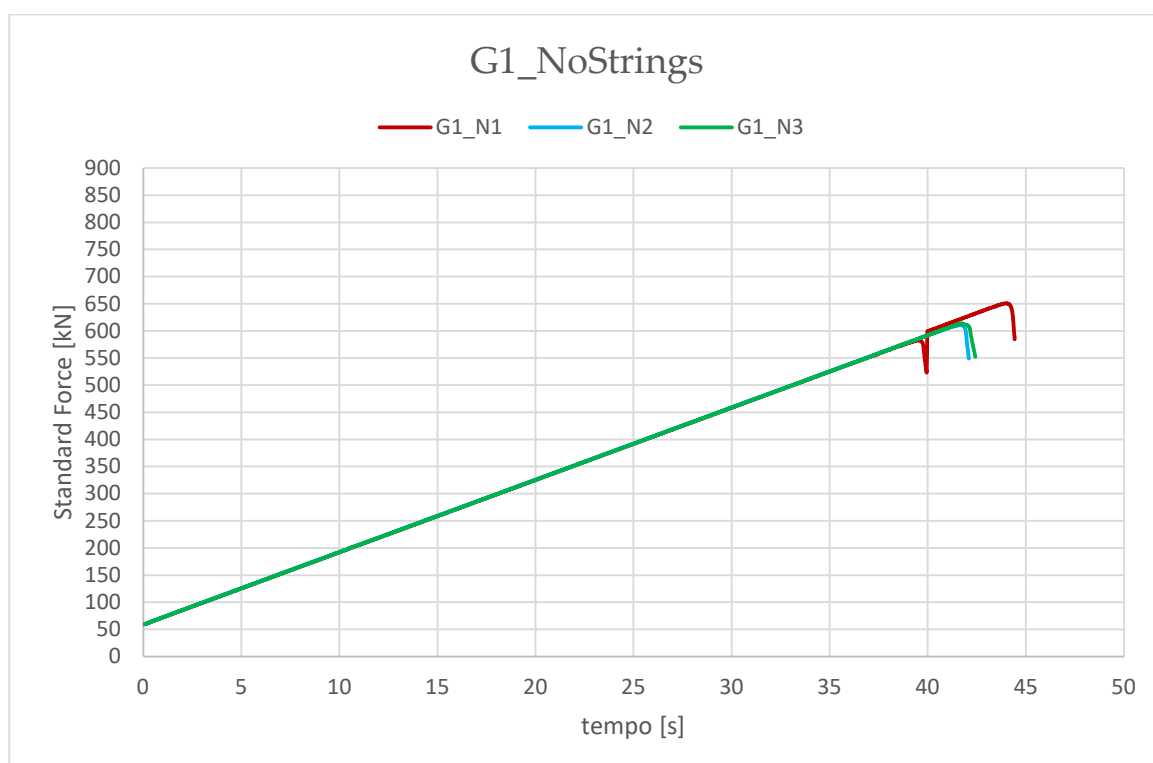


Figure 8-3: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G1-Nostrings

I risultati ottenuti dai provini di riferimento confermano le aspettative iniziali, risultando coerenti con la classe di resistenza del calcestruzzo predosato impiegato, dichiarata dal produttore pari a $R_{ck} = 30 \text{ MPa}$. Inoltre, tali esiti validano la correttezza del dosaggio degli altri componenti della miscela e attestano l'efficacia delle procedure di miscelazione e delle condizioni di maturazione adottate per i campioni.

8.1.2 Campioni serie "G2 - STR30B (0.25)"

I provini della serie G2 - STR30B (0.25) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 30 mm ottenute dal taglio di corde per racchette da tennis di riciclo. Nello specifico, sono state impiegate corde STR 1 - Black (colore nero), in quanto disponibili in ampie quantità in laboratorio, ed in grado di garantire proprietà meccaniche note rispetto alle altre corde recuperate. Tale tipologia di corda, ridotta in fibre da 30 millimetri, è stata usata per produrre i campioni delle serie G2, G3 e G4, variandone esclusivamente il dosaggio. Nello specifico, per la miscela in esame è stata adottata una concentrazione pari allo 0.25% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I campioni sottoposti alle prove di compressione corrispondono a quattro provini cubici confezionati in data 26/09/2025 e testati il 24/10/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Nella tabella 8-3 sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test.

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	150	150	150	150
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22500	22500	22500	22500
ρ [g/cm ³]	2.32	2.30	2.32	2.30
F [kN]	858.3	820.65	867.77	859.52
R_{ck} [MPa]	38.15	36.47	38.57	38.20

Tabella 8-3: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G2-STR30B (0.25)

Concentrandosi sui valori di resistenza cubica caratteristica del materiale, è stato possibile determinare un valore medio rappresentativo della sua reale resistenza (R_{ck} medio) pari a $R_{ck,m} = 37.85 \text{ MPa}$. Inoltre, per valutare il grado di dispersione

dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 0.81$ e $CoV = 2.13\%$.

In aggiunta a questi dati, il macchinario di prova fornisce un diagramma che correla la forza applicata alla durata della prova:

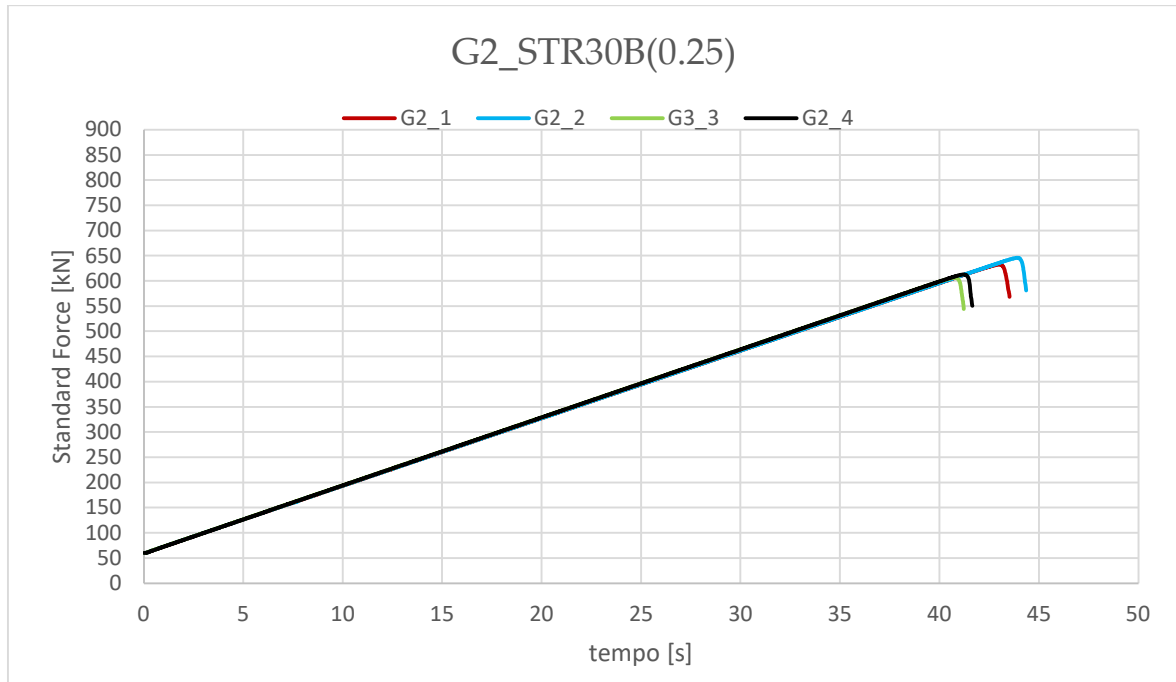


Figure 8-4: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G2-STR30B (0.25)

I risultati ottenuti mostrano un andamento analogo ai valori di riferimento, evidenziando un incremento di resistenza trascurabile. In linea con le aspettative, l'aggiunta di fibre in dosaggi così ridotti (0.25% in peso) non è tale da generare un effetto di confinamento significativo capace di aumentare la capacità portante a compressione della matrice. L'immagine seguente mostra la sezione interna di un provino di tale serie dopo la prova, consentendo di apprezzare l'effettiva distribuzione delle fibre all'interno del conglomerato.



Figura 8-5: vista interna di un campione cubico della serie G2-STR30B (0.25) post rottura per compressione

8.1.3 Campioni serie “G3 - STR30B (0.50)”

I provini della serie G3 - STR30B (0.50) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 30 mm ottenute dal taglio di corde STR 1 - Black, inserite adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I campioni sottoposti alle prove di compressione corrispondono a quattro provini cubici confezionati in data 02/10/2025 e testati il 31/10/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Nella tabella 8-4 sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test.

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	150	150	150	150
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22500	22500	22500	22500
ρ [g/cm ³]	2.31	2.30	2.30	2.29
F [kN]	781.38	792.02	728.04	726.16
R_{ck} [MPa]	34.73	35.20	32.36	32.27

Tabella 8-4: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G3-STR30B (0.50)

Considerando i valori di resistenza cubica caratteristica del materiale, è stato ricavato un valore medio rappresentativo della resistenza (R_{ck} medio) pari a $R_{ck,m} = 33.64 \text{ MPa}$. Inoltre, per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 1.54$ e $CoV = 4.58\%$.

In aggiunta a questi dati, il macchinario di prova fornisce un diagramma che correla la forza applicata alla durata della prova:

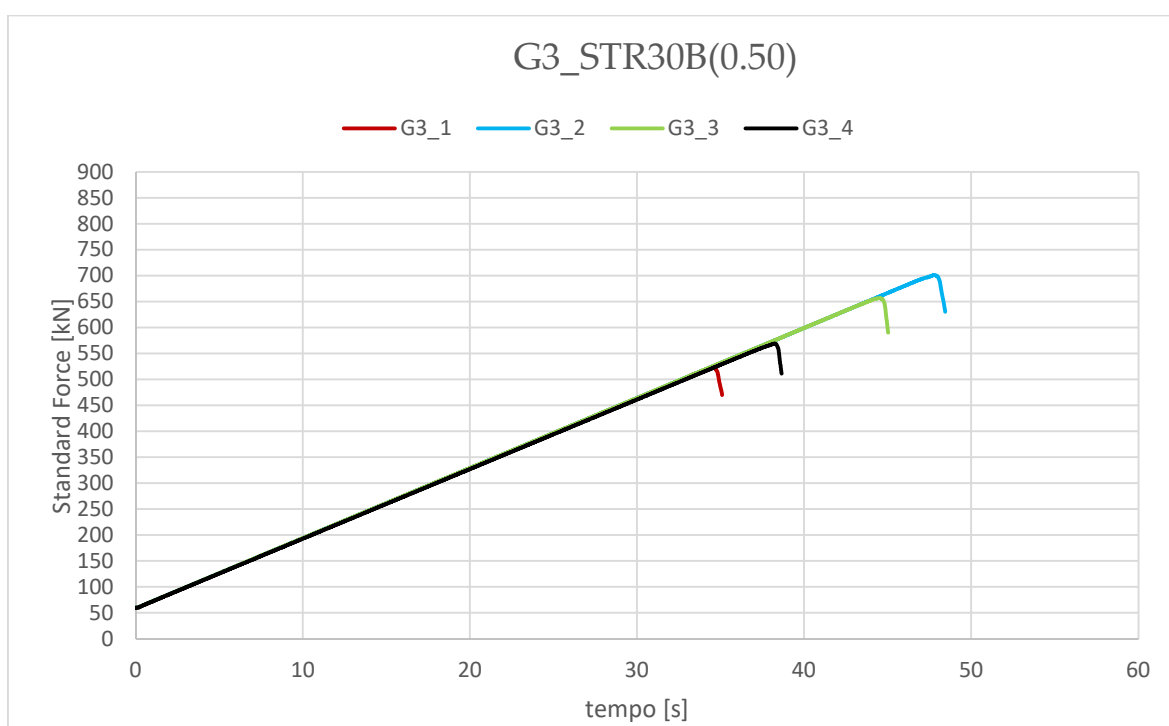


Figura 8-6: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G3-STR30B (0.50)

Dai risultati si evince una riduzione dei valori di resistenza caratteristica cubica del materiale, nello specifico si osserva un calo di circa 3 MPa rispetto alla miscela di riferimento e tale divario prestazionale risulta ancora più marcato se confrontato con i valori ottenuti dalle serie a minor contenuto di fibre. L'immagine seguente mostra la sezione interna di un provino di tale serie dopo la prova, consentendo di apprezzare l'effettiva distribuzione delle fibre all'interno del conglomerato.



Figura 8-7: vista interna di un campione cubico della serie G3-STR30B (0.50) post rottura per compressione

8.1.4 Campioni serie “G4 - STR30B (1.00)”

I provini della serie G4 - STR30B (1.00) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia il dosaggio più elevato di fibre da 30 mm ottenute dal taglio di corde STR 1 - Black. Si è dunque adottata una concentrazione pari a 1.00% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro provini cubici sottoposti al test sono stati confezionati in data 07/10/2025 e testati il 04/11/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test:

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	150	150	150	150
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22500	22500	22500	22500
ρ [g/cm ³]	2.26	2.25	2.28	2.28
F [kN]	791.49	760.52	758.51	742.19
R_{ck} [MPa]	35.18	33.80	33.53	32.99

Tabella 8-5: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G4-STR30B (1.00)

Considerando i valori di resistenza cubica caratteristica del materiale, è stato ricavato un valore medio rappresentativo della resistenza (R_{ck} medio) pari a **$R_{ck,m} = 33.87$ MPa.**

Inoltre, per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 0.93$ e $CoV = 2.75\%$.

In aggiunta a questi dati, il macchinario di prova fornisce un diagramma che correla la forza applicata alla durata della prova:

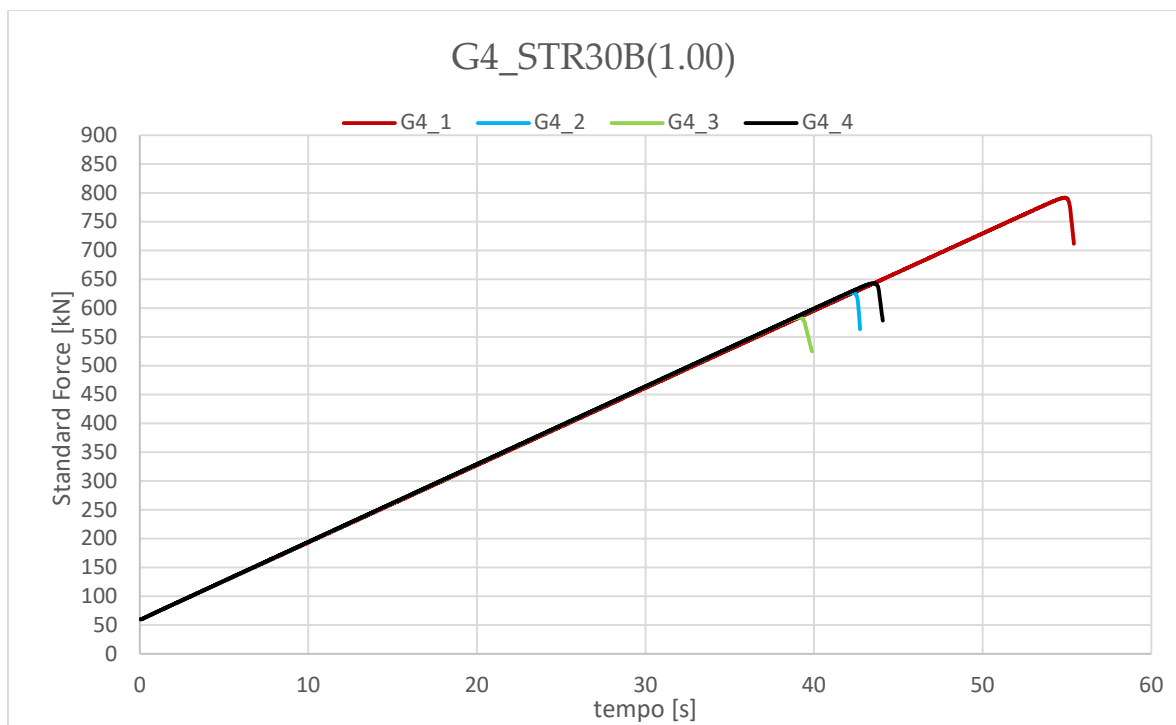


Figura 8-8: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G4-STR30B (1.00)

Anche per i campioni appartenenti a questa serie, caratterizzati dal massimo dosaggio di fibre, si riscontra una riduzione della resistenza cubica del materiale. Il calo si attesta sullo stesso ordine di grandezza riscontrato per i provini con concentrazione allo 0.50% in peso, confermando una possibile saturazione. Nell'immagine sottostante è possibile osservare l'elevata densità di fibre all'interno della matrice dei provini di tale serie, corrispondente all'1% in peso, che comporta una significativa distribuzione osservabile della sezione trasversale.



Figura 8-9: vista interna di un campione cubico della serie G4-STR30B (1.00) post rottura per compressione

8.1.5 Campioni serie “G5 – STR20B (0.25)”

I provini della serie G5 – STR20B (0.25) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 20 mm ottenute dal taglio di corde per racchette da tennis di riciclo del tipo STR 1 - Black. Tali fibre da 20 millimetri sono state impiegate anche per produrre i campioni delle serie G6 e G7, variandone esclusivamente il dosaggio. Nello specifico, per la miscela in esame è stata adottata una concentrazione pari allo 0.25% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I campioni sottoposti alle prove di compressione corrispondono a quattro provini cubici confezionati in data 20/10/2025 e testati il 17/11/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test:

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	149	150	149	150
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22350	22500	22350	22500
ρ [g/cm ³]	2.36	2.38	2.36	2.37
F [kN]	852.87	867.18	833.82	836.91
R_{ck} [MPa]	38.16	38.54	37.31	37.2

Tabella 8-6: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G5-STR20B (0.25)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (R_{ck} medio) è pari a $R_{ck,m} = 37.80 \text{ MPa}$, con una deviazione standard $\sigma = 0.65$ ed un coefficiente di variazione $CoV = 1.72\%$.

Si riportano inoltre i diagrammi che correlano la forza applicata alla durata della prova (fig. 8-10).

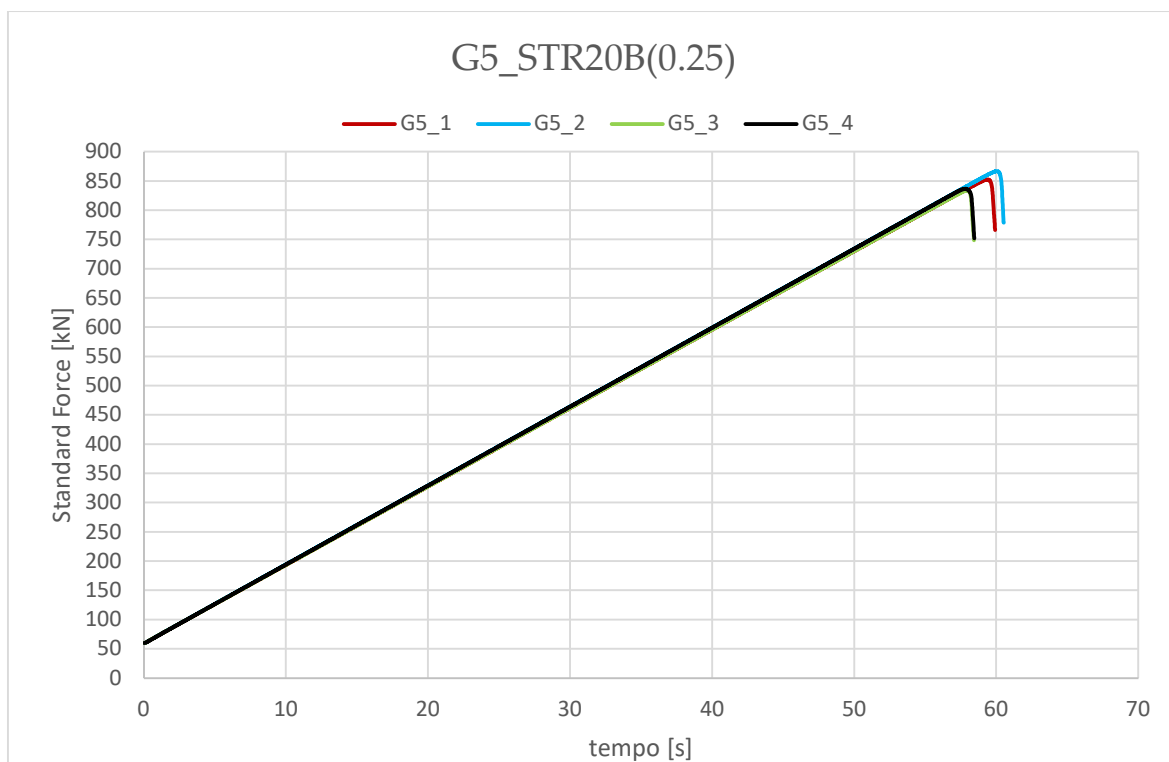


Figura 8-10: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G5-STR20B (0.25)

I risultati dei test evidenziano prestazioni in linea con la miscela di riferimento e un valore medio pressoché identico a quello della miscela con fibre da 30 mm a parità di concentrazione. Si conferma quindi che, con un dosaggio contenuto, non si verificano riduzioni della resistenza a compressione, ma neppure incrementi rispetto alla matrice priva di fibre. L'aggiunta di fibre in quantità ridotte (0.25% in peso) non è infatti sufficiente a generare un effetto di confinamento significativo, capace di aumentare la capacità portante a compressione della matrice.

La figura 8-11 mostra la sezione interna di un provino di tale serie dopo la prova, consentendo di apprezzare l'effettiva distribuzione delle fibre di lunghezza ridotta all'interno del conglomerato.



Figura 8-11: vista interna di un campione cubico della serie G5-STR20B (0.25) post rottura per compressione

8.1.6 Campioni serie “G6 – STR20B (0.50)”

I provini della serie G6 – STR20B (0.50) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 20 mm adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I campioni sottoposti alle prove di compressione corrispondono a quattro provini cubici confezionati in data 24/10/2025 e testati il 21/11/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test:

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	149	149	149	150
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22350	22350	22350	22500
ρ [g/cm ³]	2.32	2.33	2.33	2.34
F [kN]	831.59	766.11	740.50	802.63
R_{ck} [MPa]	37.21	34.28	33.13	35.67

Tabella 8-7: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G6-STR20B (0.50)

Considerando i valori di resistenza cubica caratteristica del materiale, è stato ricavato un valore medio rappresentativo della resistenza (R_{ck} medio) pari a **$R_{ck,m} = 35.07$ MPa.**

Inoltre, per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 1.76$ e $CoV = 5.02\%$.

In aggiunta a questi dati, il macchinario di prova fornisce un diagramma che correla la forza applicata alla durata della prova:

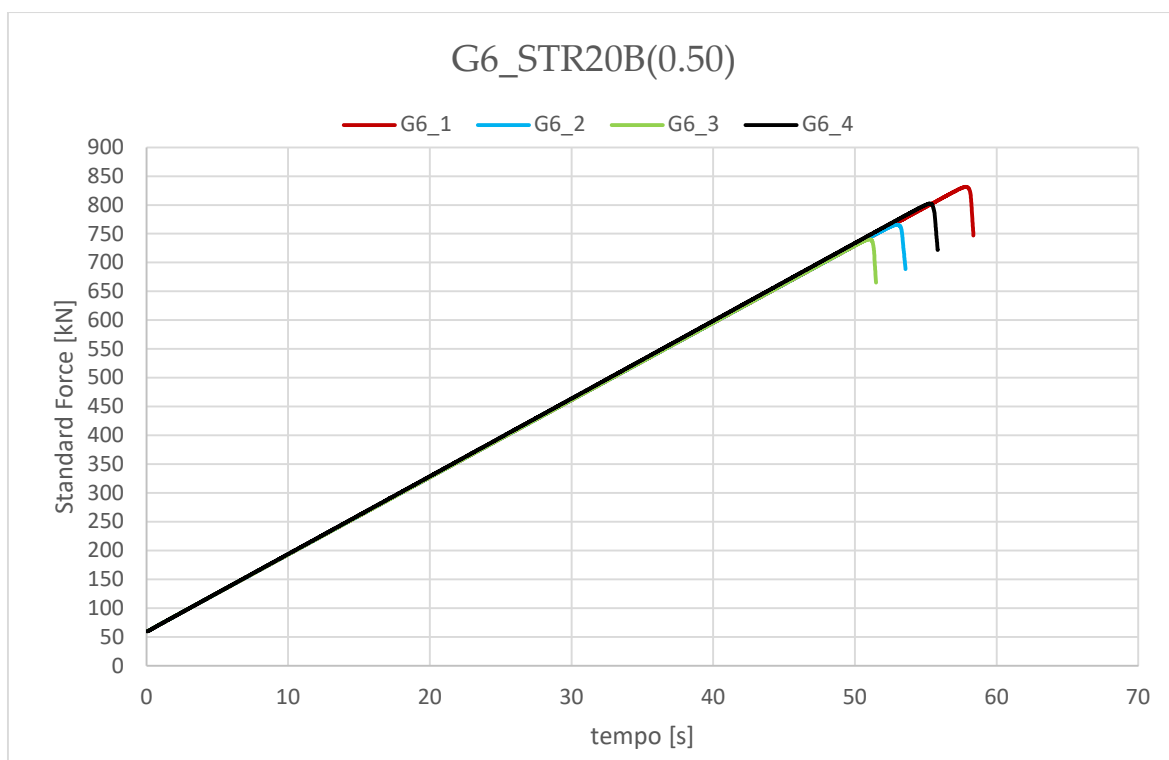


Figura 8-12: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G6-STR20B (0.50)

Dai risultati dei test si evince un andamento simile a quello dei campioni con pari concentrazione di fibre da 30 mm. In generale, tuttavia, le fibre da 20 mm hanno fornito valori di resistenza più elevati sul singolo provino, con picchi fino a un R_{ck} di 37 MPa, a dimostrazione di una marcata dispersione dei dati, evidenziata dal calcolo della deviazione standard. Tale variabilità, a parità di miscela, è imputabile alla distribuzione e soprattutto all'orientamento delle fibre rispetto ai piani di frattura, portando ad avere campioni sensibilmente meno performanti di altri. Complessivamente, il dosaggio utilizzato per questa serie risulta fornire prestazioni inferiori rispetto ai campioni con lo 0.25% in peso di fibre.

8.1.7 Campioni serie "G7 – STR20B (1.00)"

I provini della serie G7 – STR20B (1.00) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia il dosaggio più elevato di fibre da 20 mm ottenute dal taglio di corde STR 1 - Black. Si è dunque adottata una concentrazione pari a 1.00% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro provini cubici sottoposti al test sono stati confezionati in data 29/10/2025 e testati il 26/11/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma.

Di seguito sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test:

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	152	151	151	151
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22800	22650	22650	22650
ρ [g/cm ³]	2.30	2.30	2.29	2.31
F [kN]	831.97	805.66	782.33	838.95
R_{ck} [MPa]	36.49	35.57	34.54	37.04

Tabella 8-8: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G7-STR20B (1.00)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (R_{ck} medio) è pari a $R_{ck,m} = 35.91 \text{ MPa}$, con una deviazione standard $\sigma = 1.10$ ed un coefficiente di variazione $CoV = 3.05\%$.

Si riportano inoltre i diagrammi che correlano la forza applicata alla durata della prova:

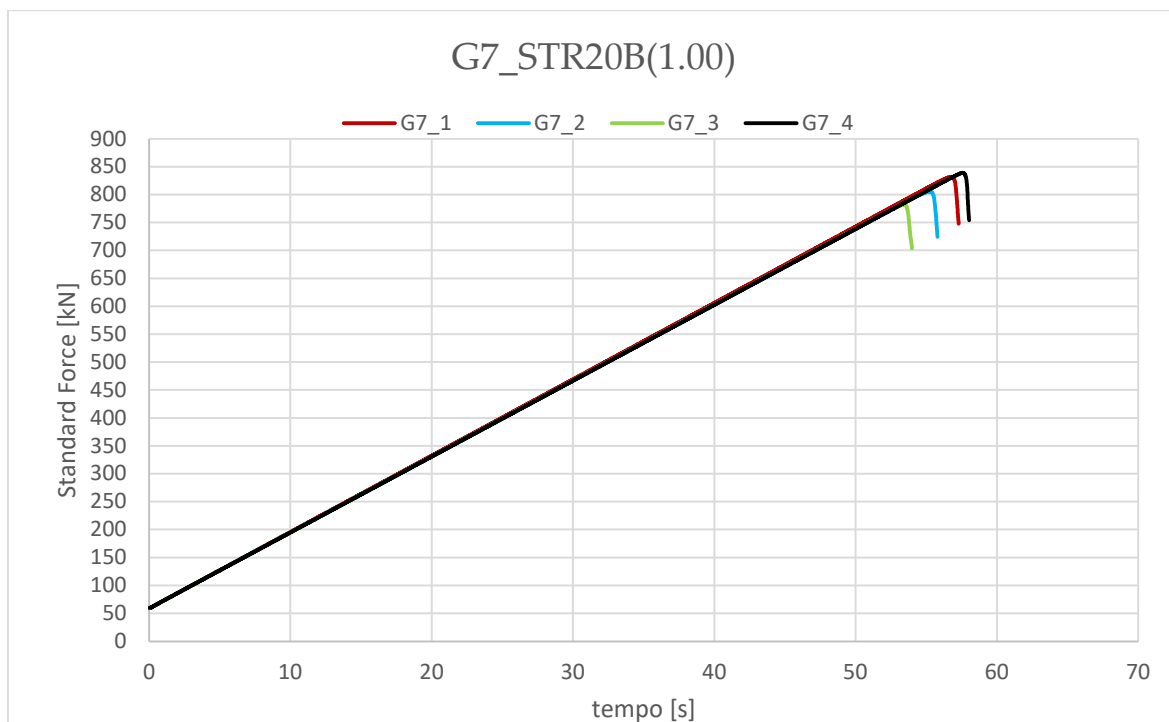


Figura 8-13: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G7-STR20B (1.00)

I campioni di questa serie, rinforzati con il dosaggio massimo di fibre, presentano valori di resistenza a compressione sostanzialmente analoghi a quelli ottenuti con la concentrazione dello 0.50%, ma comunque leggermente inferiori a quelli dei campioni di riferimento. Rispetto all'impiego delle fibre da 30 mm, la lunghezza ridotta a 20 mm risulta più efficace, comportando una minore perdita di resistenza all'aumentare del dosaggio. Tale comportamento è probabilmente riconducibile alla migliore distribuzione che caratterizza le fibre più corte all'interno della matrice. Nelle seguenti immagini è possibile osservare l'elevata densità di fibre all'interno del provino cubico integro in fase di prova (fig. 8-14), oltre alla distribuzione interna ad esso in seguito alla rottura (fig. 8-15).



Figura 8-14: fibre visibili sulla faccia del provino cubico sottoposto a test di compressione



Figura 8-15: vista interna di un campione cubico della serie G7-STR20B (1.00) post rottura per compressione

8.1.8 Campioni serie “G8 – STR30M (0.25)”

Le ultime tre serie di campioni sono state realizzate con l’obiettivo di verificare se l’impiego di fibre ricavate da diverse tipologie di corde influenzi le prestazioni del materiale, attraverso un confronto diretto con le fibre standard, ricavate dalle corde STR 1 - Black e utilizzate in precedenza. Dunque, nei provini di questa serie e delle serie G9 e G10 sono riscontrabili fibre di colore differente, ricavate da corde che variano per calibro e geometria della sezione, fattori che determinano una diversa capacità di aderenza alla matrice cementizia. Tali fibre sono state testate esclusivamente con una lunghezza di 30 mm, consentendo un confronto accurato con i risultati ottenuti dai campioni rinforzati tramite fibre standard con il medesimo dosaggio e lunghezza. I provini della serie G8 – STR30M (0.25) sono stati dunque confezionati integrando un dosaggio pari allo 0.25% in peso di fibre miste da 30 mm, come indicato dalla nomenclatura. I quattro provini cubici sottoposti al test sono stati confezionati in data 12/11/2025 e testati il 10/12/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma.

Nella tabella 8-9 sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test.

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	150	150	150	150
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22500	22500	22500	22500
ρ [g/cm ³]	2.31	2.34	2.34	2.31
F [kN]	880.4	837.0	879.5	873.0
R_{ck} [MPa]	39.13	37.20	39.09	38.80

Tabella 8-9: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G8-STR30M (0.25)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (R_{ck} medio) è pari a $R_{ck,m} = 38.56 \text{ MPa}$, con una deviazione standard $\sigma = 0.94$ ed un coefficiente di variazione $CoV = 2.73 \%$. Si riportano inoltre i diagrammi che correlano la forza applicata alla durata della prova:

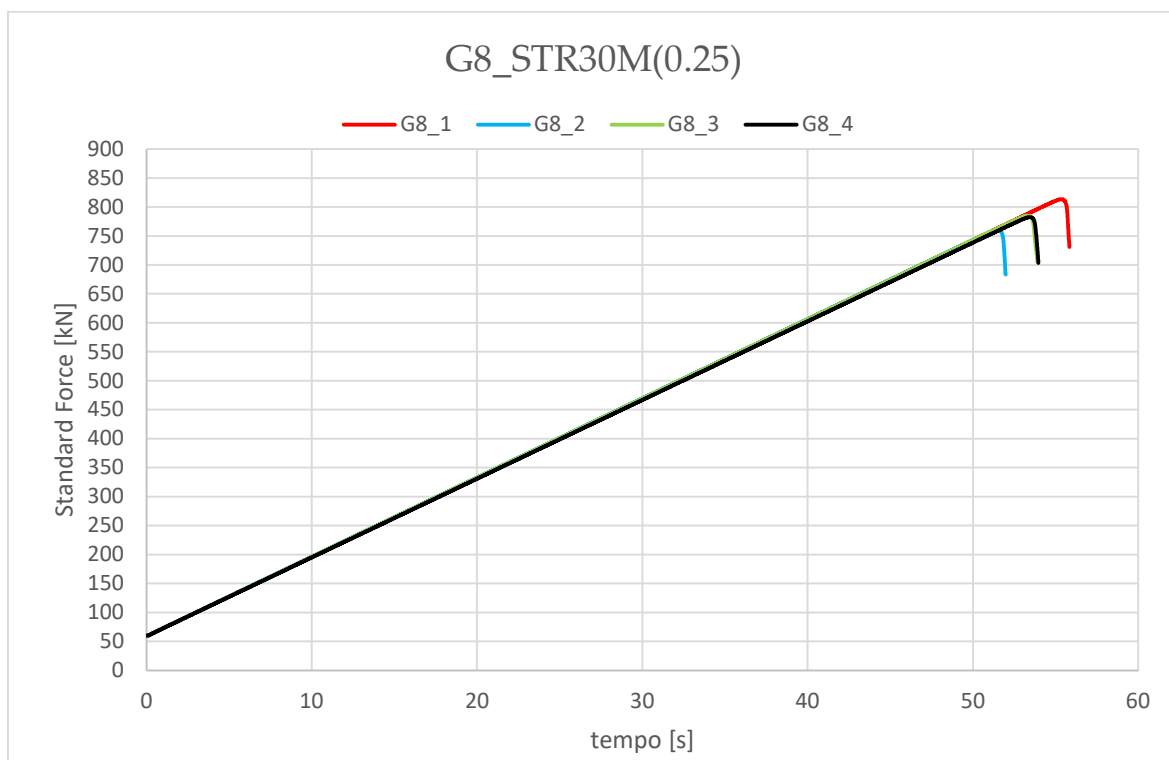


Figura 8-16: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G8-STR30M (0.25)

Dai risultati si evince che, a parità di dosaggio e lunghezza, la tipologia di fibra influisce in modo trascurabile sulle prestazioni meccaniche. Si osserva infatti una resistenza a compressione media molto elevata, la maggiore tra tutte le serie testate, la quale presenta un incremento rispetto ai campioni di riferimento ed un lieve miglioramento rispetto alla serie con fibre standard di pari dosaggio e lunghezza.

Tali esiti confermano l'efficacia del rinforzo fibroso, evidenziando come il dosaggio dello 0.25% in peso risulti il più performante, indipendentemente dalla specifica tipologia di fibra impiegata.

Nelle immagini seguenti è possibile osservare le fibre ricavate dalle corde di diversa tipologia, distinguibili per la differente colorazione, distribuite all'interno della matrice cementizia dei provini di tale serie sottoposti a compressione.



Figure 8-17: fibre miste di diverso colore osservabili internamente ad un campione cubico della serie G8-STR30M (0.25) post rottura per compressione

8.1.9 Campioni serie “G9 – STR30M (0.50)”

I provini della serie G9 – STR30M (0.50) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre miste da 30 mm adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I campioni sottoposti alle prove di compressione corrispondono a quattro provini cubici confezionati in data 19/11/2025 e testati il 17/12/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test:

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	152	152	152	151
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22800	22800	22800	22650
ρ [g/cm ³]	2.33	2.33	2.33	2.32
F [kN]	813.73	761.06	785.00	782.78
R_{ck} [MPa]	35.69	33.38	34.43	34.56

Tabella 8-10: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G9-STR30M (0.50)

Considerando i valori di resistenza cubica caratteristica del materiale, è stato ricavato un valore medio rappresentativo della resistenza (R_{ck} medio) pari a $R_{ck,m} = 34.52 \text{ MPa}$. Inoltre, per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 0.92$ e $CoV = 2.37 \%$.

In aggiunta a questi dati, il macchinario di prova fornisce un diagramma che correla la forza applicata alla durata della prova:

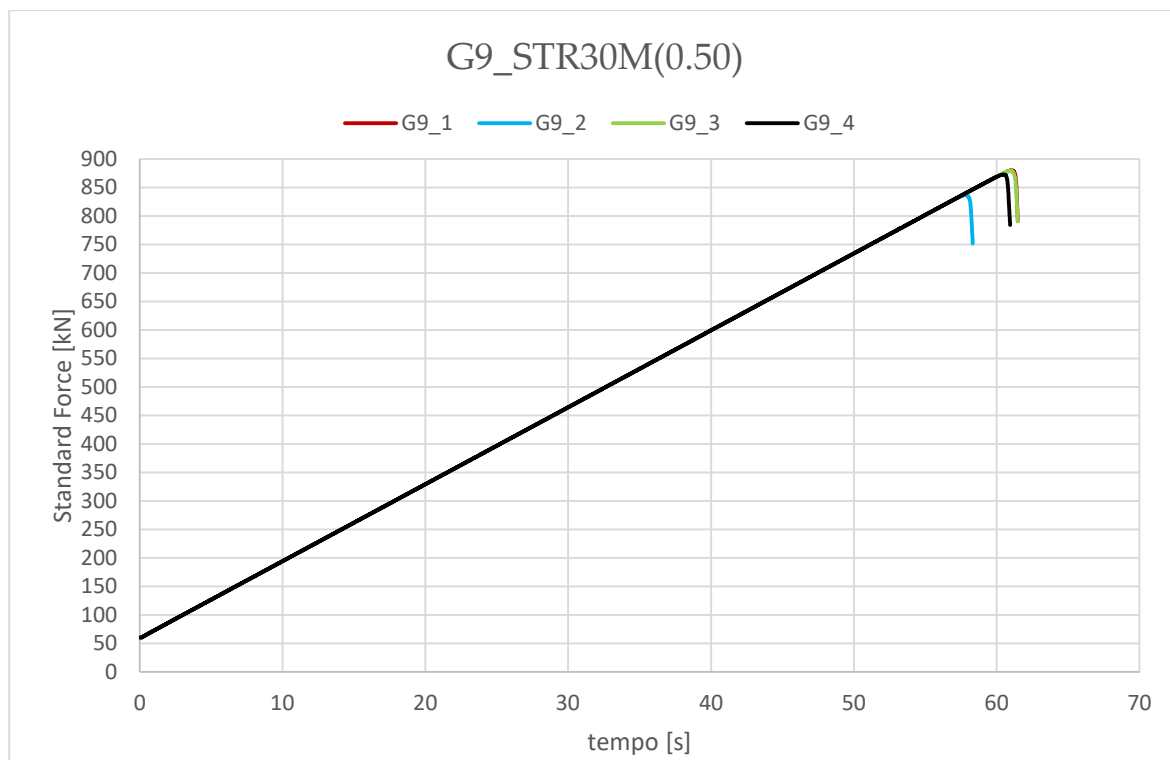


Figura 8-18: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G9-STR30M (0.50)

In modo analogo a quanto riscontrato per le serie con pari dosaggio e lunghezza delle fibre, si osserva una riduzione della resistenza cubica rispetto alla miscela di riferimento. Tale calo può essere imputato ad un quantitativo eccessivo di fibre e dunque si può definire un dosaggio limite oltre il quale l'aggiunta di fibre non solo non apporta miglioramenti prestazionali, ma determina un decadimento della resistenza. Tale tendenza è confermata anche dai risultati dei campioni con concentrazione superiore, riportati nel paragrafo successivo.

La figura 8-19 mostra la sezione interna di un provino di tale serie dopo la prova, consentendo di apprezzare l'effettiva distribuzione delle fibre all'interno del conglomerato cementizio.



Figura 8-19: vista interna di un campione cubico della serie G9-STR30M (0.50) post rottura per compressione

8.1.10 Campioni serie “G10 – STR30M (1.00)”

I provini della serie G10 - STR30M (1.00) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia il dosaggio più elevato di fibre da 30 mm ottenute dal taglio di corde miste. Si è dunque adottata una concentrazione pari a 1.00% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro provini cubici appartenenti all’ultima serie di campioni testati sono stati confezionati in data 24/11/2025 e testati il 22/12/2025. Di seguito sono riportate le informazioni relative ad ogni provino, inclusi i valori di resistenza riscontrati dai test:

Campioni di prova	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	CUBO 4
d_1 [mm]	150	150	150	150
d_2 [mm]	150	150	150	149
h [mm]	150	150	150	150
S_0 [mm ²]	22500	22500	22500	22350
ρ [g/cm ³]	2.32	2.34	2.32	2.30
F [kN]	696.40	714.61	702.20	762.13
R_{ck} [MPa]	30.95	31.76	31.21	34.10

Tabella 8-11: informazioni e risultati relativi ai test di compressione sui campioni G10-STR30M (1.00)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (R_{ck} medio) è pari a $R_{ck,m} = 32.01$ MPa, con una deviazione standard $\sigma = 1.44$ ed un coefficiente di variazione $CoV = 4.49$ %.

Si riportano inoltre i diagrammi che correlano la forza applicata alla durata della prova:

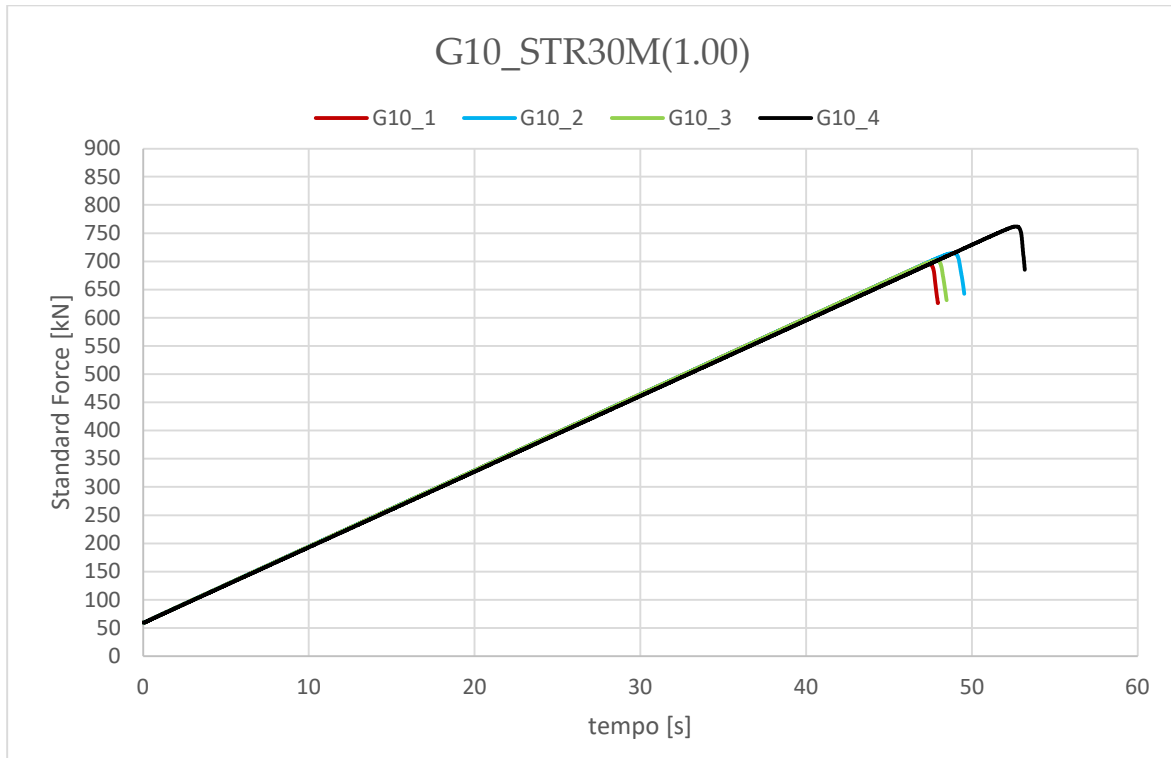


Figura 8-20: diagrammi carico-tempo ottenuti dalle prove a compressione sui campioni G10-STR30M (1.00)

I test di compressione condotti sull'ultima serie di campioni confermano come la risposta meccanica sia influenzata dal dosaggio delle fibre in misura decisamente maggiore rispetto alla loro lunghezza o tipologia. In linea con quanto riscontrato nelle precedenti serie con dosaggio all'1.0% in peso, si registrano qui i valori minimi di resistenza media a compressione. Tale decremento prestazionale risulta più marcato per le fibre lunghe 30 mm, mentre per i campioni con fibre più corte, da 20 mm, la perdita di resistenza è meno accentuata. Si osserva, inoltre, un incremento della deviazione standard per tali serie a dosaggio elevato, indice di una significativa variabilità dei risultati. Tale dispersione è riconducibile alle diverse configurazioni di orientamento e distribuzione che le fibre assumono all'interno della matrice quando inserite in dosaggi elevati.

Nelle seguenti immagini è possibile osservare l'elevata densità di fibre all'interno dei provini di tale serie:



Figura 8-21: vista interna di un campione cubico della serie G10-STR30M (1.00) post rottura per compressione



Figura 8-22: cubo aperto per osservare la distribuzione delle fibre miste nella sezione centrale

8.2 CONFRONTO GLOBALE DEI RISULTATI A COMPRESSIONE

Secondo le prescrizioni delle linee guida per la progettazione del calcestruzzo fibrorinforzato, la resistenza a compressione del materiale privo di rinforzo è assimilabile a quella della stessa miscela arricchita con le fibre. Solamente per particolari concentrazioni, le quali migliorano la resistenza a flessione di una certa entità, si genera nel campione un effetto di confinamento che comporta anche un incremento della resistenza a compressione. L'analisi complessiva dei risultati delle prove di compressione e il confronto tra le diverse miscele testate hanno evidenziato un andamento dei valori di resistenza che richiede un approfondimento specifico. Come riportato precedentemente, tali variazioni di resistenza sono imputabili prevalentemente alla diversa quantità di fibre inserite nella matrice, testata su tre livelli di dosaggio. Per visualizzare meglio questo fenomeno, si riportano di seguito le curve di resistenza a compressione media in relazione al dosaggio per ogni miscela analizzata.

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 30 mm ricavate da corde standardizzate (STR 1 - Black)

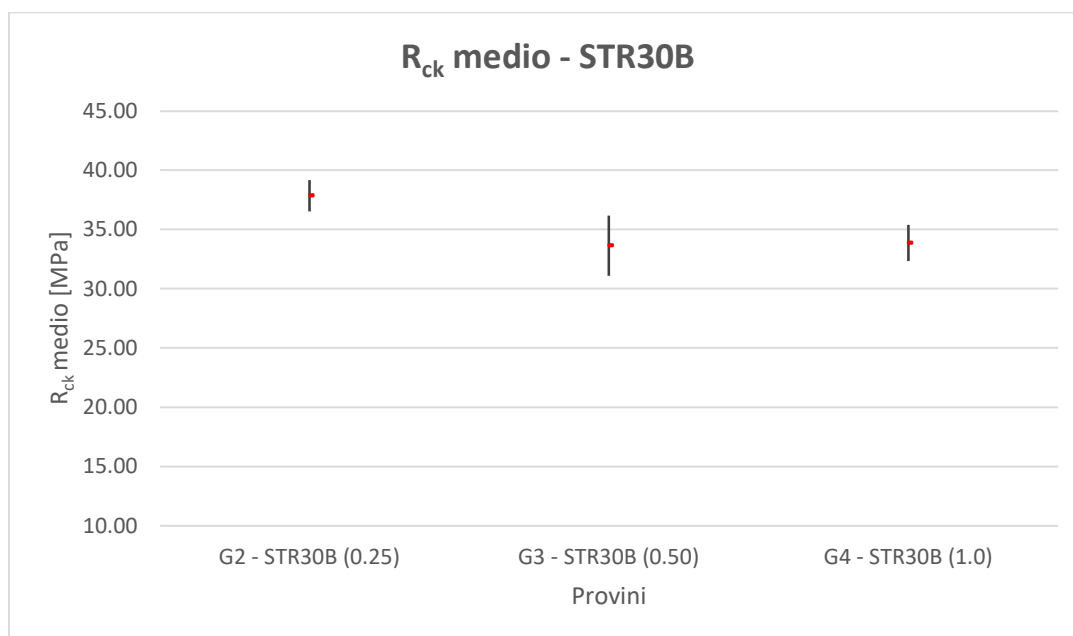


Figura 8-23: resistenza media a compressione dei differenti dosaggi a parità di tipologia di fibre (STR30B)

Dal grafico emerge chiaramente la migliore risposta meccanica offerta dai campioni con il dosaggio di 0.25% in peso di fibre. Tuttavia, aumentando ulteriormente la concentrazione, si osserva una riduzione della resistenza rispetto alla miscela di

riferimento priva di fibre. Il grafico sottostante descrive questo andamento, mettendo in relazione le variazioni di resistenza con il dosaggio di fibre nella miscela cementizia:

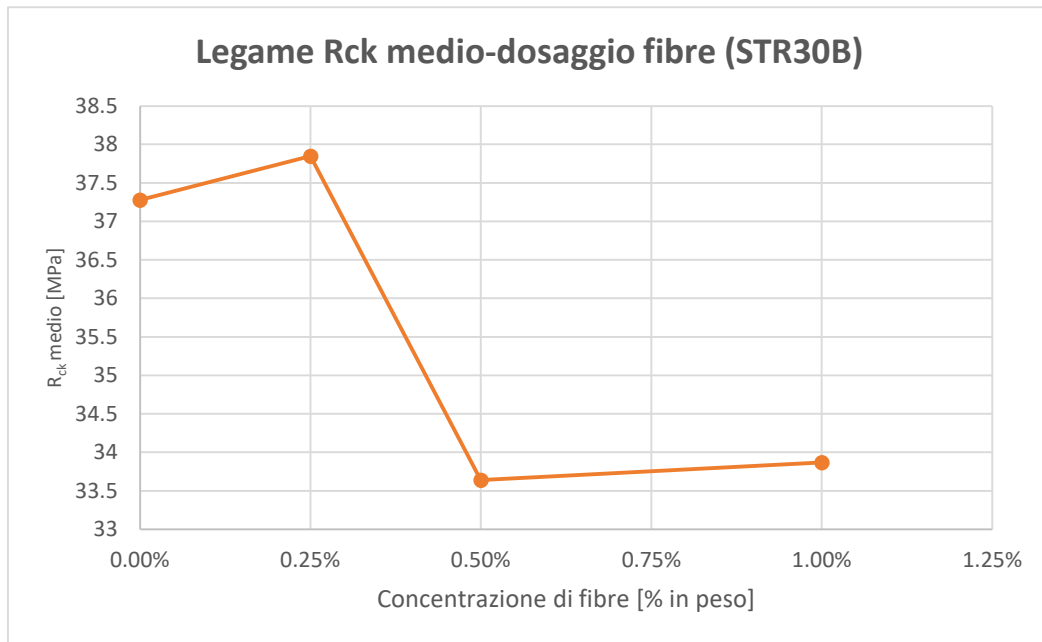


Figura 8-24: andamento della resistenza media a compressione in funzione del dosaggio (STR30B)

Si osserva una riduzione delle prestazioni meccaniche in presenza di dosaggi eccessivi; infatti, un'elevata concentrazione può compromettere l'omogeneità della matrice, anticipando il collasso a carichi inferiori. Tuttavia, le fibre conferiscono al materiale un comportamento più duttile, contrastando la propagazione delle fessure e preservando l'integrità del provino anche dopo il picco di carico.

Per quanto riguarda l'andamento dei risultati, si riscontra una stabilizzazione della resistenza per dosaggi superiori allo 0.50%. Dunque, nonostante il raddoppio del contenuto di fibre fino all'1.00%, la resistenza a compressione si mantiene pressoché costante oltre un certo valore soglia.

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 20 mm ricavate da corde standardizzate (STR 1 - Black)

Lo stesso andamento dei risultati è stato osservato con i campioni rinforzati da fibre lunghe 20 mm, seppur con riduzioni meno accentuate delle resistenze all'aumentare del dosaggio di fibre.

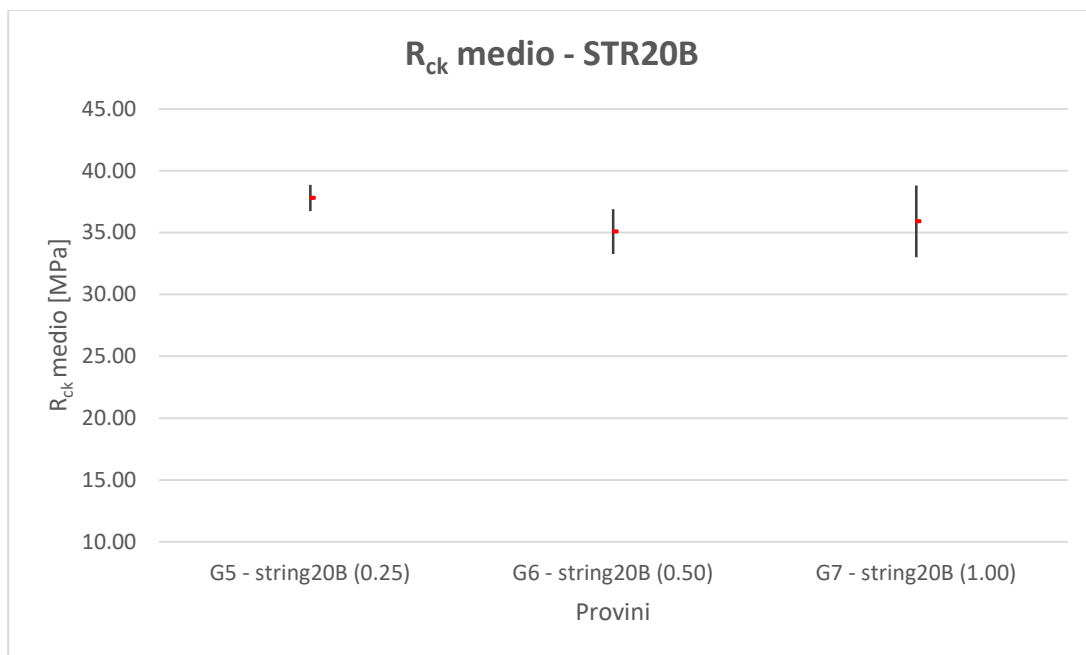


Figura 8-25: resistenza media a compressione dei differenti dosaggi a parità di tipologia di fibre (STR20B)

Nel caso del rinforzo con fibre da 20 mm, si è osservata una risposta globale preferibile rispetto all'uso di fibre più lunghe. La ragione può essere imputabile alla migliore lavorabilità della miscela anche ad alti dosaggi, infatti le fibre corte limitano la segregazione del materiale plastico nel conglomerato, evitando così l'indebolimento del campione. Inoltre, un rinforzo fibroso più corto favorisce la formazione di uno scheletro interno che massimizza l'effetto di confinamento. Si è riscontrato, anche in tal caso, un comportamento meccanico ottimale per dosaggi non superiori allo 0.25%.

Dunque, la relazione tra resistenza e dosaggio ricalca l'andamento osservato per i campioni rinforzati con fibre da 30 mm, ricavate dalla medesima tipologia di corde.

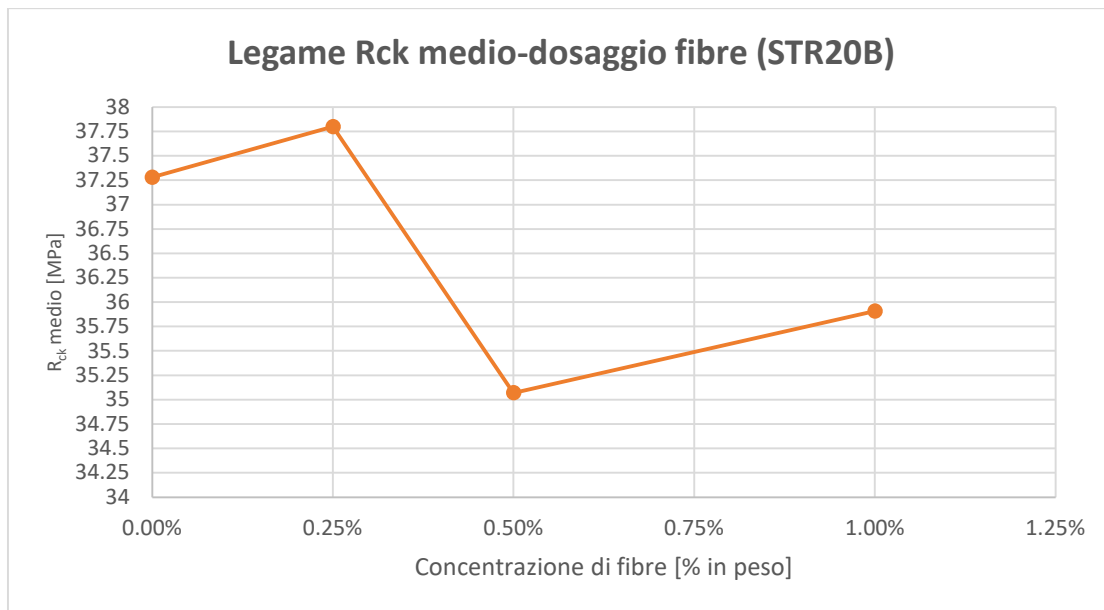


Figura 8-26: andamento della resistenza media a compressione in funzione del dosaggio (STR20B)

L'andamento osservato per questa tipologia di campioni differisce dagli altri per la minore perdita di resistenza registrata nelle miscele ad alto dosaggio rispetto a quella di riferimento priva di fibre. È pertanto possibile affermare che l'impiego di fibre più corte (lunghe 20 mm) favorisce una maggiore omogeneità della miscela, garantendo prestazioni meccaniche adeguate anche nel caso di elevati dosaggi di fibre di rinforzo.

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 30 mm ricavate da corde miste

Una tendenza analoga è emersa anche per il rinforzo con fibre miste da 30 mm, pur evidenziando una divergenza in corrispondenza dei dosaggi più elevati. Per questa tipologia, infatti, si è registrato un decremento progressivo delle proprietà meccaniche all'aumentare del contenuto di fibre. Tale comportamento differisce da quello delle altre tipologie di rinforzo esaminate, caratterizzate invece da una stabilizzazione dei valori di resistenza ai dosaggi alti, con anche lievi incrementi prestazionali rispetto alla miscela di riferimento allo 0.50%.

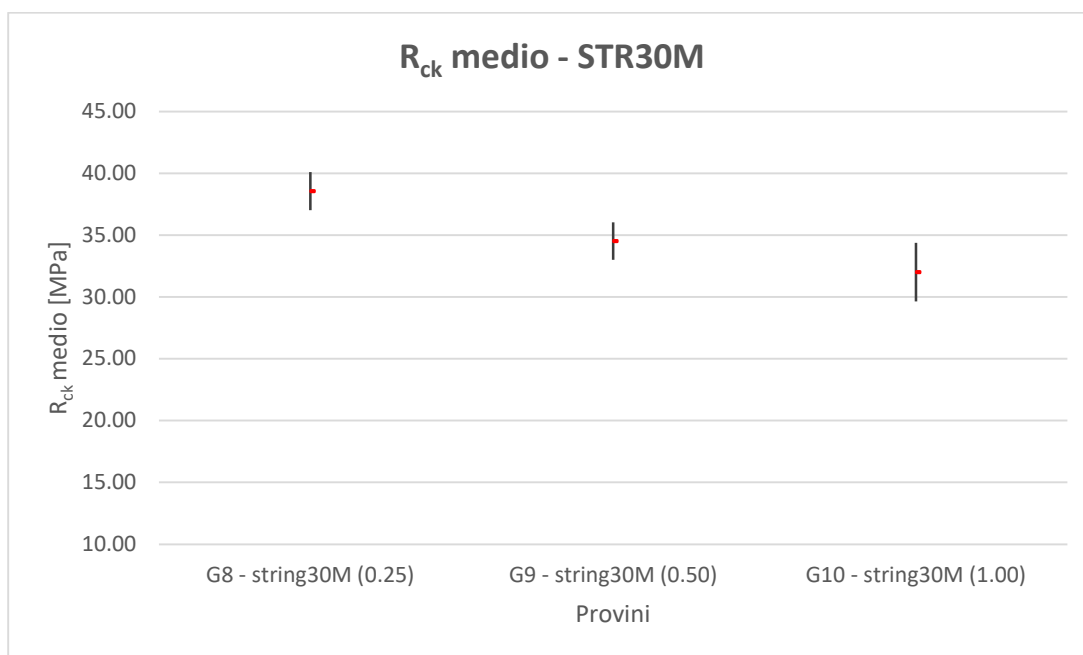


Figura 8-27: resistenza media a compressione dei differenti dosaggi a parità di tipologia di fibre (STR30M)

La curva che esprime il legame tra resistenza media a compressione e dosaggio di fibre mostra dunque un andamento leggermente crescente nel primo tratto, per poi subire un decremento costante. È perciò evidente il contributo favorevole di fibre per piccoli dosaggi, seguito da un importante calo prestazione riscontrabile per elevate concentrazioni di rinforzo.

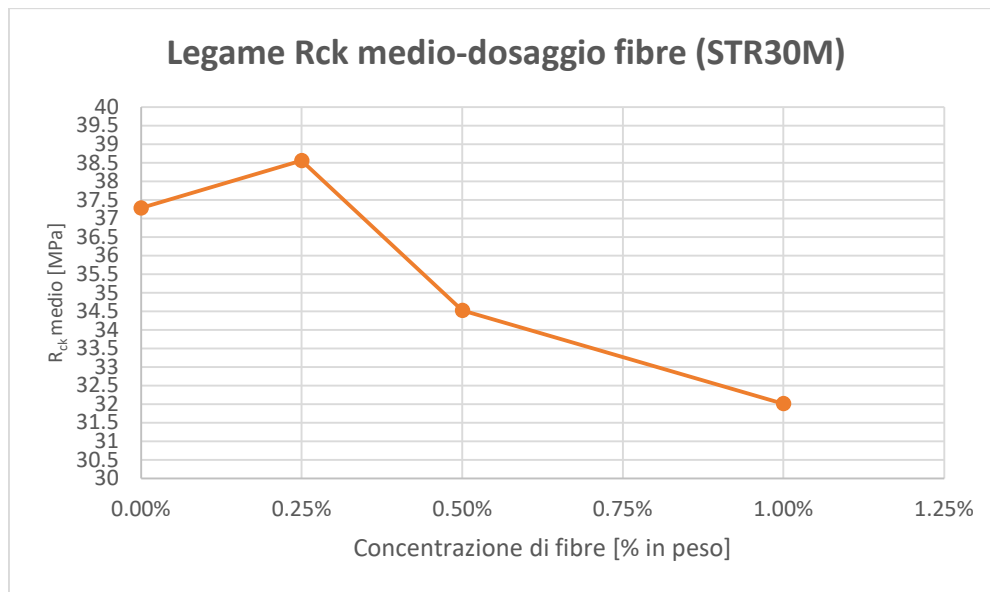


Figura 8-28: andamento della resistenza media a compressione in funzione del dosaggio (STR30M)

8.2.1 L'influenza della tipologia di fibre sul comportamento a compressione

Dallo studio dei risultati precedente riportati, si evince che le prestazioni del materiale fibrorinforzato sottoposto a sforzo di compressione subiscono dei miglioramenti solamente per un dosaggio pari allo 0.25% in peso. Tale concentrazione è stata quindi adottata come parametro di riferimento per valutare l'influenza della tipologia di fibra sulla risposta a compressione del conglomerato. Di seguito viene proposto un confronto grafico, a parità di dosaggio, tra la resistenza media della miscela di riferimento e quella delle tre varianti rinforzate:

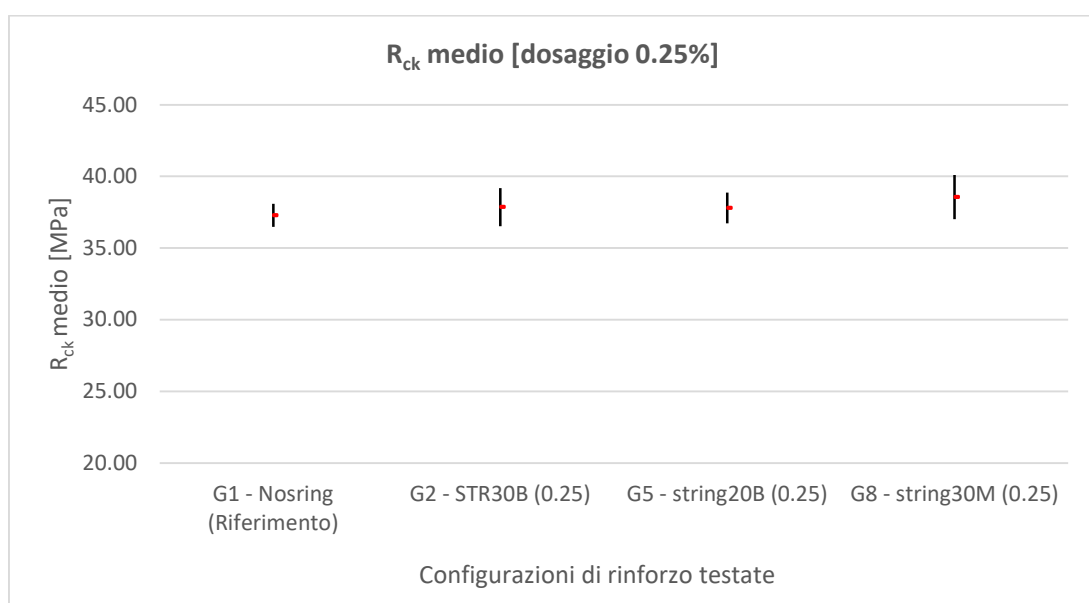


Figura 8-29: confronto tra le resistenze compressione a parità di dosaggio di fibre (0.25%)

L'analisi dei dati evidenzia scostamenti trascurabili tra i valori sperimentali delle diverse miscele a parità di concentrazione. I valori di resistenza a compressione misurati oscillano, infatti, in un intervallo di circa 1.5 Mpa rispetto alla risposta fornita dai campioni di riferimento. Dunque, non si può parlare di un vero e proprio incremento prestazione dovuto alla presenza di fibre, ma si riscontra una generale stabilità dei risultati, con valori che si attestano leggermente al di sopra della media della matrice non rinforzata. Tali esiti risultano coerenti con le previsioni di letteratura e con le indicazioni delle linee guida, le quali non indicano significativi miglioramenti a compressione in seguito all'aggiunta di fibre. Dunque, i risultati ottenuti sono in linea con le aspettative ed hanno anche consentito la definizione di una soglia limite di dosaggio, oltre la quale le proprietà meccaniche subiscono un decadimento.

In definitiva, in corrispondenza del dosaggio ottimale, né la tipologia e né la lunghezza delle fibre impiegate influenzano in modo determinante la risposta a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato. Dunque, definendo una concentrazione ideale che porta leggeri miglioramenti alla miscela, è possibile impiegare efficacemente fibre da riciclo con proprietà variabili e lunghezza compresa tra 20 e 30 mm. L'influenza delle caratteristiche geometriche delle fibre diviene invece rilevante per dosaggi elevati, condizione in cui l'utilizzo di fibre da 2 centimetri garantisce una resistenza a compressione superiore rispetto a quella che si ottiene impiegando fibre più lunghe.

8.3 ANALISI DEL COMPORTAMENTO A TRAZIONE

La valutazione del comportamento a trazione dei conglomerati cementizi realizzati consente di osservare il comportamento delle fibre introdotte, oltre alla loro interazione e aderenza con la matrice cementizia. La campagna sperimentale, condotta presso il laboratorio MastrLAB del Politecnico di Torino, ha previsto l'esecuzione di prove di trazione indiretta su campioni cilindrici relativi a ciascuna miscela. I provini, aventi dimensioni nominali di 100 mm di diametro e 200 mm di altezza, sono stati testati mediante l'impiego di un macchinario agente a compressione, la cui acquisizione di dati si limita al solo carico massimo di rottura del campione. A partire da tale valore, la resistenza a trazione del materiale è stata determinata analiticamente applicando la formulazione prevista dalla normativa (Formula 1.1) di riferimento, la quale tiene conto del carico ultimo e delle caratteristiche geometriche del campione.

La modalità di esecuzione della prova comporta il suo termine al raggiungimento del carico di picco che determina la rottura fragile della matrice cementizia. Tale limitazione non consente l'acquisizione strumentale della fase post-fessurativa, durante la quale si mobilita la resistenza residua offerta dalle fibre. Il contributo del rinforzo, infatti, si attiva pienamente solo in seguito alla fessurazione del calcestruzzo, ma siccome il test si arresta contestualmente all'insorgere di tale fenomeno, il comportamento duttile del materiale non viene registrato dalla macchina. Di conseguenza, non è stato possibile quantificare strumentalmente il contributo delle fibre, che si attiva nella fase successiva al raggiungimento del carico di rottura. Tuttavia, l'analisi visiva dei campioni post-test ha permesso di apprezzare una sostanziale differenza nel meccanismo di rottura tra i provini privi di rinforzo, i quali hanno manifestato una rottura fragile con netta separazione in due o più frammenti, ed i campioni fibrorinforzati, che hanno invece mantenuto la propria integrità fisica. Ciò è dovuto alla capacità delle fibre di cucire le fessure e impedire il collasso immediato del provino. In questi casi, infatti, il test si è concluso con la formazione di una fessura diametrale che, grazie all'azione delle fibre, è rimasta di ampiezza contenuta impedendo la separazione delle due metà del cilindro. Successivamente al test, si è proceduto all'apertura forzata di alcuni campioni mediante dispositivi meccanici, al fine di valutare la distribuzione delle fibre e la qualità dell'aderenza con la matrice cementizia.

8.3.1 Campioni serie "G1-Nostrings"

Come riportato per i test a compressione, i provini iniziali della campagna sperimentale hanno la funzione di definire i valori di riferimento, essi sono stati realizzati impiegando esclusivamente la matrice cementizia standard priva di rinforzo fibroso, così da consentire un confronto con le prestazioni dei successivi campioni fibrorinforzati. I campioni della serie denominata "NoStrings", sottoposti alle prove di trazione indiretta, corrispondono a tre provini cilindrici confezionati in data 12/09/2025 e testati il 10/10/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma.



Figura 8-30: Tre provini cilindrici facenti parte della serie con miscela priva di fibre (G1-Nostrings)

Di seguito (tab. 8-13) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3
L [mm]	200	200	200
d [mm]	100	100	100
F [kN]	104.2	77.4	74.6
f_{ct} [MPa]	3.31	2.46	2.37

Tabella 8-12: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G1-Nostrings

Conoscendo i valori di resistenza a trazione indiretta del materiale, ricavati per ogni campione testato, è stato possibile determinare un valore medio rappresentativo della sua reale resistenza (f_{ct} medio) pari a $f_{ct,medio} = 2.72 \text{ MPa}$. Inoltre, per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 0.42$ e $CoV = 15.62 \%$.

I campioni appartenenti a tale serie hanno mostrato un comportamento meccanico stabile. I valori ottenuti risultano in linea con le aspettative iniziali e coerenti con la classe di resistenza del calcestruzzo predosato impiegato, validando dunque la correttezza del dosaggio dei componenti della miscela e attestando l'efficacia delle procedure di miscelazione e delle condizioni di maturazione adottate per i campioni. Come da attese, si è osservata la rottura fragile dei campioni al termine della prova, la quale ha comportato l'apertura del cilindro in due frammenti distinti lungo la fessura diametrale, come illustrato in figura 8-30.



Figura 8-31: cilindro senza fibre diviso in due frammenti in seguito a rottura per prova di trazione indiretta

8.3.2 Campioni serie “G2 - STR30B (0.25)”

I provini della serie G2 - STR30B (0.25) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 30 mm ottenute dal taglio di corde per racchette da tennis di riciclo. Nello specifico, sono state impiegate corde STR 1 - Black (colore nero), in grado di garantire proprietà meccaniche note rispetto alle altre corde recuperate e inserite nella miscela in esame adottando una concentrazione pari allo 0.25% in peso, come indicato dalla nomenclatura. Per la serie in esame sono stati confezionati 4 provini cilindrici in data 26/09/2025 e successivamente testati il 24/10/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito (tab. 8-14) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	122.4	93.8	117.2	107.8
f_{ct} [MPa]	3.89	2.98	3.73	3.43

Tabella 8-13: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G2-STR30B (0.25)

Conoscendo i valori di resistenza a trazione indiretta del conglomerato, ricavati per ogni campione testato, è stato possibile determinare un valore medio rappresentativo della sua reale resistenza (f_{ct} medio) pari a $f_{ct,medio} = 3.51$ MPa. Inoltre, per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 0.35$ e $CoV = 9.85$ %.

Dal confronto coi valori ottenuti dalla serie di riferimento emerge un incremento della resistenza media a trazione. Tale miglioramento è imputabile al contributo delle fibre, in grado di contribuire parzialmente già in fase pre-picco ostacolando la propagazione delle micro-fessure interne. Considerando i valori individuali, si sono riscontrati picchi di carico notevolmente più elevati rispetto ai provini privi di fibre, con differenze nella forza di picco che arrivano fino a 40 kN.

Come anticipato, la presenza delle fibre nella matrice ha contrastato l'apertura della fessura diametrale, impedendo la separazione netta del provino in due frammenti. Come mostrato in Figura 8-31, il provino è risultato fessurato ma ancora coeso al

termine della prova. Successivamente, si è proceduto all'apertura forzata del cilindro per analizzare la distribuzione e l'orientamento delle fibre all'interno della sezione di rottura (Figura 8-32).



Figura 8-32: campione cilindrico fessurato ma tenuto chiuso dall'effetto di collegamento dovuto alle fibre



Figura 8-33: distribuzione delle fibre nella sezione di rottura

8.3.3 Campioni serie "G3 - STR30B (0.50)"

I provini della serie G3 - STR30B (0.50) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 30 mm ottenute dal taglio di corde STR 1 - Black, inserite adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. Per la serie in esame sono stati confezionati 4 provini cilindrici in data 02/10/2025 e sottoposti a prova di trazione indiretta il 31/10/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito (tab. 8-15) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	93.6	107.6	104.7	117.6
f_{ct} [MPa]	2.98	3.42	3.33	3.74

Tabella 8-14: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G3-STR30B (0.50)

Conoscendo i valori di resistenza a trazione indiretta del conglomerato, ricavati per ogni campione testato, è stato possibile determinare un valore medio rappresentativo della sua reale resistenza (f_{ct} medio) pari a $f_{ct,medio} = 3.37$ MPa. Inoltre, per valutare il grado di dispersione dei risultati ottenuti, sono stati calcolati deviazione standard (σ) e coefficiente di variazione (CoV), pari rispettivamente a: $\sigma = 0.31$ e $CoV = 9.32$ %.

I risultati ottenuti da tale serie di campioni mostrano, anche in questo caso, andamento superiore rispetto ai valori di resistenza dei campioni privi di rinforzo fibroso. Inoltre, il comportamento osservato non si discosta significativamente da quello della miscela contenente lo 0.25% di fibre, con cui condivide analoghi livelli di forza massima e resistenza a trazione. Anche in questa configurazione si riscontra l'efficacia delle fibre da riciclo nel contrastare l'apertura delle fessure, comportamento ben visibile in Figura 8-33, la quale mostra un campione sottoposto ad apertura forzata. Nonostante la rottura della matrice, i frammenti risultano trattenuti dall'azione esercitata dalle fibre sintetiche presenti nella miscela.



Figura 8-34: campione cilindrico aperto forzatamente. Particolare dei frammenti trattenuti insieme dall'azione delle fibre

8.3.4 Campioni serie "G4 - STR30B (1.00)"

I provini della serie G4 - STR30B (1.00) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia il dosaggio più elevato di fibre da 30 mm ottenute dal taglio di corde STR 1 - Black. Si è dunque adottata una concentrazione pari a 1.00% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro provini cilindrici sottoposti al test sono stati confezionati in data 07/10/2025 e testati il 04/11/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito (tab. 8-16) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	64.2	82.4	99.4	94.0
f_{ct} [MPa]	2.04	2.62	3.16	2.99

Tabella 8-15: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G4-STR30B (1.00)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (f_{ct} medio) è pari a $f_{ct,medio} = 2.71 \text{ MPa}$, con una deviazione standard $\sigma = 1.50$ e un coefficiente di variazione $CoV = 18.32 \%$.

Per tale serie di valori si è riscontrato un evidente calo prestazionale per quanto riguarda il carico di picco e di conseguenza la resistenza a trazione calcolata analiticamente. Si è infatti ottenuto un valore medio di f_{ct} minore rispetto alle due serie precedenti di calcestruzzo fibrorinforzato, ma sostanzialmente identico al valore riscontrato per i campioni privi di rinforzo fibroso. Ciò può essere dovuto all'eccessivo dosaggio di fibre, il quale, come nel caso del comportamento a compressione, può avere un effetto negativo sulle prestazioni del materiale. Dunque, seppure evidente anche in tal caso la capacità delle fibre di impedire l'apertura delle fessure e la frammentazione del campione, il loro eccessivo dosaggio riduce drasticamente il carico di picco supportabile dal materiale. Come mostrato in Figura 8-34, il provino con elevato quantitativo di rinforzo presenta piccole fessure ed è molto coeso al termine della prova. Successivamente, si è proceduto all'apertura forzata del cilindro, consentendo di osservare il grande quantitativo di fibre ed analizzare la loro distribuzione (Figura 8-35).



Figura 8-35: campioni cilindrici fessurati ma tenuti chiusi dall'effetto di collegamento dovuto alle fibre



Figura 8-36: vista delle fibre, in situazione di massimo dosaggio, distribuite lungo la sezione di rottura

8.3.5 Campioni serie “G5 – STR20B (0.25)”

I provini della serie G5 – STR20B (0.25) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 20 mm ottenute dal taglio di corde tipologia STR 1 - Black. Tali fibre più corte sono state aggiunte, per la miscela in esame, con una concentrazione pari allo 0.25% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro campioni cilindrici sottoposti alle prove di trazione indiretta sono stati confezionati in data 20/10/2025 e testati il 17/11/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito (tab. 8-17) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	86.4	96.2	119.8	94.4
f_{ct} [MPa]	2.75	3.06	3.81	3.05

Tabella 8-16: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G5-STR20B (0.25)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (f_{ct} medio) è pari a $f_{ct,medio} = 3.16 \text{ MPa}$, con una deviazione standard $\sigma = 0.46$ e un coefficiente di variazione $CoV = 14.50 \%$.

Il valore medio di resistenza a trazione della miscela rinforzata con fibre lunghe 20 millimetri mostra un incremento rispetto al valore riscontrato per la miscela di riferimento priva di rinforzo. Tale miglioramento è imputabile all'azione esercitata dalle fibre, la cui efficacia risulta particolarmente apprezzabile in presenza di dosaggi contenuti. Sebbene di lunghezza inferiore, anche tali fibre sono in grado di contrastare l'apertura delle fessure, evitando così la frammentazione del campione (Figura 8-36).



Figura 8-37: campioni della serie G5-STR20B (0.25) fessurati ma tenuti chiusi dall'azione delle fibre



Figura 8-38: vista della sezione di rottura del campione rinforzato con fibre lunghe 20 millimetri

8.3.6 Campioni serie “G6 – STR20B (0.50)”

I provini della serie G6 – STR20B (0.50) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 20 mm e adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro campioni cilindrici sottoposti alle prove di trazione indiretta sono stati confezionati in data 24/10/2025 e testati il 21/11/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito (tab. 8-18) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	77.0	100.4	100.2	81.4
f_{ct} [MPa]	2.45	3.19	3.18	2.60

Tabella 8-17: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G6-STR20B (0.50)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (f_{ct} medio) è pari a $f_{ct,medio} = 2.86 \text{ MPa}$, con una deviazione standard $\sigma = 0.39$ e un coefficiente di variazione $CoV = 13.72 \%$.

Dall'analisi comparativa dei diversi risultati emerge che, a parità di dosaggio, i campioni di tale serie rinforzati con fibre da 20 mm hanno manifestato una resistenza media a trazione inferiore rispetto ai campioni rinforzati con fibre da 30 millimetri. Ciò suggerisce che, per fibre di lunghezza ridotta, la soglia di dosaggio oltre la quale il contributo di rinforzo decade risulta più bassa. Di conseguenza, già con una concentrazione dello 0.50% l'effetto benefico delle fibre sembra annullarsi, comportando una risposta della miscela in linea con i valori riscontrati per la matrice di riferimento priva di rinforzo.



Figura 8-39: vista in sezione delle fibre da 20 millimetri distribuite lungo la fessura diametrale

8.3.7 Campioni serie “G7 – STR20B (1.00)”

I provini della serie G7 – STR20B (1.00) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia il dosaggio più elevato di fibre da 20 mm ottenute dal taglio di corde STR 1 - Black. Si è dunque adottata una concentrazione pari a 1.00% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro provini cilindrici sottoposti al test sono stati confezionati in data 29/10/2025 e testati il 26/11/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito (tab. 8-19) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	91	71.6	88.4	80.2
f_{ct} [MPa]	2.89	2.28	2.81	2.55

Tabella 8-18: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G7-STR20B (1.00)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (f_{ct} medio) è pari a $f_{ct,medio} = 2.64 \text{ MPa}$, con una deviazione standard $\sigma = 0.28$ e un coefficiente di variazione $CoV = 10.59 \%$.

Anche per tale tipologia di rinforzo, in corrispondenza del dosaggio massimo è stata osservata una riduzione della resistenza media a trazione. Nello specifico, il valore registrato risulta allineato, se non addirittura inferiore, a quello della miscela di riferimento non rinforzata. Ciò dimostra ulteriormente che un eccessivo contenuto di fibre tende a vanificare l'effetto di rinforzo, indipendentemente dalla lunghezza delle stesse. L'unico beneficio riscontrabile in questa configurazione risiede nella capacità delle fibre di preservare l'integrità del provino in fase post-rottura, evitandone la frammentazione e limitando l'apertura delle fessure.



Figura 8-40: distribuzione delle fibre, da 20 mm e in massimo dosaggio, lungo la sezione di rottura



Figura 8-41: vista del campione cilindrico della serie G7-STR20B (1.00) aperto lungo la fessura diametrale

8.3.8 Campioni serie “G8 – STR30M (0.25)”

Nei provini di tale serie e delle successive serie G9 e G10 sono riscontrabili fibre di colore differente, ricavate da corde miste che variano per calibro e geometria della sezione, fattori che determinano una diversa capacità di aderenza alla matrice cementizia. Tali fibre miste sono state testate esclusivamente con una lunghezza di 30 mm, consentendo un confronto accurato con i risultati ottenuti dai campioni rinforzati tramite fibre standard con il medesimo dosaggio e lunghezza. I provini cilindrici della serie G8 – STR30M (0.25) sono stati dunque confezionati integrando un dosaggio pari allo 0.25% in peso di fibre miste da 30 mm, come indicato dalla nomenclatura. Essi sono stati confezionati in data 12/11/2025 e successivamente testati il 10/12/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito (tab. 8-20) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	101.4	74.4	84.4	77.2
f_{ct} [MPa]	3.22	2.36	2.68	2.45

Tabella 8-19: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G8-STR30M (0.25)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (f_{ct} medio) è pari a $f_{ct,medio} = 2.68 \text{ MPa}$, con una deviazione standard $\sigma = 0.39$ e un coefficiente di variazione $CoV = 14.37 \%$.

L'analisi della miscela con un dosaggio dello 0.25% di fibre miste ha evidenziato risultati in controtendenza rispetto alle miscele con fibre nere di pari concentrazione. In questo caso, infatti, la resistenza media a trazione non ha registrato incrementi rispetto alla matrice di riferimento, contrariamente a quanto osservato con le fibre nere. Tuttavia, un dato rilevante è l'elevata dispersione nei valori di rottura dei singoli provini. Tale variabilità è riconducibile all'eterogeneità del rinforzo misto, in cui la diversità di calibro e forma della sezione influenza la resistenza delle fibre e l'aderenza col calcestruzzo. Di conseguenza, all'aleatorietà dovuta all'orientamento delle fibre si somma a quella legata alle caratteristiche geometriche e meccaniche della singola fibra di rinforzo. Anche per questa tipologia di fibre non si rilevano differenze sostanziali nella capacità di contrastare l'apertura della fessura diametrale generata dal test di trazione indiretta.

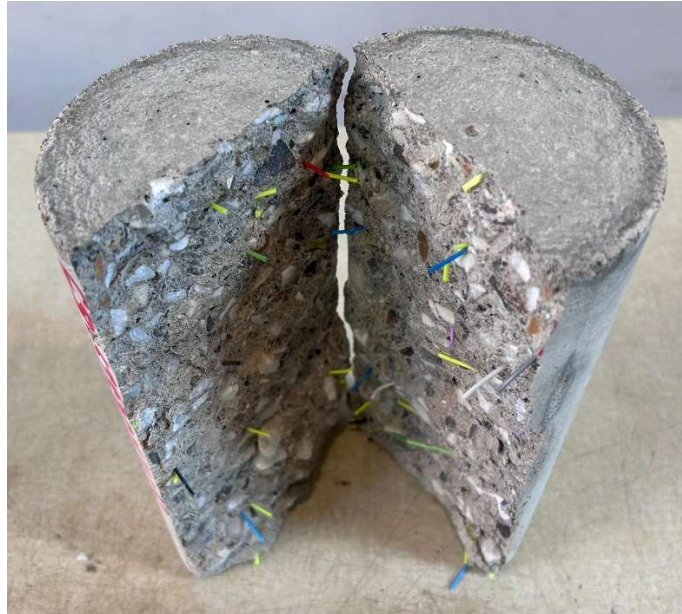


Figura 8-42: distribuzione delle fibre miste all'interno del provino cilindrico della serie G8-STR30M (0.25)

8.3.9 Campioni serie “G9 – STR30M (0.50)”

I provini della serie G9 – STR30M (0.50) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre miste da 30 mm adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro provini cilindrici sottoposti al test sono stati confezionati in data 19/11/2025 e testati il 17/12/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma. Di seguito (tab. 8-21) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	77.8	82.2	97.2	106.2
f_{ct} [MPa]	2.47	2.61	3.09	3.38

Tabella 8-20: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G9-STR30M (0.50)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (f_{ct} medio) è pari a $f_{ct,medio} = 2.89$ MPa, con una deviazione standard $\sigma = 0.42$ e un coefficiente di variazione $CoV = 14.50$ %.

Nonostante l'incremento del dosaggio, la risposta a trazione dei campioni rinforzati con fibre miste rimane allineata ai valori della serie di riferimento privi di rinforzo.

Si può quindi affermare che l'impiego di fibre miste incide in maniera trascurabile sulle prestazioni della miscela, verosimilmente a causa della variabilità intrinseca e della distribuzione irregolare delle fibre, che influenzano la dispersione dei dati senza innalzare la media globale. Tuttavia, è importante notare che l'aggiunta di fibre in tale quantità non penalizza la resistenza del materiale, dimostrando dunque che, analogamente a quanto osservato per le fibre nere di pari lunghezza, la soglia di dosaggio massimo oltre la quale si ha un decadimento prestazionale è superiore allo 0.50%. Dai test è emerso che, pur in presenza di forze di picco contenute, il danneggiamento dei campioni è stato limitato. Il quadro fessurativo è risultato infatti contenuto, con una fessura diametrale di ampiezza molto ridotta (Figura 8-42). Ciò conferma che l'efficacia del rinforzo si manifesta prevalentemente nella fase post-fessurativa, garantendo la coesione del materiale anche dopo il raggiungimento del carico di rottura che corrisponde al termine della prova.



Figura 8-43: fessura di ampiezza ridotta osservabile su campioni della serie G9-STR30M (0.50) post prova di trazione indiretta

8.3.10 Campioni serie "G10 – STR30M (1.00)"

I provini della serie G10 - STR30M (1.00) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia il dosaggio più elevato di fibre da 30 mm ottenute dal taglio di corde miste. Si è dunque adottata una concentrazione pari a 1.00% in peso, come indicato dalla nomenclatura. I quattro provini cilindrici sottoposti al test sono stati confezionati in data 24/11/2025 e testati il 22/12/2025 al raggiungimento dei 28 giorni di maturazione previsti dalla relativa norma.

Di seguito (tab. 8-22) sono riportate le informazioni relative ad ogni campione testato, inclusi i valori di resistenza a trazione ricavati analiticamente:

Campioni di prova	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
L [mm]	200	200	200	200
d [mm]	100	100	100	100
F [kN]	78.2	85.0	72.6	72.3
f_{ct} [MPa]	2.49	2.70	2.31	2.30

Tabella 8-21: informazioni e risultati relativi ai test di trazione indiretta sui campioni G10-STR30M (1.00)

Per i campioni appartenenti alla serie in questione, il valore medio rappresentativo della resistenza (f_{ct} medio) è pari a $f_{ct,medio} = 2.45$ MPa, con una deviazione standard $\sigma = 0.19$ e un coefficiente di variazione $CoV = 7.75$ %.

I test condotti sull'ultima serie di campioni confermano come anche la risposta meccanica a trazione sia influenzata dal dosaggio delle fibre. In linea con quanto riscontrato nelle precedenti serie con dosaggio all'1.0% in peso, si registrano qui i valori minimi di resistenza media a trazione. Dunque, un sovradosaggio di fibre penalizza le prestazioni meccaniche del materiale, determinando una progressiva riduzione delle resistenze sia a compressione che a trazione.



Figura 8-44: dettaglio della dispersione delle fibre miste con massimo dosaggio all'interno del provino cilindrico (aperto post-prova)

8.4 CONFRONTO GLOBALE DEI RISULTATI A TRAZIONE

Le previsioni relative ai test di trazione indiretta si basavano sulla premessa che l'efficacia del rinforzo fibroso si manifesta prevalentemente in fase post-picco, ovvero quando la matrice cementizia supera la propria resistenza limite a trazione e si fessura. Ipotizzando quindi un contributo delle fibre volto principalmente a conferire duttilità e a contenere l'apertura delle fessure, si era preventivata la difficoltà di quantificare tale effetto mediante la strumentazione impiegata, la quale consente di rilevare esclusivamente il carico massimo di rottura, comportando dunque il termine del rilevamento dei valori in concomitanza alla fase iniziale di attivazione delle fibre.

Tuttavia, i risultati ottenuti suggeriscono che il rinforzo sia in grado di agire anche internamente alla matrice cementizia ostacolando la propagazione delle microfessure. Quest'azione, precedente alla rottura fragile, consente di incrementare il carico di picco, come effettivamente riscontrato in alcuni dei campioni analizzati.

L'analisi complessiva dei risultati delle prove di trazione indiretta ed il confronto tra le diverse miscele testate hanno evidenziato un andamento dei valori di resistenza che richiede un approfondimento specifico. Come riportato precedentemente, tali variazioni di resistenza sono imputabili prevalentemente alla diversa quantità di fibre inserite nella matrice, testata su tre livelli di dosaggio. Per visualizzare meglio questo fenomeno, si riportano di seguito le curve di resistenza a compressione media in relazione al dosaggio per ogni miscela analizzata.

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 30 mm ricavate da corde standardizzate (STR 1 - Black)

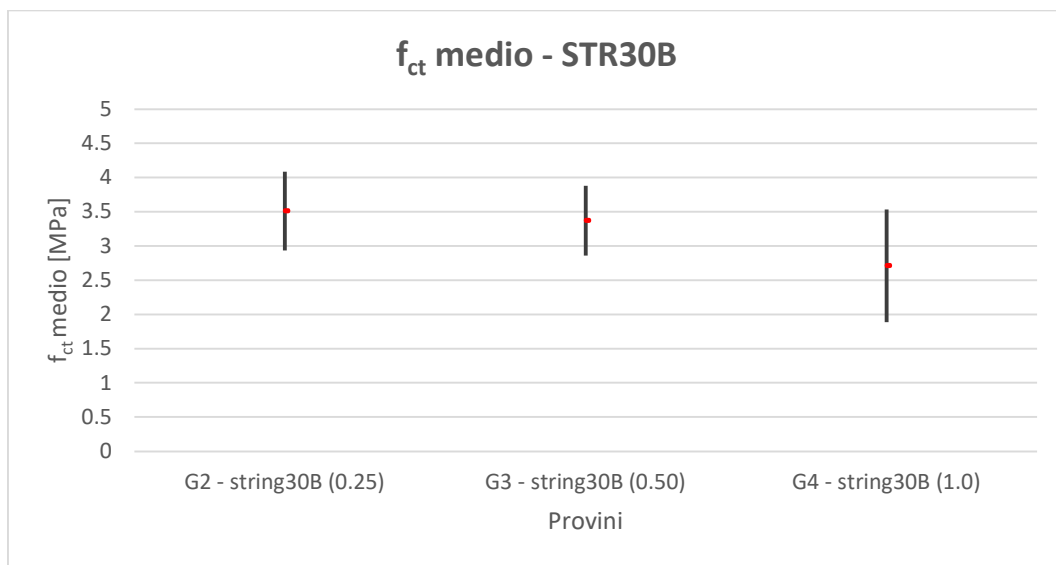


Figura 8-45: resistenza media a trazione dei differenti dosaggi (STR30B) a parità di tipologia di fibre

Dal grafico emerge la superiorità della risposta meccanica per i dosaggi dello 0.25% e 0.50% in peso di fibre, i quali presentano tra loro degli scarti trascurabili in termini di resistenza a trazione. Tuttavia, aumentando ulteriormente la concentrazione, si osserva una riduzione della resistenza rispetto alla miscela di riferimento priva di fibre. Il grafico sottostante descrive questo andamento, mettendo in relazione le variazioni di resistenza a trazione in funzione del dosaggio di fibre nella miscela cementizia:

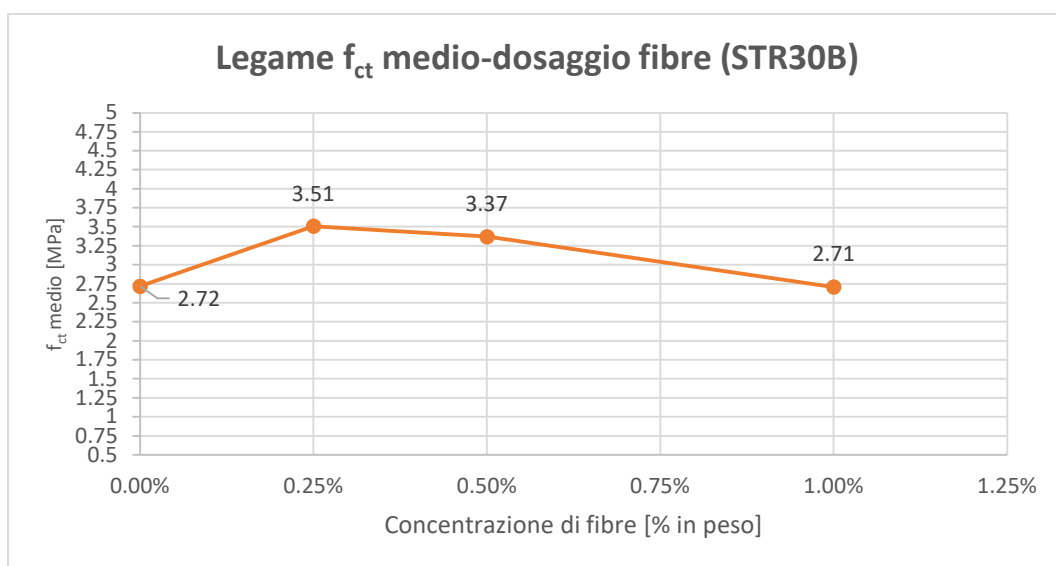


Figura 8-46: andamento della resistenza media a trazione in funzione del dosaggio (STR30B)

Dall'andamento riportato nel grafico si evince una riduzione delle prestazioni meccaniche nel caso di dosaggi eccessivi di fibre nella miscela. Come già osservato precedentemente, un'elevata concentrazione può compromettere l'omogeneità della matrice, anticipando il collasso a carichi di picco inferiori. Tuttavia, le fibre conferiscono al materiale un comportamento più duttile, contrastando la propagazione delle fessure e preservando l'integrità del provino anche dopo il picco di carico. L'analisi mostra una riduzione della resistenza a trazione per dosaggi superiori allo 0.50%, identificando in tale valore la soglia critica di concentrazione oltre la quale il rinforzo compromette le prestazioni meccaniche della miscela.



Figura 8-47: confronto interno tra i campioni rinforzati con dosaggi differenti di fibre da 30 mm (da sinistra: fibre assenti, 0.25% in peso, 0.50% in peso, 1.00% in peso)

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 20 mm ricavate da corde standardizzate (STR 1 - Black)

Un andamento simile dei risultati è stato osservato con i campioni rinforzati da fibre lunghe 20 mm, sebbene si osservi una resistenza media a trazione lievemente inferiore rispetto alla serie da 30 mm. Tale riduzione si accentua in corrispondenza del dosaggio dello 0.50%, dove si registra una risposta meccanica significativamente più bassa rispetto ai campioni rinforzati con stessa concentrazione di fibre più lunghe.

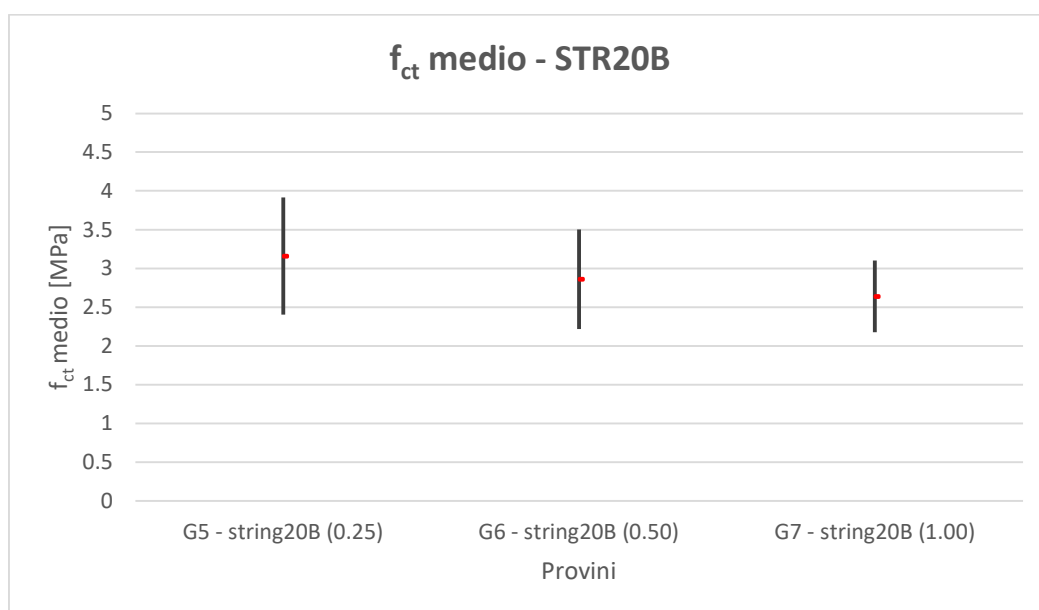


Figura 8-48: resistenza media a trazione dei differenti dosaggi (STR20B) a parità di tipologia di fibre

Nel caso del rinforzo con fibre da 20 mm, si è riscontrata una risposta globale a trazione meno efficace della miscela, al contrario di quanto osservato per il comportamento a compressione, ambito nel quale la ridotta lunghezza delle fibre aveva invece garantito prestazioni superiori.

Anche per questa configurazione, i risultati migliori sono stati ottenuti con dosaggi contenuti, non superiori allo 0.25% in peso. La relazione tra resistenza e contenuto di fibre ricalca dunque l'andamento già osservato per la serie di campioni rinforzati da fibre lunghe, evidenziando però un decadimento prestazionale più marcato per concentrazioni pari o superiori allo 0.50% in peso.

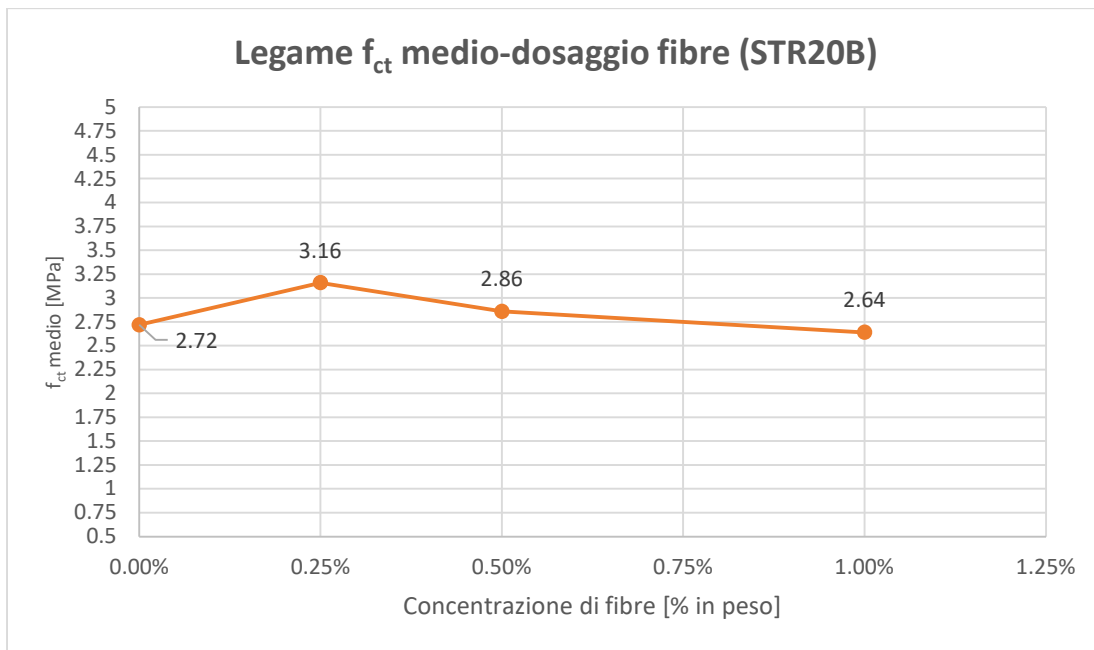


Figura 8-49: andamento della resistenza media a trazione in funzione del dosaggio (STR20B)

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 30 mm ricavate da corde miste

Si è riscontrata una variazione di tendenza nel caso di rinforzo con fibre miste da 30 mm, evidenziano per tutti i dosaggi un'assenza di miglioramento prestazionale a trazione rispetto ai valori di riferimento. La particolarità di tale serie, che la differenzia dalle altre, risiede nella sostanziale invarianza della risposta a trazione rispetto al quantitativo di fibre, portando ad avere dei valori medi di resistenza molto simili per i tre differenti dosaggi. Si osserva addirittura una lieve inversione di tendenza, con una resistenza media allo 0.25% inferiore a quella registrata per lo 0,50%.

L'assenza di una chiara tendenza decrescente differenzia il comportamento meccanico dei campioni rinforzati con fibre miste rispetto alle altre tipologie di rinforzo esaminate.

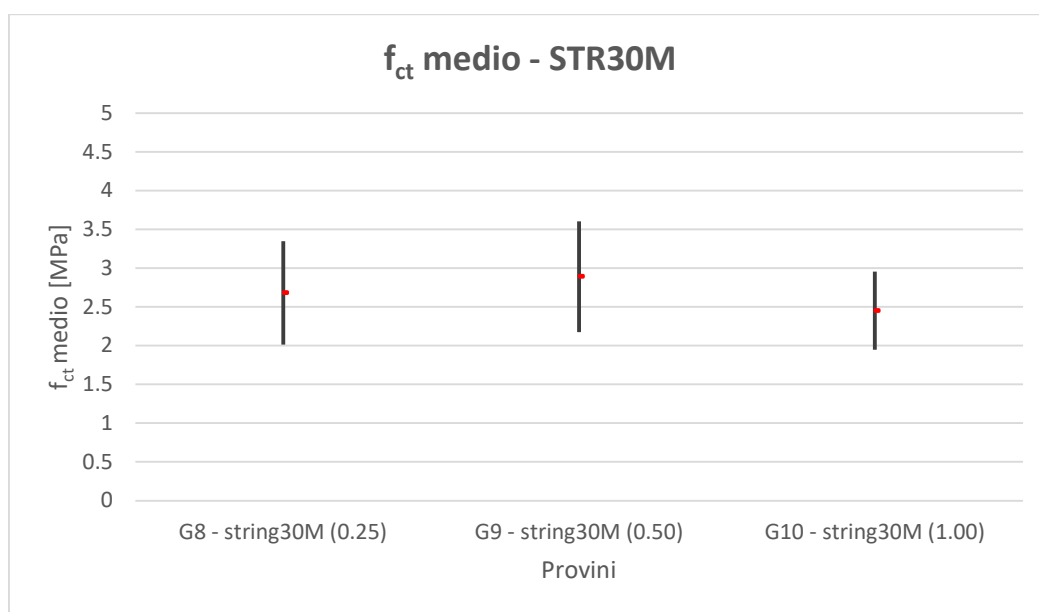


Figura 8-50: resistenza media a trazione dei differenti dosaggi (STR30M) a parità di tipologia di fibre

La curva che esprime il legame tra resistenza media a compressione e dosaggio di fibre mostra dunque un andamento differente rispetto a quello osservato per le precedenti miscele. È inoltre evidente l'assenza di miglioramento prestazionale riscontrato per ognuna delle concentrazioni testate.

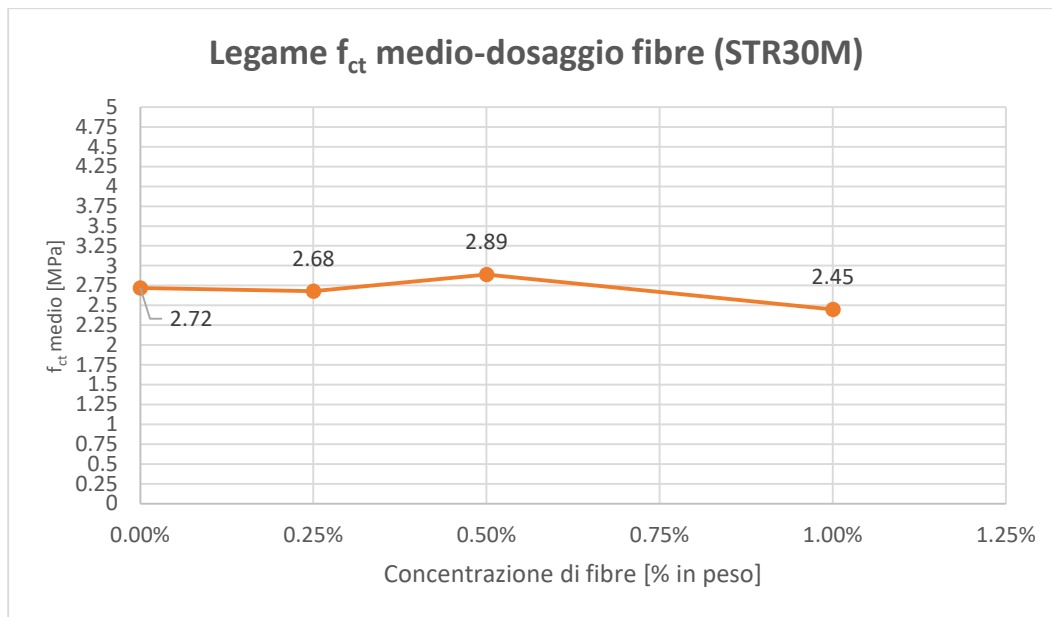


Figura 8-51: andamento della resistenza media a trazione in funzione del dosaggio (STR30M)

8.4.1 L'influenza della tipologia di fibre sul comportamento a trazione

Dallo studio dei risultati precedente riportati, si evince che gli effetti migliorativi dovuti all'inserimento di fibre di riciclo nel calcestruzzo, sottoposto a trazione indiretta, sono riscontrabili solamente per un dosaggio pari allo 0.25% in peso. Inoltre, tale concentrazione risulta efficace solo nel caso di fibre omogenee, si è dunque considerato tale quantitativo come parametro di riferimento per valutare l'influenza della tipologia di fibra sul comportamento a trazione del conglomerato. Di seguito viene proposto un confronto grafico, a parità di dosaggio, tra la resistenza media della miscela di riferimento e quella delle tre varianti rinforzate:

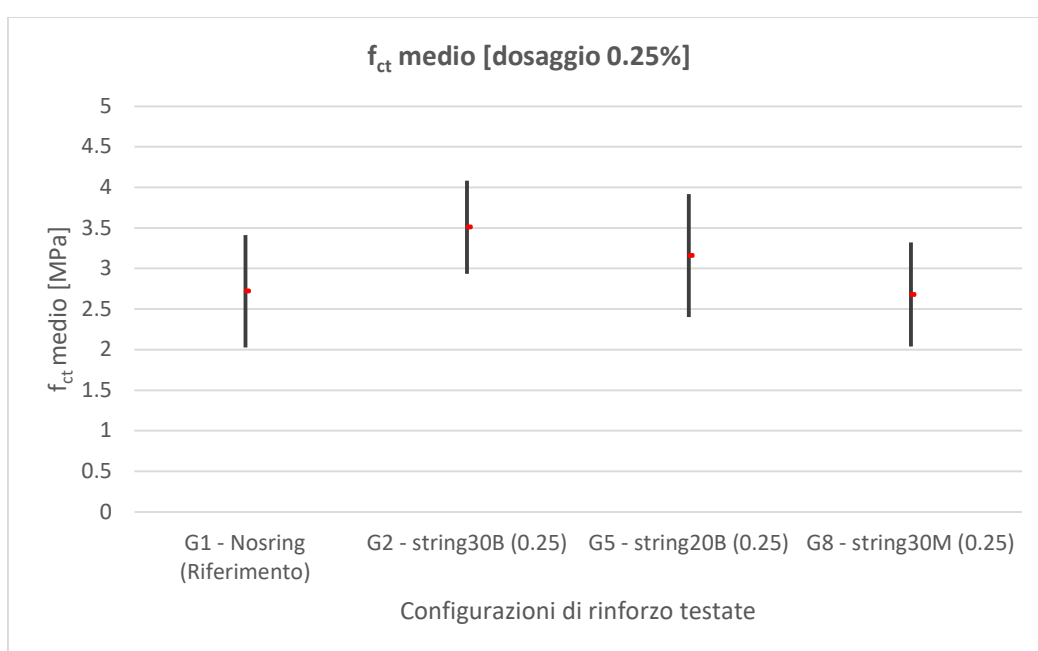


Figura 8-52: confronto tra le resistenze a trazione a parità di dosaggio di fibre (0.25%)

L'analisi dei dati evidenzia delle variazioni non trascurabili tra i valori sperimentali delle diverse miscele a parità di concentrazione. È evidente, infatti, che la miscela rinforzata tramite l'impiego di fibre miste non comporti alcuna variazione strutturale a trazione rispetto alla miscela di riferimento priva di rinforzo. Si riscontra invece un miglioramento delle prestazioni per le miscele che impiegano fibre omogenee ricavate da corde STR 1 - Black, le quali risultano maggiormente efficaci sotto forma di fibre lunghe 30 millimetri. Seppur le differenze tra i valori di resistenza a trazione possano sembrare trascurabili, è necessario considerare che si tratta di grandezze ricavate analiticamente dalla conoscenza del carico di picco registrato dal macchinario, il quale è risultato, sul singolo campione, fino a 40 kN superiore rispetto a quello ottenuto dai test sui campioni di riferimento. Per rendere

più evidente la discrepanza tra i valori è dunque necessario ragionare in termini di valore medio dei carichi di rottura dei campioni sottoposti a trazione indiretta, per i quali è proposto un confronto nella tabella 8-23:

Miscele di prova [Dosaggio 0.25%]	G1-Nostrings	G2-STR30B	G5-STR20B	G8-STR30M
F_{medio} [kN]	85.4	110.3	99.2	84.35

Tabella 8-22: confronto tra i valori medi dei carichi di rottura per miscele con dosaggio dello 0.25%

Perciò, a differenza di quanto osservato nelle prove a compressione, risulta evidente come, a parità di dosaggio, una grande influenza sui risultati sia dovuta alla tipologia di fibra ed alla loro lunghezza. Dimostrando dunque come il tipo di rinforzo più efficace sia quello costituito da fibre omogenee ricavate da corde tagliate ogni 30 millimetri.

Tuttavia, è necessario notare che anche nel caso di risposta a trazione il dosaggio di fibre influisce molto sui risultati. Concentrandosi sui campioni contenenti la tipologia di rinforzo più performante, la Figura 8-45 mostra un netto decadimento delle prestazioni all'aumentare della concentrazione di fibre, fino ad annullarne completamente l'effetto in corrispondenza del quantitativo massimo. Anche in tal caso, per evidenziare le differenze di risposta si riportano di seguito i valori medi dei carichi di rottura ottenuti per le diverse miscele realizzate con tale rinforzo in dosi differenti.

Miscele di prova	G1-Nostrings [0.00%]	G2-STR30B [0.25%]	G3-STR30B [0.50%]	G4-STR30B [1.00%]
F_{medio} [kN]	85.4	110.3	105.8	85.0

Tabella 8-23: valori medi dei carichi di rottura per miscele con stesso rinforzo e differente dosaggio

In definitiva, si può affermare che il comportamento a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato prodotto dipende da diversi fattori relativi al tipo di rinforzo impiegato. Oltre al dosaggio, infatti, anche la lunghezza e la tipologia delle fibre influenzano in modo determinante la risposta meccanica del materiale sottoposto a sforzo di trazione.

Dunque, nel definire una concentrazione ideale che possa portare dei miglioramenti alla miscela, l'impiego di fibre da riciclo con proprietà omogenee e lunghezza di 30

mm si è rivelato la soluzione più efficace. Tuttavia, l'utilizzo di tale rinforzo necessita di dosaggi contenuti, non superiori allo 0.50% in peso, attestandosi su una concentrazione ideale pari allo 0.25%. Nel caso di dosaggi troppo elevati, l'influenza delle caratteristiche geometriche delle fibre diviene invece irrilevante, in quanto si è osservato un decadimento prestazionale generalizzato per tutte le tipologie di rinforzo inserite con una concentrazione dell'1.00% in peso, individuando in tal modo una soglia critica oltre la quale l'aggiunta di fibre cessa di apportare benefici alla resistenza a trazione.

8.5 ANALISI DEL COMPORTAMENTO A FLESSIONE

Per definire le prestazioni e caratterizzare le proprietà di un calcestruzzo fibrorinforzato, la tipologia di prova di riferimento è il test a flessione su quattro punti. Tale metodologia permette di sollecitare il provino fino a indurre la fessurazione nella zona tesa, consentendo dunque di analizzare la capacità delle fibre di contrastarne l'apertura. In tal modo, le fibre conferiscono un comportamento duttile al calcestruzzo, garantendo il mantenimento di una capacità portante residua anche in seguito alla rottura fragile della matrice cementizia. Nel presente studio, l'esecuzione di tale tipologia di prova ha permesso di verificare la capacità delle fibre ricavate dal riciclo delle corde da tennis di esibire prestazioni analoghe a quelle delle fibre sintetiche commerciali comunemente impiegate negli FRC. Secondo le indicazioni delle linee guida [2], la prova di flessione su quattro punti consente di caratterizzare il calcestruzzo fibrorinforzato sulla base della definizione di due grandezze caratteristiche: $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$. Nello specifico, il parametro $f_{R,1k}$ (espresso in MPa) rappresenta la resistenza post-fessurazione calcolata in corrispondenza di un'apertura della fessura (CMOD - Crack Mouth Opening Displacement) pari a 0.5 mm. Il parametro $f_{R,3k}$ indica invece la resistenza residua riferita a un'ampiezza della fessura di 2.5 mm. Il rapporto tra quest'ultimo parametro e la resistenza $f_{R,1k}$ consente di dedurre la classe di resistenza residua del materiale sulla base di una tabella che mette in relazione tali due grandezze caratteristiche.

L'obiettivo principale dei test effettuati in laboratorio è stato dunque quello di monitorare l'apertura della fessura, misurando la deformazione all'intradosso del campione tramite un apposito estensimetro disposto secondo le indicazioni delle linee guida (si veda la Figura 8-53), al fine di correlarla alla relativa tensione agente nella sezione.

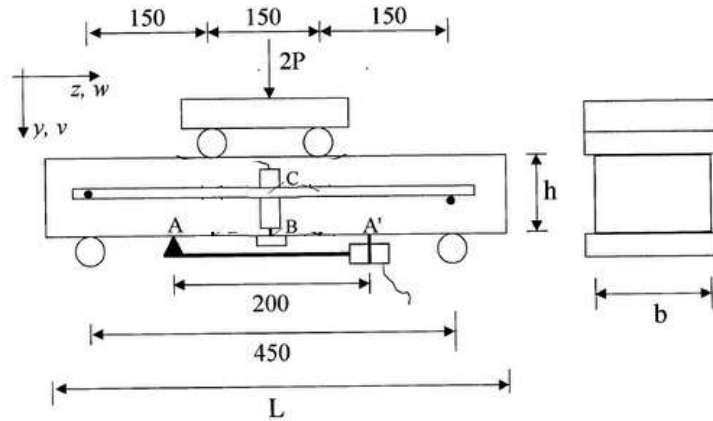


Figura 8-53: rappresentazione della configurazione di prova utilizzata per i test a flessione

Oltre a tale parametro fondamentale, le normative di riferimento richiedono di rilevare anche la freccia in mezzeria generata dall'applicazione del carico, al fine di correlare anch'essa alla forza applicata e valutare l'entità dell'inflessione prima e dopo il verificarsi della fessurazione. A tal fine, prima dell'esecuzione di ciascun test, ogni provino è stato equipaggiato con un adeguato sistema di misurazione, composto da trasduttori in grado di registrare simultaneamente l'allungamento all'intradosso e la freccia in mezzeria.



Figura 8-54: particolare del sistema di trasduttori in grado di misurare la freccia in mezzeria e l'allungamento all'intradosso

Nei successivi paragrafi sono riportati in dettaglio i risultati sperimentali relativi a ciascun provino. Vengono innanzitutto riportati i parametri meccanici fondamentali, tra cui il carico di picco che comporta la prima fessurazione dovuta alla rottura della matrice cementizia in zona tesa. Successivamente si illustrano i parametri deformativi acquisiti, espressi attraverso le curve di correlazione carico-freccia in mezzeria e carico-allungamento all'intradosso.

Oltre alle suddette curve, vengono riportati anche i diagrammi relativi all'andamento nel tempo dei dati misurati (carico, sforzo e parametri deformativi), al fine di garantire una corretta interpretazione dei risultati. La strumentazione impiegata per le prove presenta una frequenza di campionamento pari a 5 dati al secondo, fornendo dunque una terna di valori (carico, sforzo e deformazione) ogni 0.2 secondi. Tale frequenza, tuttavia, non risulta sufficientemente elevata per descrivere in modo accurato la fase di innesco e propagazione della fessura, essendo quest'ultimo un fenomeno estremamente rapido. Di conseguenza, in tutti i grafici che correlano il carico alla freccia in mezzeria, o lo sforzo alla deformazione all'intradosso, il tratto discendente post-fessurazione risulta molto ripido. Graficamente esso assume un andamento lineare fittizio, poiché è definito da un numero ridottissimo di punti (circa tre) acquisiti durante il brevissimo istante di fessurazione. Tali dati sono insufficienti per ricostruire il reale andamento curvilineo della risposta del materiale in quella fase. La rappresentazione della deformazione in funzione del tempo consente, pertanto, di individuare con esattezza l'intervallo in cui si sviluppa la lesione, la cui propagazione in frazioni di secondo rende complessa un'osservazione sperimentale più dettagliata.

Sebbene il tratto lineare discendente post-fessurazione, osservabile nei diagrammi seguenti, non sia una riproduzione esatta dell'andamento reale, la frequenza di acquisizione impiegata si è rivelata sufficiente per definire accuratamente la pendenza in due punti chiave. È stato infatti possibile calcolare la tangente al picco della curva, ovvero nell'istante antecedente l'innesco della lesione, e la tangente all'inizio della fase plastica residua, ovvero quando la fessura risulta stabilizzata. Dal confronto si evince che tali tangenti presentano una pendenza pressoché coincidente con quella del tratto lineare tracciato sul diagramma, come osservabile nell'esempio in figura 8-55. Dunque, tale corrispondenza valida l'andamento tracciato, dimostrando che l'approssimazione effettuata non inficia la lettura del fenomeno.

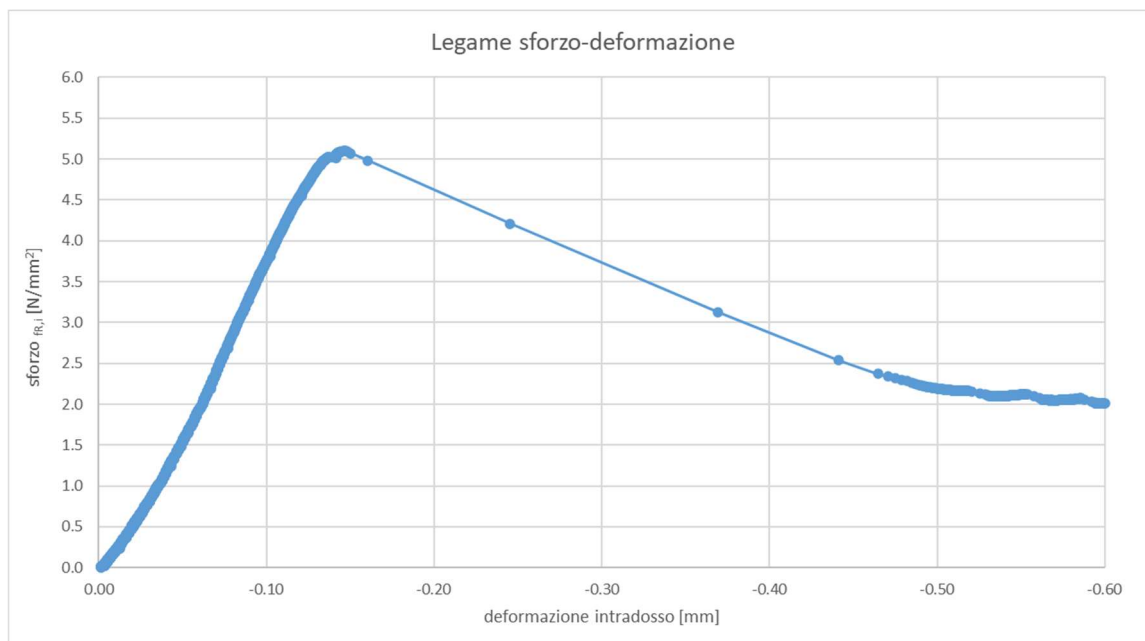


Figura 8-55: esempio che mostra l'andamento dei dati prima e dopo il tratto discendente dovuto alla fessurazione

In conclusione, la densità dei dati registrati si dimostra sufficiente per approssimare fedelmente la reale risposta del materiale durante la formazione della lesione. Di conseguenza, i punti intercettati su questa porzione di curva possono essere considerati pienamente attendibili. Tale validazione si è dimostrata essenziale per la rilevazione del parametro $f_{R,1k}$ riferito a una deformazione intradossale di 0.5 mm. Nei campioni con basso dosaggio fibroso, infatti, l'estrazione di questo parametro avviene intercettando la curva proprio lungo la fase discendente post-picco.

Noti tali parametri deformativi, sono stati calcolati gli sforzi all'interno della sezione dovuti al momento flettente generato dal carico, e sono stati correlati all'entità di apertura della fessura (CMOD) al fine di ottenere un diagramma in grado di descrivere in maniera esaustiva il comportamento duttile del materiale, evidenziando l'efficacia delle fibre nel cucire i lembi della fessura e contrastarne l'apertura. Su tale curva sono stati poi individuati i fattori fondamentali, $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i quali risultano essenziali per quantificare la resistenza residua del conglomerato cementizio prodotto e attribuirgli la relativa classe prestazionale. Il calcolo degli sforzi generati dalla flessione è stato condotto applicando le indicazioni delle Linee guida per l'identificazione e la qualificazione degli FRC [17], basate sul modello di trave di Eulero-Bernoulli. Nonostante il rapporto dimensionale dei provini li renda a tutti gli effetti degli elementi tozzi, e dunque soggetti a un regime tensionale

differente da quello flessionale puro, i riferimenti normativi procedono comunque utilizzando l'espressione classica per il calcolo delle tensioni agenti in una trave inflessa. Ciò giustifica gli elevati valori di sforzo riscontrati nei test e riportati nei successivi paragrafi, i quali non risulterebbero altrimenti coerenti con le resistenze ottenute da prove di diversa natura condotte sulle stesse miscele. Pertanto, l'impiego di questi valori è volto principalmente al confronto delle prestazioni tra le diverse miscele fibrorinforzate, allo scopo di caratterizzarle e assegnare loro un'adeguata classe prestazionale. L'espressione impiegata per il calcolo dello sforzo nei campioni sottoposti a flessione su quattro punti è dunque la seguente:

$$f_{R,i} = \frac{6 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2}$$

dove:

- F corrisponde alla forza concentrata applicata da un singolo cilindro disposto superiormente al campione, equivale dunque alla metà del carico applicato dal macchinario;
- a indica la distanza tra l'appoggio ed il punto di applicazione della forza;
- b ed h appresentano le dimensioni della sezione del provino, pari entrambi a 100 mm trattandosi di campioni a sezione quadrata.

8.5.1 Campioni serie "G1-Nostrings"

Come per le precedenti tipologie di prova, vengono analizzati per primi i risultati relativi alla miscela di riferimento priva di fibre. Nei test a flessione, la differenza di comportamento tra un campione rinforzato e uno non rinforzato è marcata e prevedibile, infatti la mancanza di un rinforzo fibroso impedisce lo sviluppo di un comportamento plastico successivo al raggiungimento del carico di picco. Per tali campioni, dunque, l'assenza di rinforzo comporta una rottura fragile del provino prismatico soggetto a flessione, consentendo esclusivamente la determinazione della resistenza di picco. Pertanto, i diagrammi carico-deformazione o sforzo-allungamento all'intradosso della miscela di riferimento presentano un andamento nettamente distinto rispetto a quello dei campioni fibrorinforzati. Per questo motivo, il confronto tra le due serie può essere effettuato unicamente in termini di carico massimo a rottura. I test a flessione sui campioni di riferimento evidenziano chiaramente il ruolo delle fibre all'interno del conglomerato, le quali prevenivano la propagazione fragile delle fessure, fenomeno che invece porta al collasso improvviso e totale dei campioni non rinforzati una volta superato il carico limite.

La serie di riferimento, denominata 'NoStrings', è composta da due provini prismatici sottoposti a flessione, dei quali si riportano di seguito i risultati integrali.



Figura 8-56: campioni privi di fibre portati a rottura per flessione

Il diagramma che correla il carico applicato alla freccia in mezzeria (fig. 8-57) descrive il comportamento del provino inflesso fino a rottura, permettendo di individuare il carico massimo che innesca la fessurazione. Dalla curva ottenuta è inoltre evidente il comportamento fragile del campione, per il quale come previsto si ha un crollo prestazionale post-picco. Tale comportamento determina un andamento sperimentale differente rispetto a quello dei provini fibrorinforzati.

Parallelamente a tale curva, si riporta l'evoluzione temporale del carico e della freccia, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

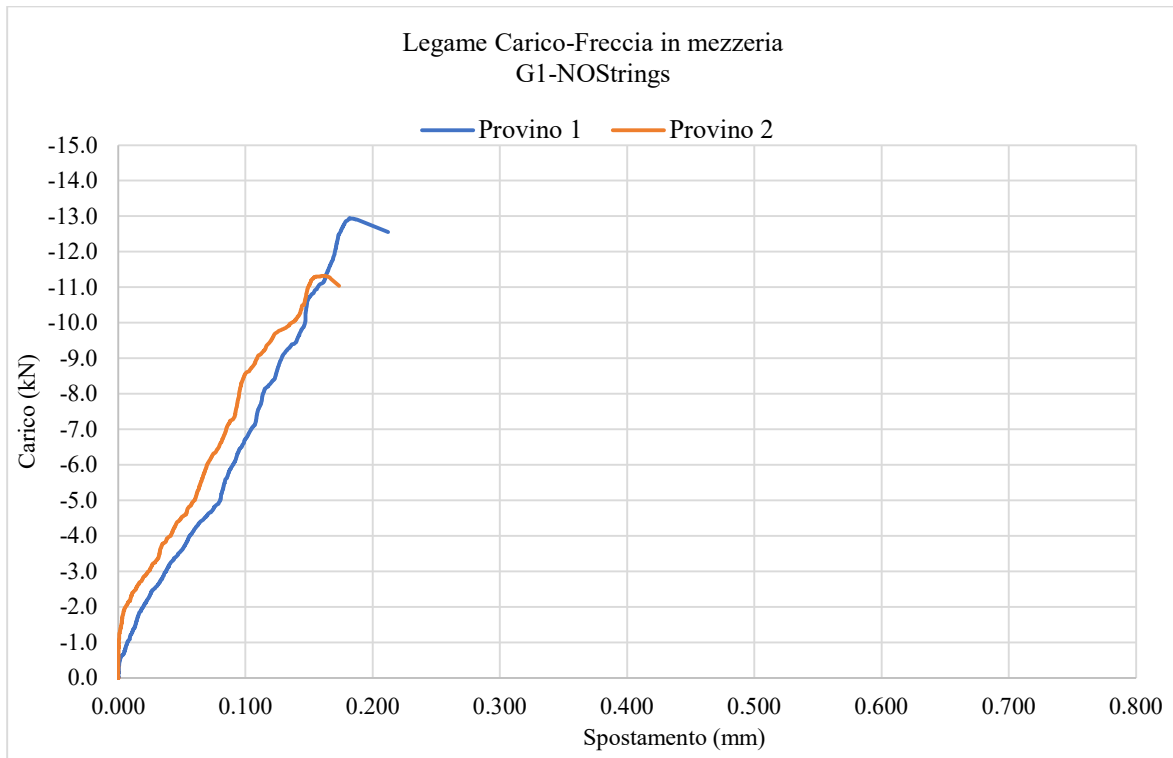


Figura 8-57: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G1-Nostrings

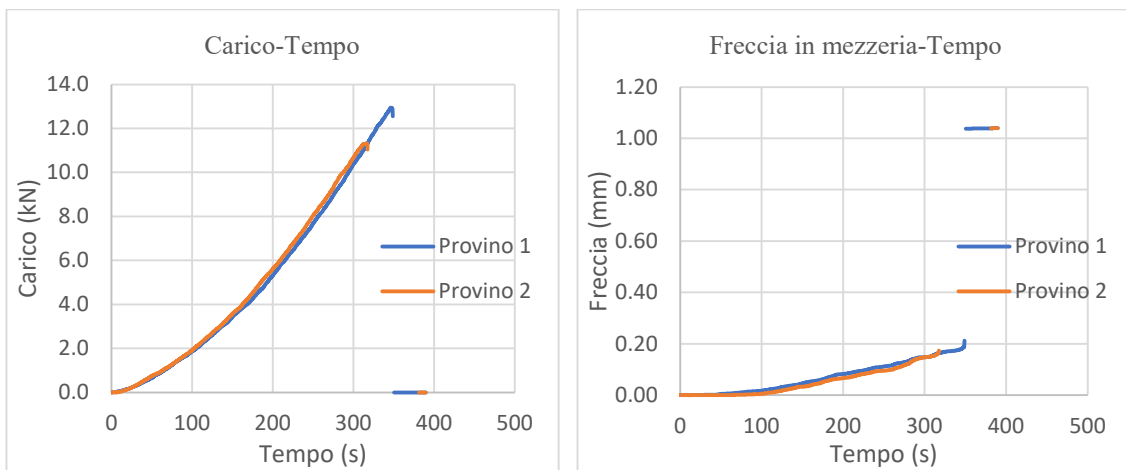


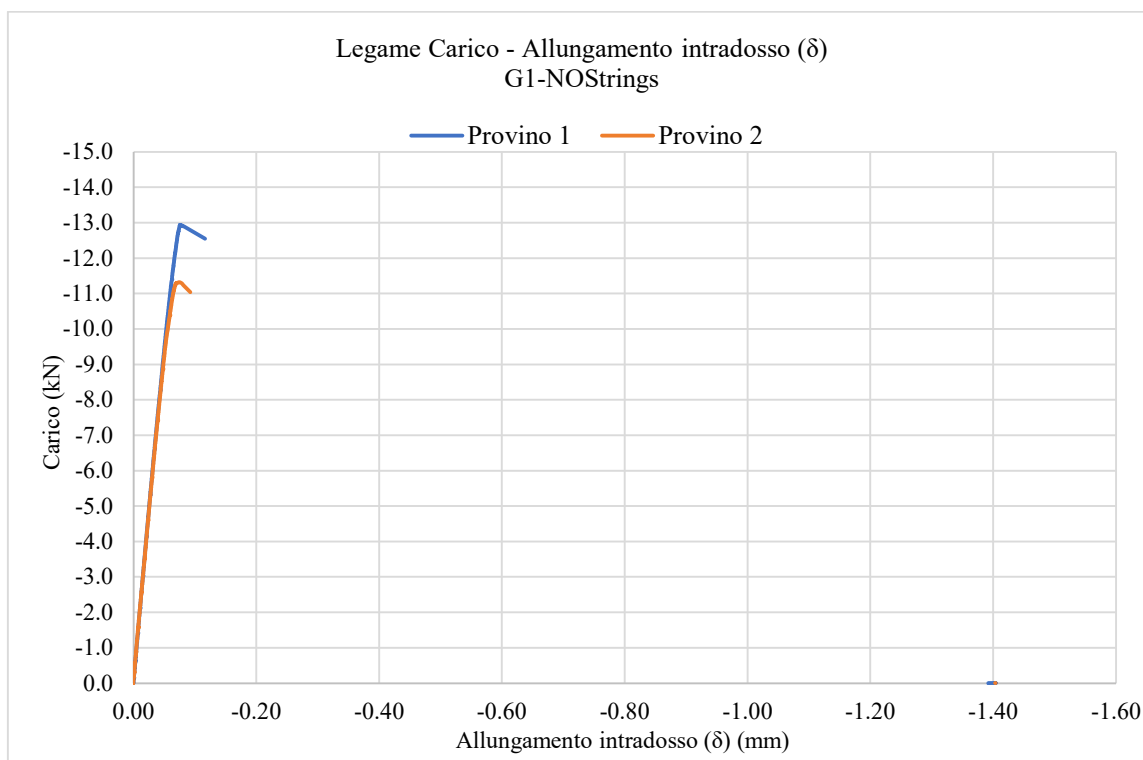
Figura 8-58: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G1-Nostrings

Oltre a confermare il comportamento fragile della miscela, le curve evidenziano il valore del carico di picco che innesca la fessurazione dei due campioni:

Miscela di prova	G1-Nostrings [0.00%]	
Campioni	Provino 1	Provino 2
F_{max} [kN]	12.94	11.32
$F_{max,medio}$ [kN]	12.13	

Tabella 8-24: valori del carico di picco dei campioni della serie G1-Nostrings

Di particolare importanza per definire la capacità di azione delle fibre riciclate testate, è la correlazione tra il carico applicato e l'allungamento all'intradosso del campione inflesso. Nello specifico, la misura di tale deformazione permette di quantificare l'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale. Tuttavia, per i campioni non rinforzati della serie in esame, tali diagrammi non presentano alcun ramo plastico, poiché la capacità resistente si azzerava al raggiungimento del carico di picco. Per completezza, si riportano di seguito i grafici che illustrano l'andamento della deformazione all'intradosso in funzione del carico e dello sforzo che si genera nella sezione. Anche in questo caso, si riporta l'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.



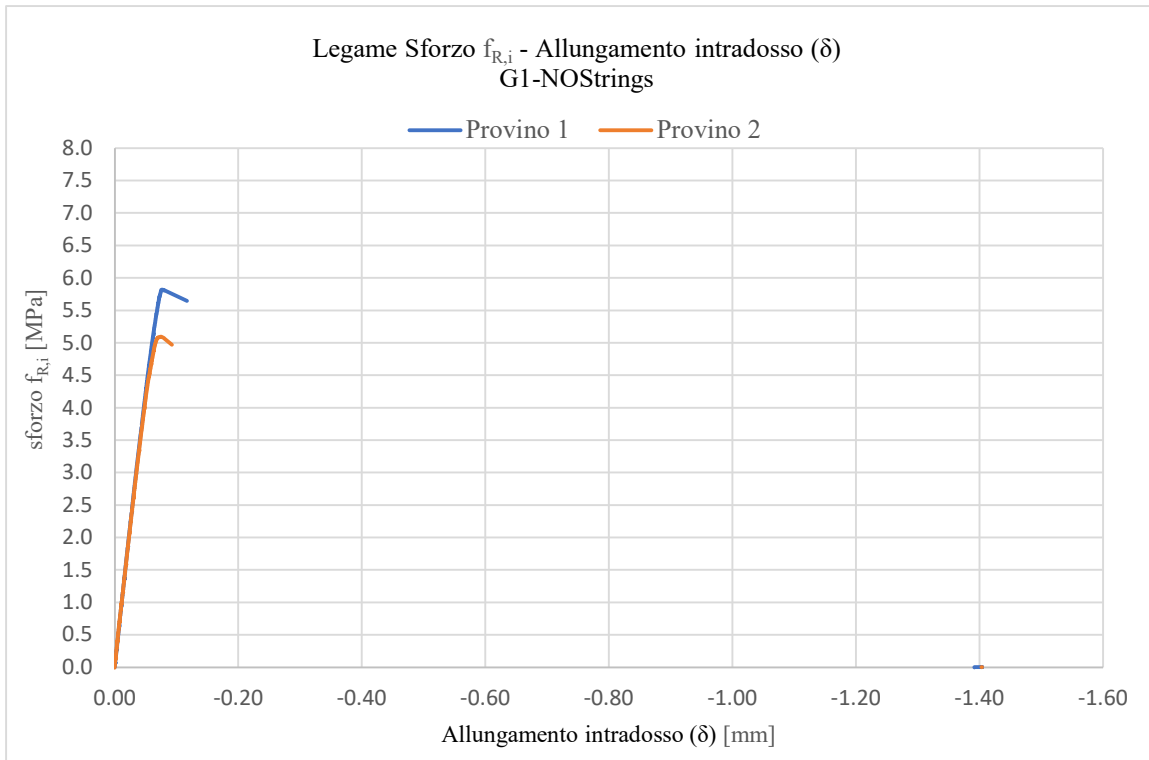


Figure 8-59: correlazione dell'allungamento all'intradosso con carico e sforzo. Campioni G1-Nostrings

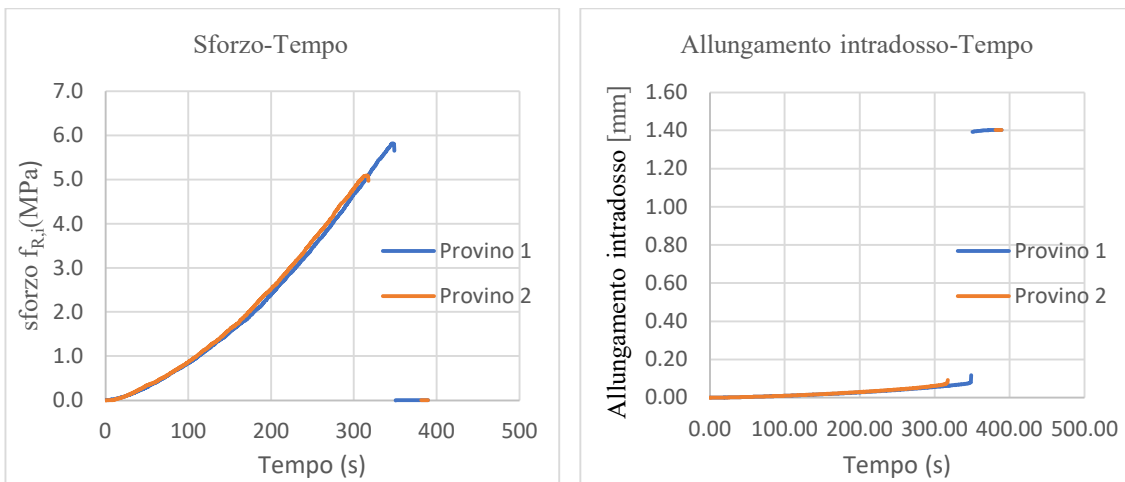


Figura 8-60: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G1-Nostrings

8.5.2 Campioni serie “G2 - STR30B (0.25)”

I provini della serie G2 - STR30B (0.25) presentano un rinforzo fibroso costituito da fibre lunghe 30 mm ottenute dal taglio di corde da tennis riciclate. Nello specifico, sono state impiegate corde STR 1 - Black (colore nero) adottando una concentrazione pari allo 0.25% in peso, come indicato dalla nomenclatura. Per tali campioni si è osservato un comportamento duttile, attribuibile all'azione delle fibre che garantiscono una resistenza residua post-picco riscontrabile anche nell'andamento dei digrammi di seguito riportati. Dunque, l'efficacia del rinforzo fibroso è osservabile già per i campioni costituiti da tale miscela, nonostante contengano un basso dosaggio di fibre.



Figura 8-61: test di flessione su un campione della serie G2-STR30B (0.25). Vista della fessura formatasi in mezzeria

La serie G2 - STR30B (0.25) è composta da tre provini prismatici sottoposti a flessione, dei quali si riportano di seguito i risultati integrali. Il diagramma che correla il carico applicato alla freccia in mezzeria descrive il comportamento del provino inflesso fino a rottura e la successiva fase plastica che si sviluppa dopo dell'innescò della fessurazione. La curva evidenzia un improvviso calo del carico in corrispondenza della fessurazione della matrice, seguito da un tratto post-picco sostanzialmente costante. Quest'ultimo corrisponde all'azione delle fibre riciclate, le quali, opponendosi all'apertura della fessura, garantiscono al materiale un comportamento spiccatamente duttile. Tale andamento dimostra una profonda differenza prestazionale rispetto ai provini non rinforzati, confermando l'efficacia delle fibre derivanti da corde da tennis nell'attivare un meccanismo di cucitura delle

fessure dopo della loro formazione. Parallelamente a tale curva, si riporta l'evoluzione temporale del carico e della freccia, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

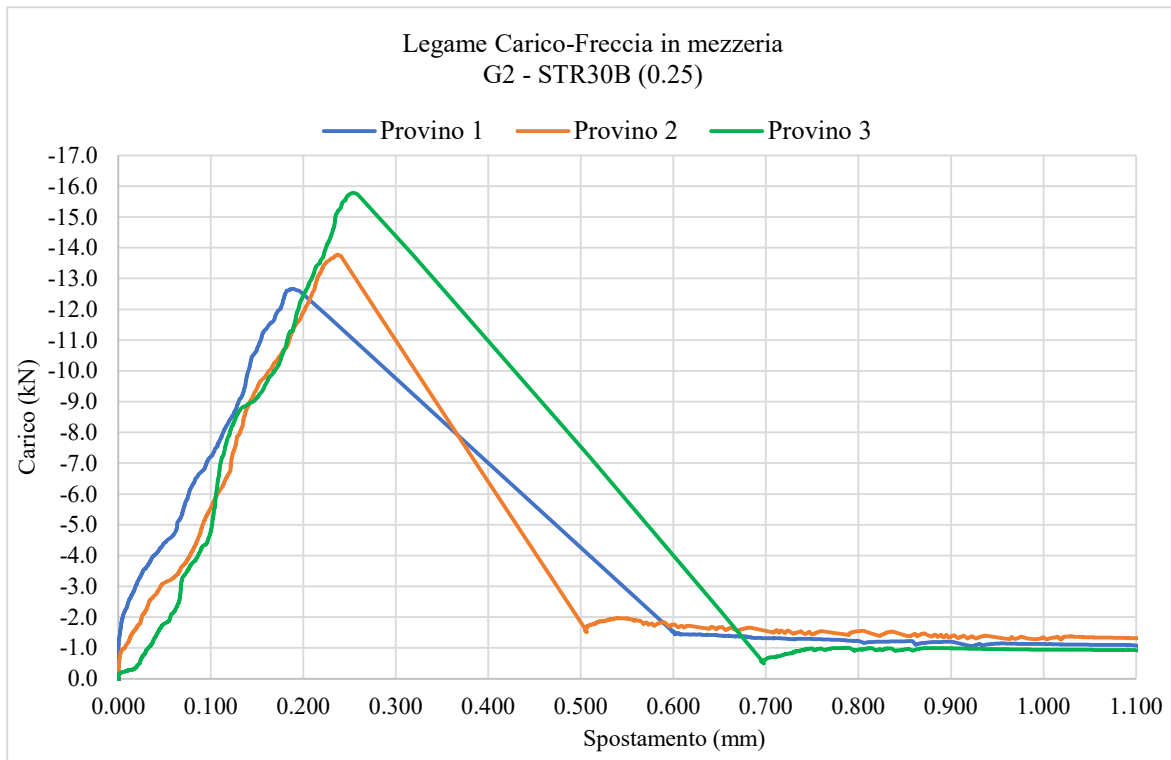


Figura 8-62: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G2-STR30B (0.25)

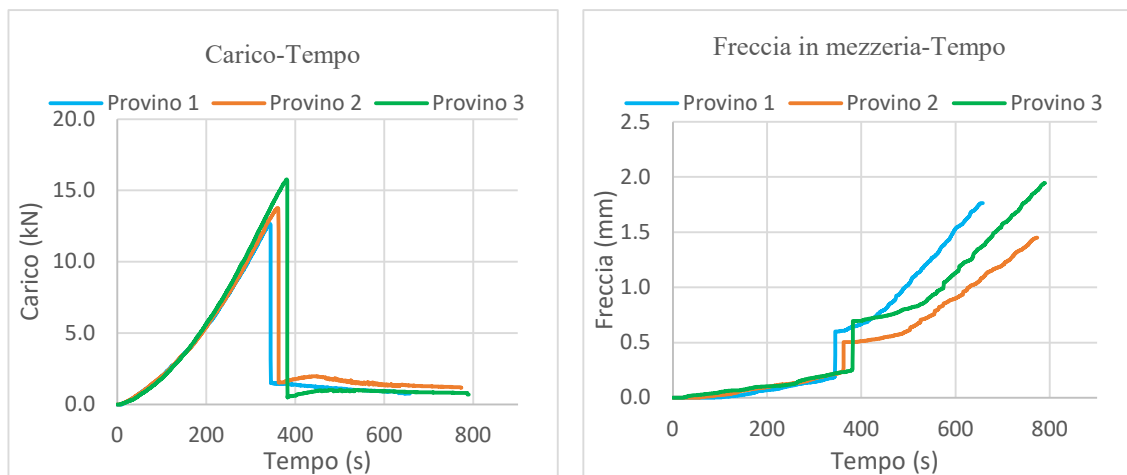


Figura 8-63: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G2-STR30B (0.25)

Oltre a evidenziare il comportamento duttile della miscela, le curve permettono di individuare il carico di picco che innesca la fessurazione. Tale valore massimo presenta una notevole variabilità tra i tre campioni, registrando uno scarto

nell'ordine dei 3 kN tra il provino 1 e il provino 3. Nel complesso, il valore medio risulta maggiore rispetto a quello osservato per la miscela priva di fibre.

Miscela di prova	G2-STR30B [0.25%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	12.67	13.78	15.79
$F_{max,medio}$ [kN]	14.08		

Tabella 8-25: valori del carico di picco dei campioni della serie G2-STR30B (0.25)

La correlazione tra il carico applicato e l'allungamento all'intradosso del provino inflesso è di fondamentale importanza per valutare l'efficacia delle fibre riciclate. Nello specifico, la misura di tale deformazione permette di quantificare l'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale, come osservabile nel diagramma di seguito riportato:

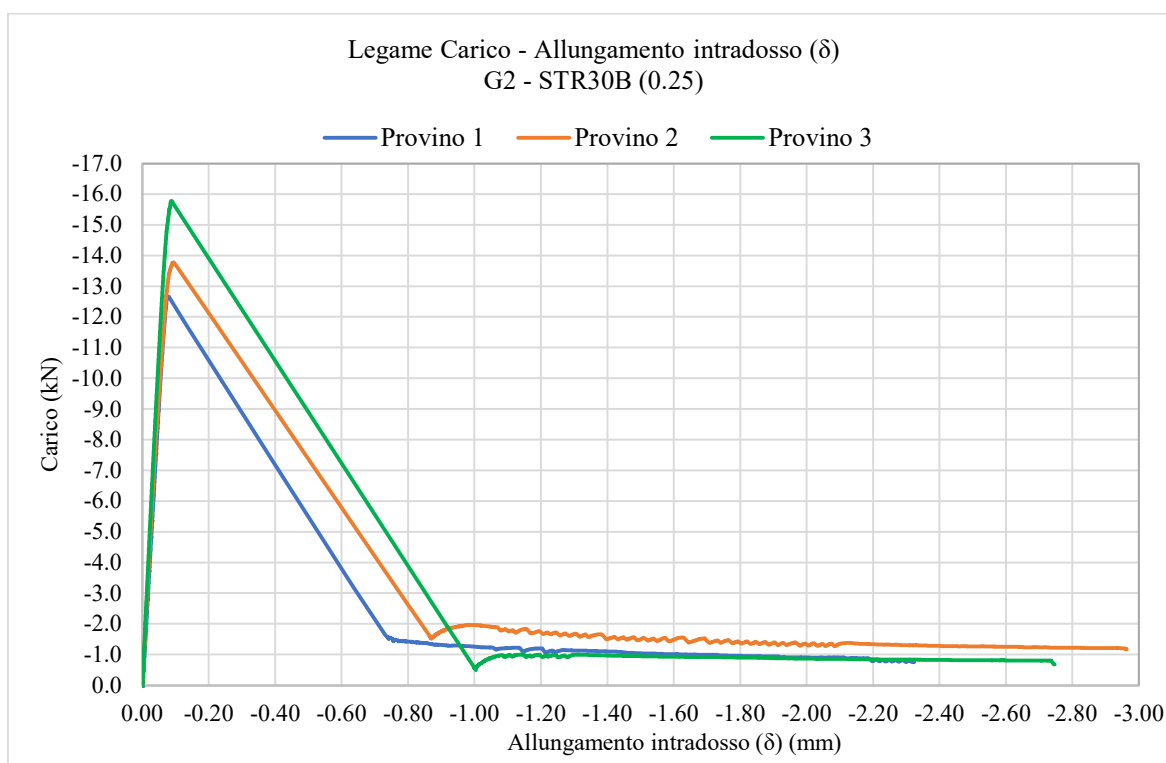


Figura 8-64: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

Di fondamentale importanza per definire l'efficacia delle fibre e caratterizzare il calcestruzzo fibrorinforzato testato è la correlazione tra lo sforzo generato nella sezione e l'allungamento all'intradosso. Nello specifico, in accordo con le prescrizioni normative [2], i parametri prestazionali di riferimento sono le resistenze

residue valutate in corrispondenza di un'apertura della fessura (CMOD) pari a 0.5 mm e 2.5 mm. Tali valori sono identificati, rispettivamente, dalle sigle $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$. Di seguito (fig. 8-58) è riportata la curva che mostra il legame tra sforzo e allungamento all'intradosso per ognuno dei tre provini, sulla quale sono individuabili i punti relativi ai valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$.

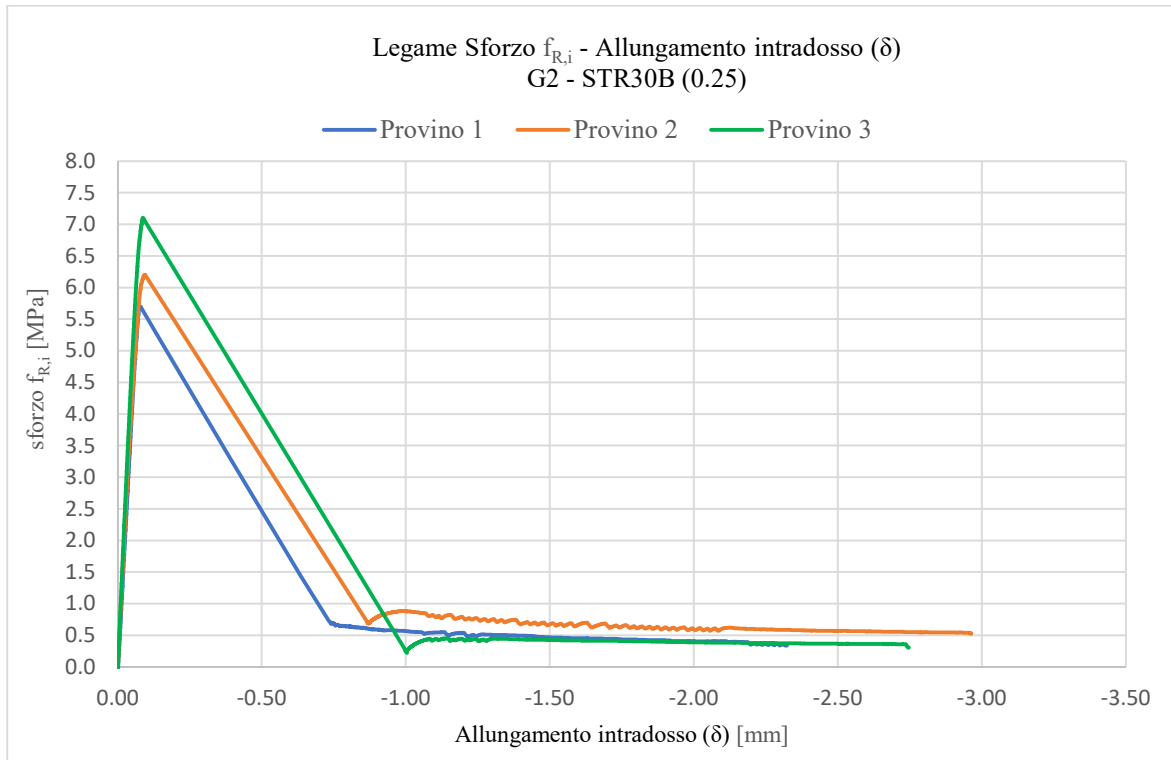


Figura 8-65: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

Anche in questo caso, si riporta l'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

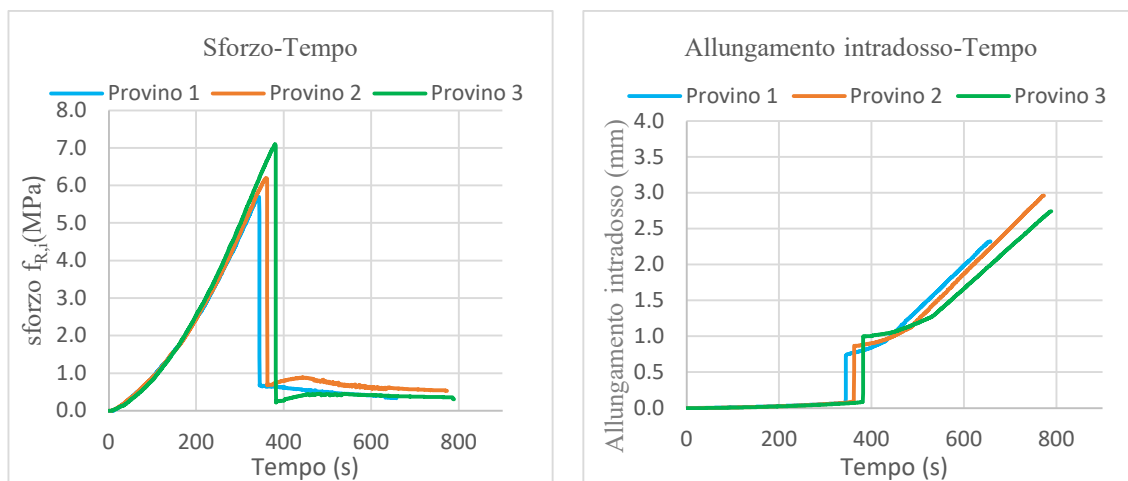


Figura 8-66: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G2-STR30B(0.25)

Pertanto, l'analisi delle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame ha permesso di determinare i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G2-STR30B [0.25%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	2.43	0.34
Provino 2	3.36	0.57
Provino 3	4.05	0.36
Valori medi	3.28	0.42

Tabella 8-26: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G2-STR30B (0.25)

8.5.3 Campioni serie "G3 - STR30B (0.50)"

I provini della serie G3 - STR30B (0.50) presentano un rinforzo fibroso costituito da fibre lunghe 30 mm ottenute dal taglio di corde da tennis riciclate. Nello specifico, sono state impiegate corde STR 1 - Black adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. Per tali campioni, così come per quelli della precedente serie, si è osservato un comportamento duttile attribuibile all'azione delle fibre, le quali garantiscono una resistenza residua post-picco riscontrabile anche nell'andamento dei digrammi di seguito riportati.

La serie G3 - STR30B (0.50) è composta da tre provini prismatici sottoposti a flessione, dei quali si riportano di seguito i risultati integrali. Il diagramma carico-freccia in mezzeria mostra che, dopo l'atteso calo di carico dovuto alla fessurazione della matrice, si sviluppa un tratto post-picco sostanzialmente costante. Questo andamento evidenzia il comportamento spiccatamente duttile garantito dalle fibre riciclate, le quali si attivano per contrastare l'apertura delle fessure. Parallelamente a tale curva, si riporta l'evoluzione temporale del carico e della freccia, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

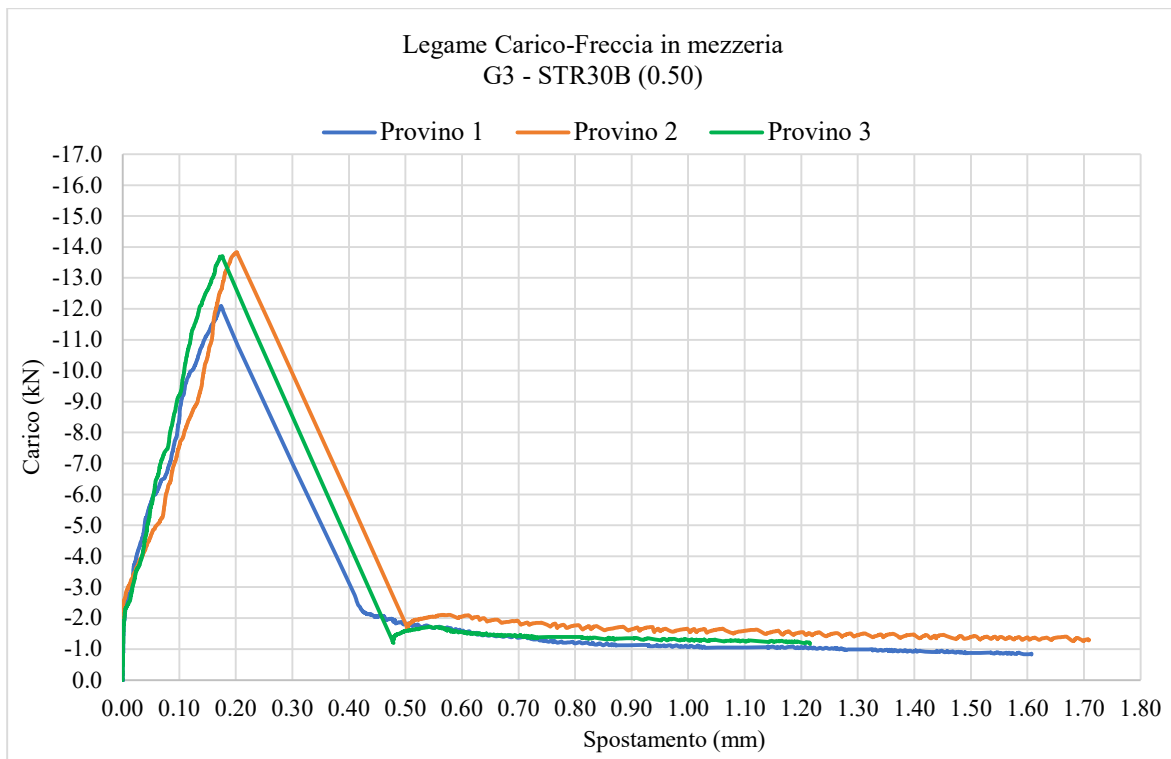


Figura 8-67: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G3-STR30B (0.50)

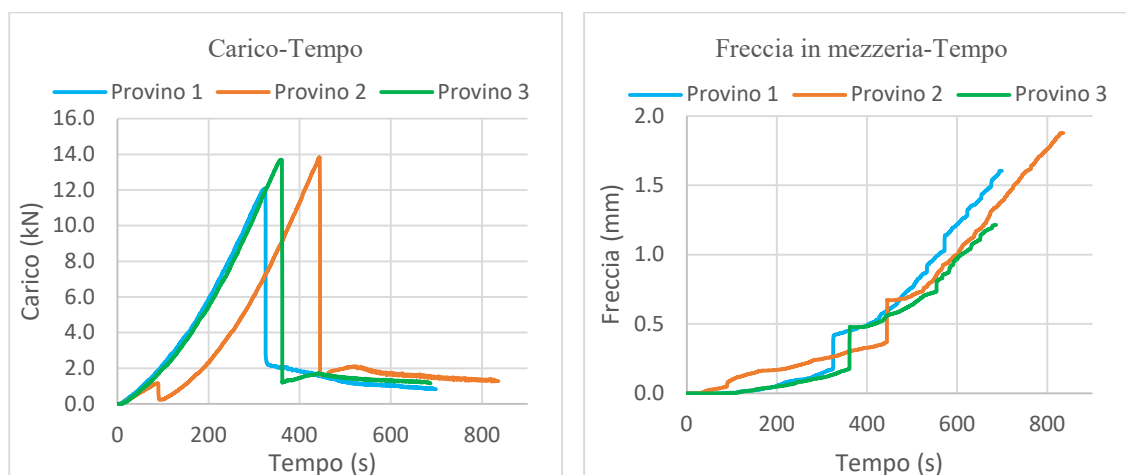


Figura 8-68: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G3-STR30B (0.50)

L'analisi dei diagrammi permette di valutare accuratamente il carico di prima fessurazione. In questo caso, i risultati sperimentali denotano una ridotta variabilità del carico di picco tra i tre provini, il cui valore medio non si discosta in maniera significativa da quello misurato per i campioni di riferimento in calcestruzzo non rinforzato.

Miscela di prova	G3-STR30B [0.50%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	12.10	13.84	13.71
$F_{max,medio}$ [kN]	13.21		

Tabella 8-27: valori del carico di picco dei campioni della serie G3-STR30B (0.50)

La correlazione tra il carico applicato e l'allungamento all'intradosso del provino inflesso permette di quantificare l'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale, come osservabile nel diagramma di seguito riportato:

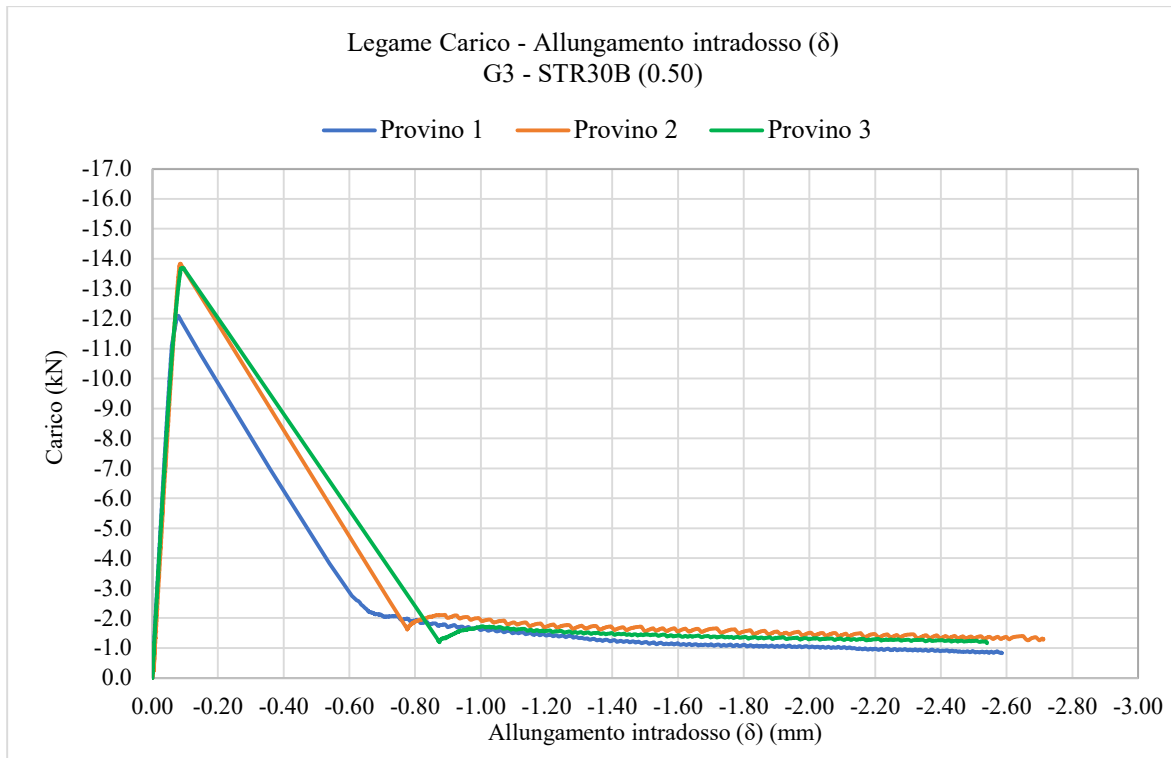


Figura 8-69: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

Anche in questo caso, si riporta l'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

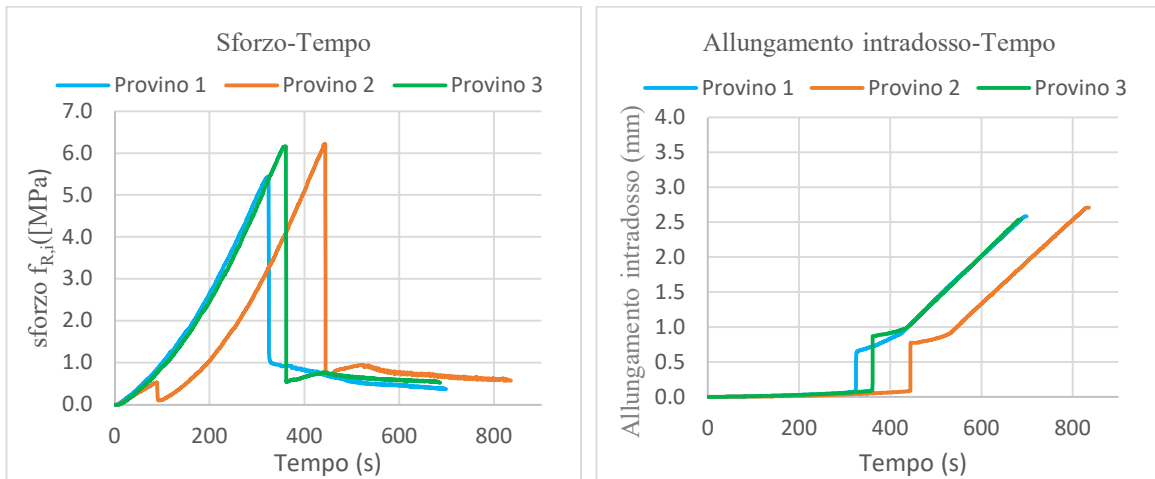


Figura 8-70: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G3-STR30B(0.50)

Di fondamentale importanza per definire l'efficacia delle fibre e caratterizzare il calcestruzzo fibrorinforzato testato è la correlazione tra lo sforzo generato nella sezione e l'allungamento all'intradosso, specialmente in corrispondenza di un'apertura della fessura (CMOD) pari a 0.5 mm e 2.5 mm.

Di seguito (fig. 8-61) è riportata la curva che mostra il legame tra sforzo e allungamento all'intradosso per ognuno dei tre provini e su di essa sono individuati i punti relativi ai valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$.

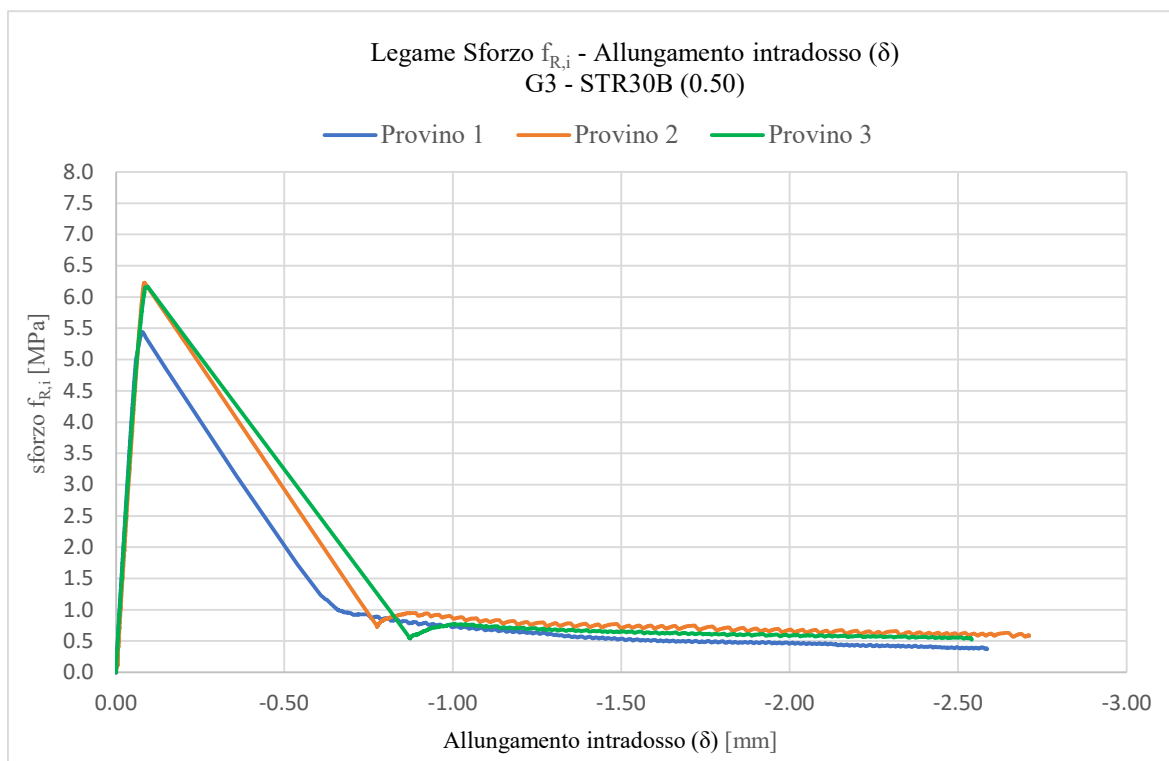


Figura 8-71: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

Pertanto, l'analisi delle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame ha permesso di determinare i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G3-STR30B [0.50%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	1.92	0.39
Provino 2	2.83	0.59
Provino 3	3.37	0.55
Valori medi	2.70	0.51

Tabella 8-28: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G3-STR30B (0.50)

8.5.4 Campioni serie "G4 - STR30B (1.00)"

La serie G4 - STR30B (1.00) comprende tre provini prismatici testati a flessione, realizzati con una matrice cementizia rinforzata con fibre da 30 mm derivanti dal taglio di corde STR 1 - Black. Come indicato dalla nomenclatura, questa serie è caratterizzata dal massimo dosaggio di fibre riciclate, pari all'1.00% in peso. L'elevato quantitativo di fibre riciclate ha conferito ai campioni un marcato comportamento duttile, come si evince chiaramente dai diagrammi sottostanti. Il rinforzo fibroso agisce in fase post-fessurativa garantendo una notevole riserva di resistenza che consente al provino di sopportare carichi elevati anche a fronte di ampi allungamenti all'intradosso. Si è tuttavia osservata una riduzione del carico di picco rispetto ai dosaggi minori, imputabile all'elevata densità di fibre che penalizza parzialmente la resistenza massima della matrice, ma che al contempo permette al campione di resistere efficacemente anche dopo la formazione della prima fessura.

Il diagramma carico-freccia in mezzeria mostra infatti che, successivamente all'atteso calo di carico dovuto alla fessurazione del calcestruzzo, si sviluppa un tratto post-picco costante su livelli di forza significativi. Ad integrazione di questa curva, vengono illustrati gli andamenti del carico e della freccia in funzione del tempo, permettendo così di valutare l'effettivo andamento della prova.

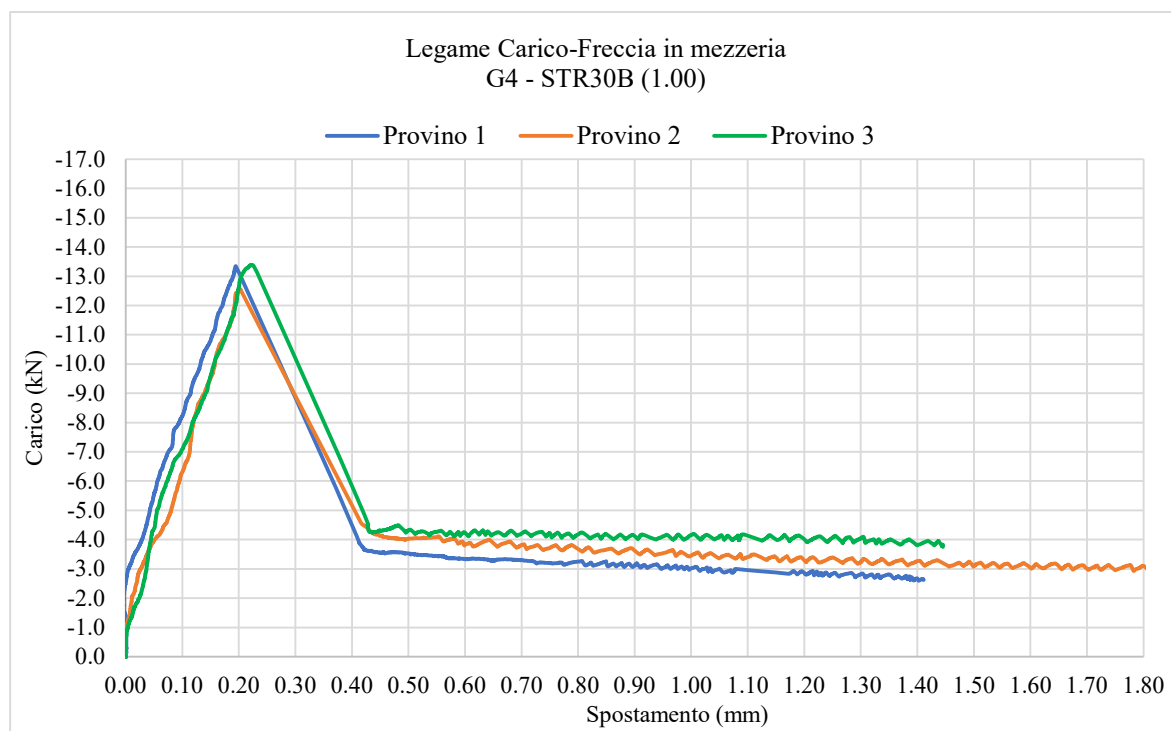


Figura 8-72: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G4-STR30B (1.00)

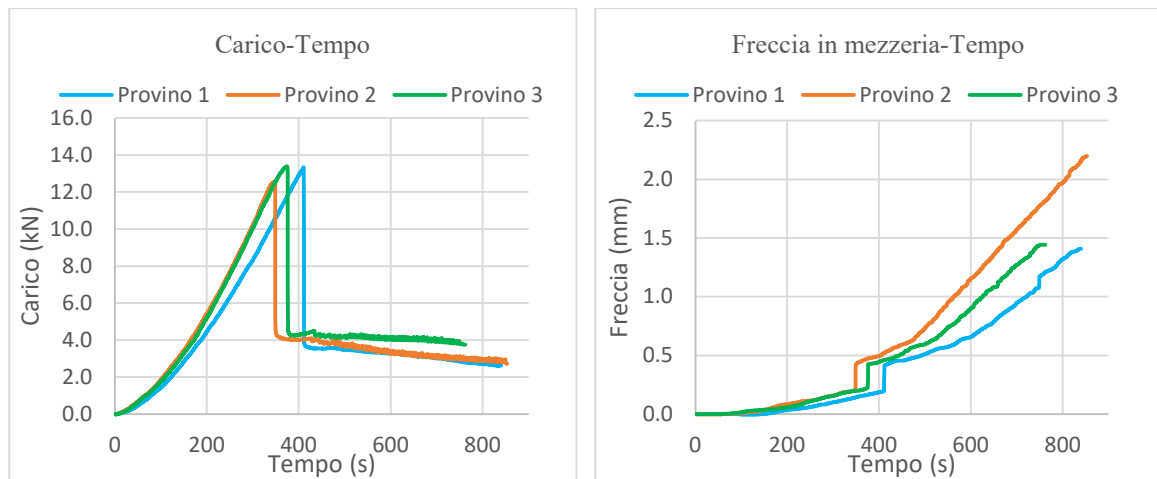


Figura 8-73: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G4-STR30B (1.00)

In questo caso, i risultati sperimentali evidenziano una ridotta variabilità del carico di picco tra i tre provini. Il valore medio risulta superiore a quello dei campioni di riferimento in calcestruzzo non rinforzato, ma si mantiene comunque leggermente inferiore rispetto a quanto registrato per i provini con un minor dosaggio di fibre.

Miscela di prova	G4-STR30B [1.00%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	13.35	12.56	13.40
$F_{max,medio}$ [kN]	13.10		

Tabella 8-29: valori del carico di picco dei campioni della serie G4-STR30B (1.00)

La correlazione tra il carico applicato e l'allungamento all'intradosso del provino inflesso permette di quantificare l'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale, come osservabile nel diagramma di seguito riportato. A completamento dell'analisi, vengono riportate anche le curve relative all'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo durante la prova.

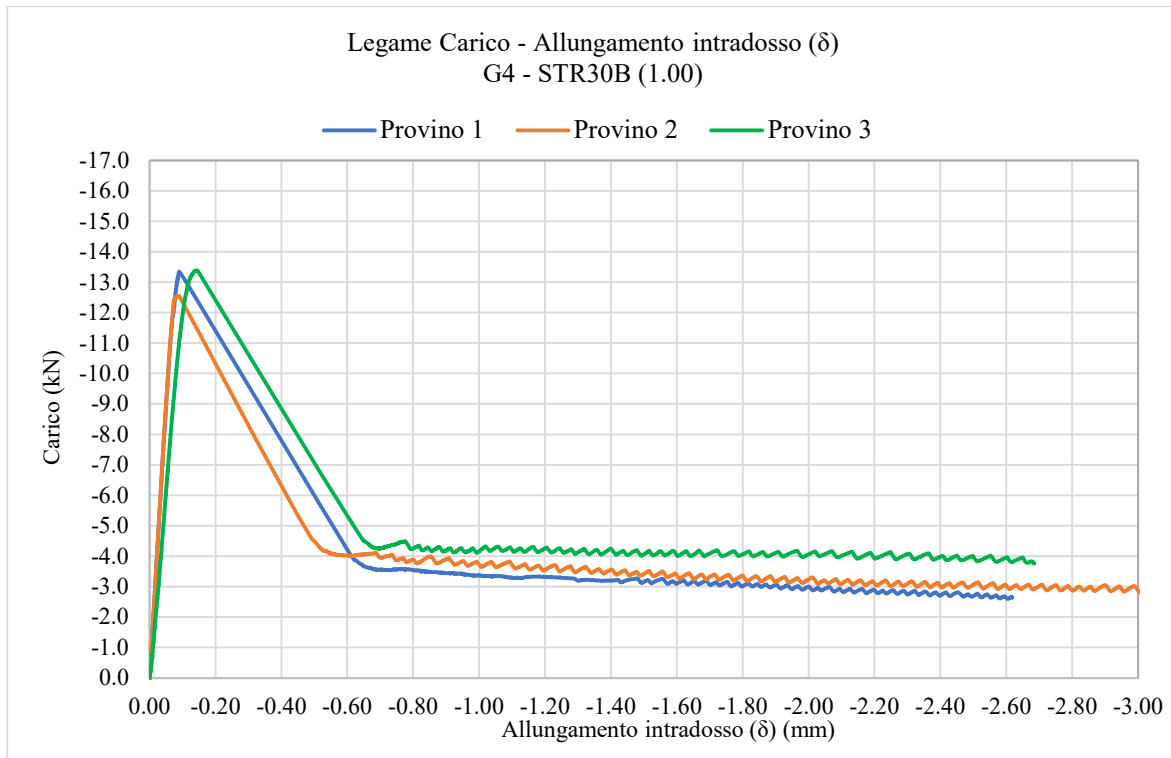


Figura 8-74: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

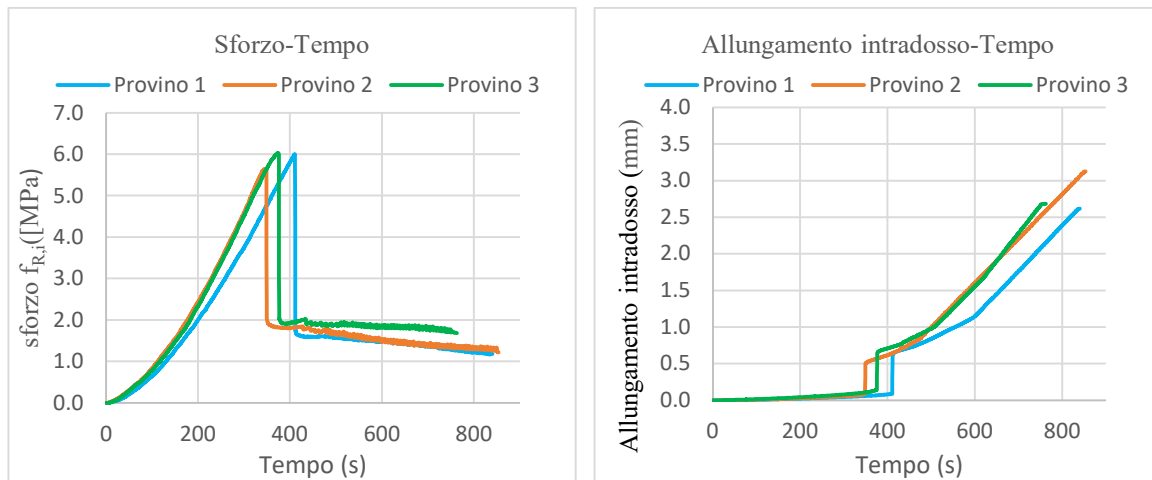


Figura 8-75: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G4-STR30B(1.00)

I test sui campioni con un dosaggio elevato, come in questo caso, consentono di apprezzare l'efficacia delle fibre da tennis riciclate tramite lo studio della correlazione tra lo sforzo generato nella sezione e l'allungamento all'intradosso, specialmente in corrispondenza di un'apertura della fessura (CMOD) pari a 0.5 mm e 2.5 mm. Di seguito è riportata la curva che mostra il legame tra sforzo e allungamento all'intradosso per ognuno dei tre provini e su di essa sono individuati i punti relativi ai valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$.

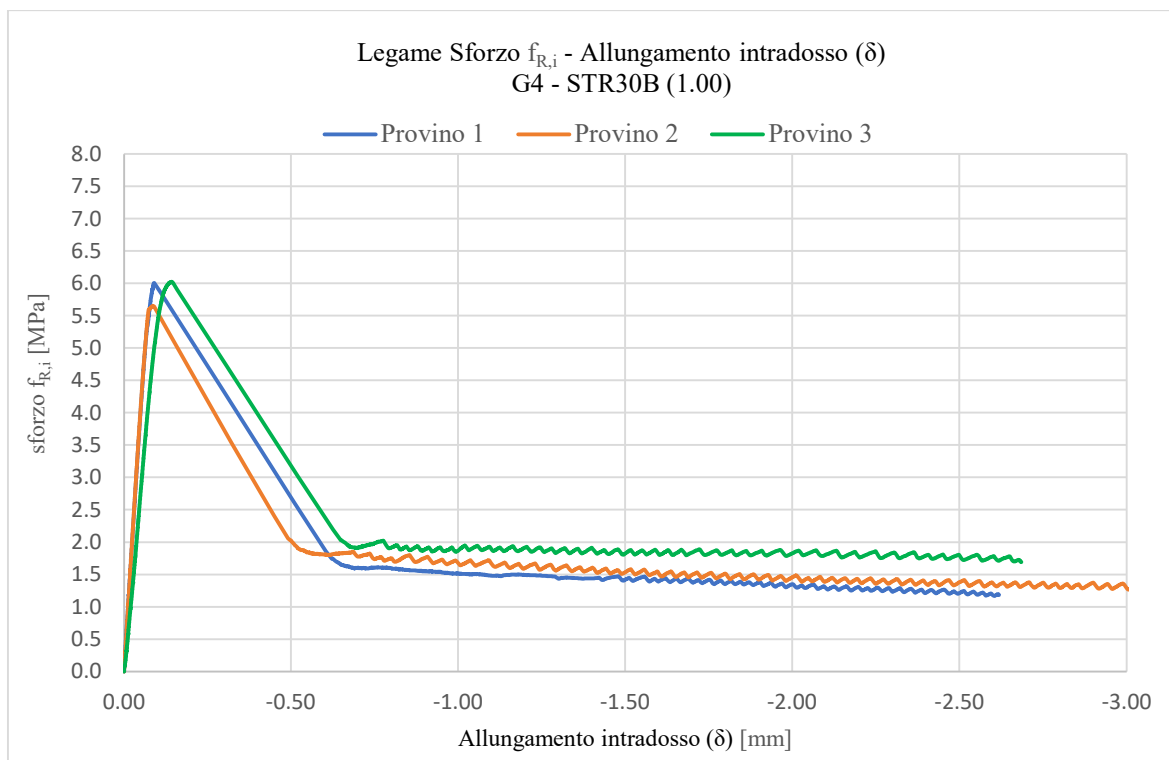


Figura 8-76: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

Pertanto, l'analisi delle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame ha permesso di determinare i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G4-STR30B [1.00%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	2.69	1.21
Provino 2	2.12	1.38
Provino 3	3.25	1.78
Valori medi	2.68	1.45

Tabella 8-30: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G4-STR30B (1.00)

8.5.5 Campioni serie "G5 – STR20B (0.25)"

I tre provini prismatici della serie G5 – STR20B (0.25) sono stati realizzati integrando nella matrice cementizia fibre da 20 mm, anch'esse ottenute dal taglio di corde per racchette da tennis di riciclo del tipo STR 1 - Black. Tali fibre da 20 millimetri sono state impiegate anche per produrre i campioni delle serie G6 e G7, variandone esclusivamente il dosaggio. Nello specifico, per la miscela in esame è stata adottata una concentrazione pari allo 0.25% in peso, come indicato dalla nomenclatura. Anche per questi campioni, rinforzati con fibre più corte e caratterizzati dal dosaggio minimo, si è osservato un comportamento duttile attribuibile all'azione del rinforzo fibroso, che garantisce una resistenza residua post-picco ben visibile nell'andamento dei diagrammi riportati di seguito. Tra questi, il grafico carico-freccia in mezzeria descrive la risposta del provino sottoposto a flessione, illustrando lo sviluppo di un tratto plastico in seguito all'innescio della fessurazione.

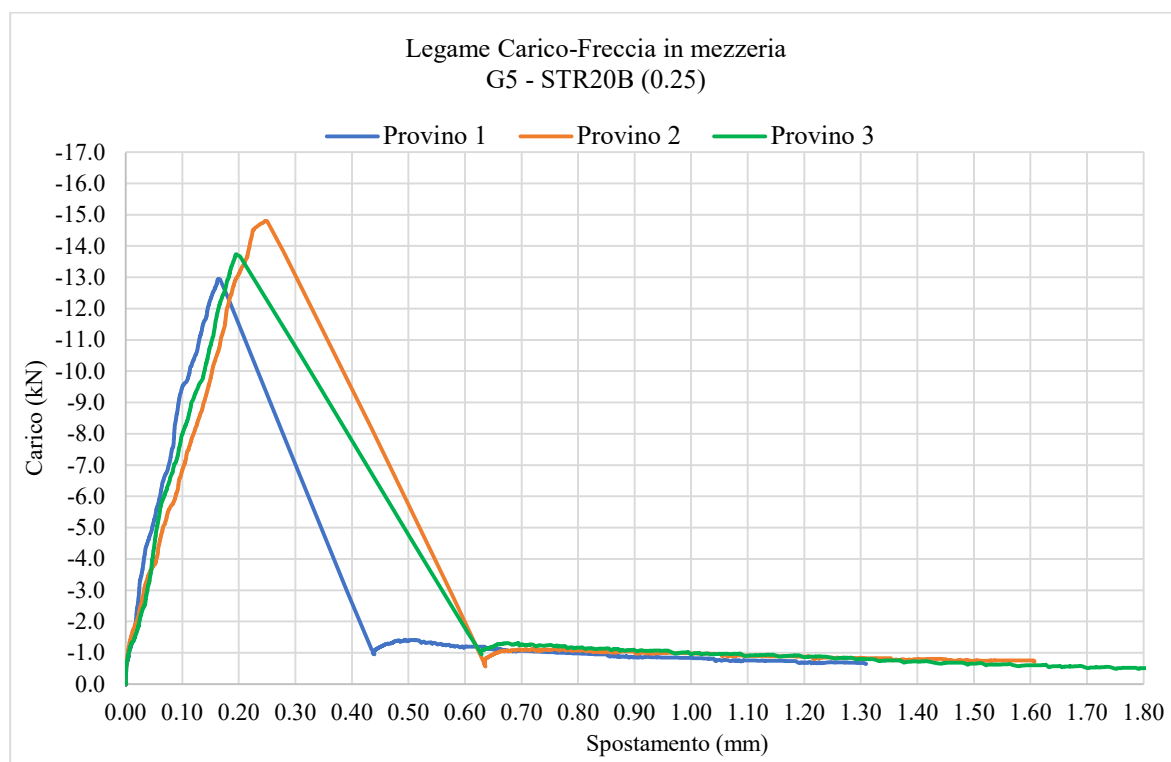


Figura 8-77: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G5-STR20B (0.25)

Ad integrazione di questa curva, vengono illustrati gli andamenti del carico e della freccia in funzione del tempo, permettendo così di valutare l'effettivo andamento della prova.

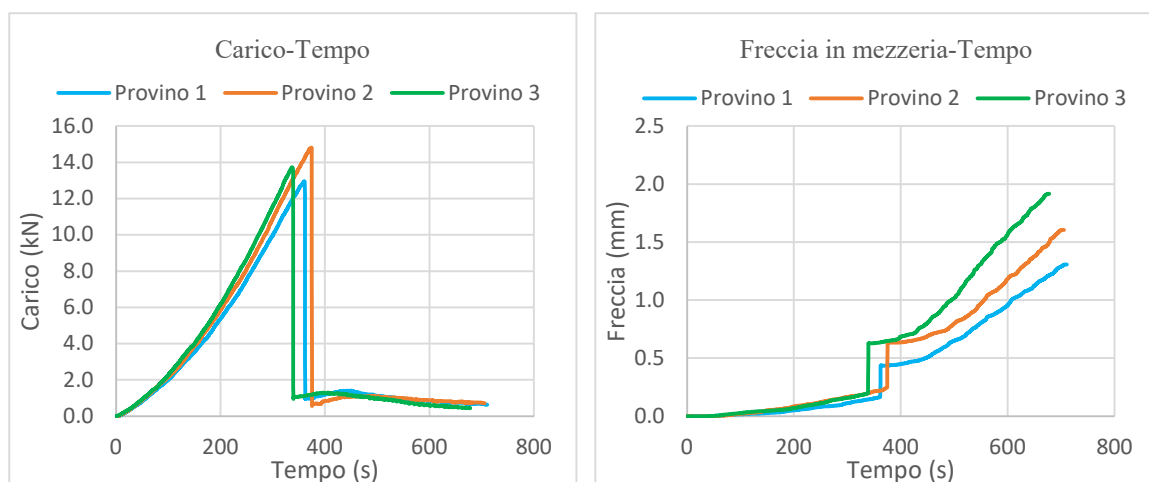


Figura 8-78: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G5-STR20B (0.25)

In questo caso, i risultati sperimentali mostrano una certa variabilità del carico di picco tra i tre provini, già osservata per i campioni di contenenti un uguale dosaggio di fibre di lunghezza maggiore. Nel complesso, il valore medio risulta maggiore rispetto a quello osservato per la miscela priva di fibre.

Miscela di prova	G5-STR20B [0.25%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	12.96	14.81	13.74
$F_{max,medio}$ [kN]	13.83		

Tabella 8-31: valori del carico di picco dei campioni della serie G5-STR20B (0.25)

L'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale è osservabile nel diagramma che mette in relazione il carico applicato con l'allungamento all'intradosso:

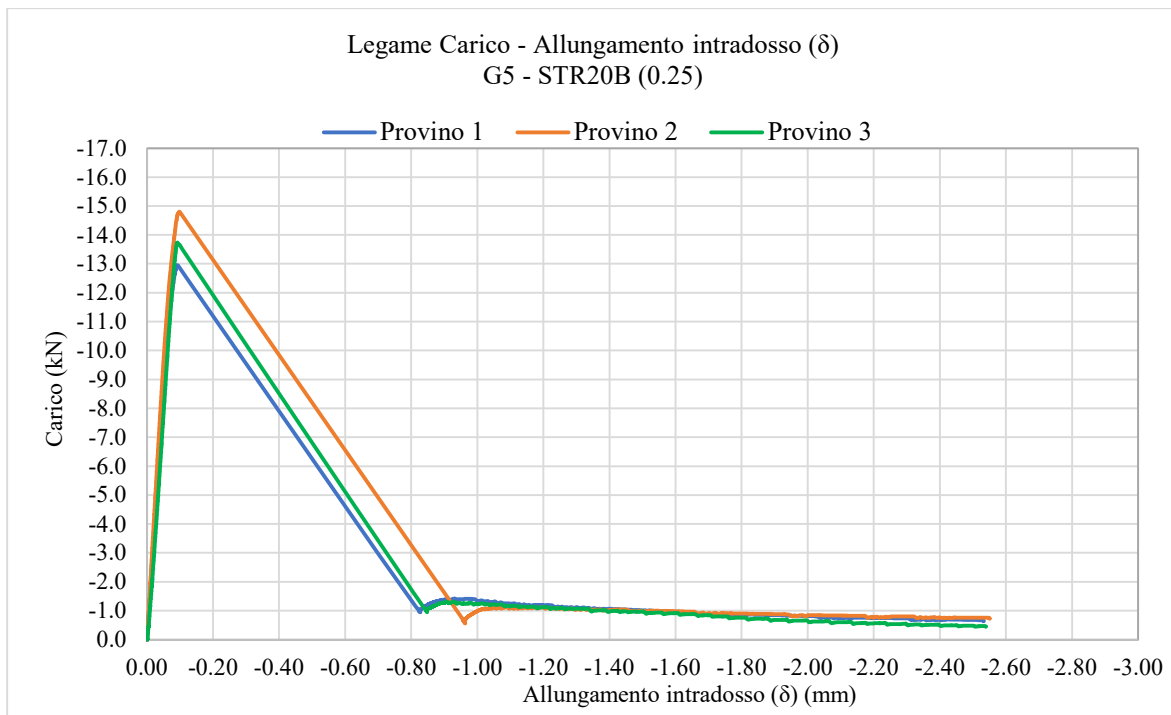


Figura 8-79: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

Di seguito si riporta la curva che mostra il legame tra sforzo e allungamento all'intradosso, sulla quale sono individuati i punti relativi ai valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ corrispondenti ad un valore di apertura della fessura pari rispettivamente a 0.5 mm e 2.5 mm.

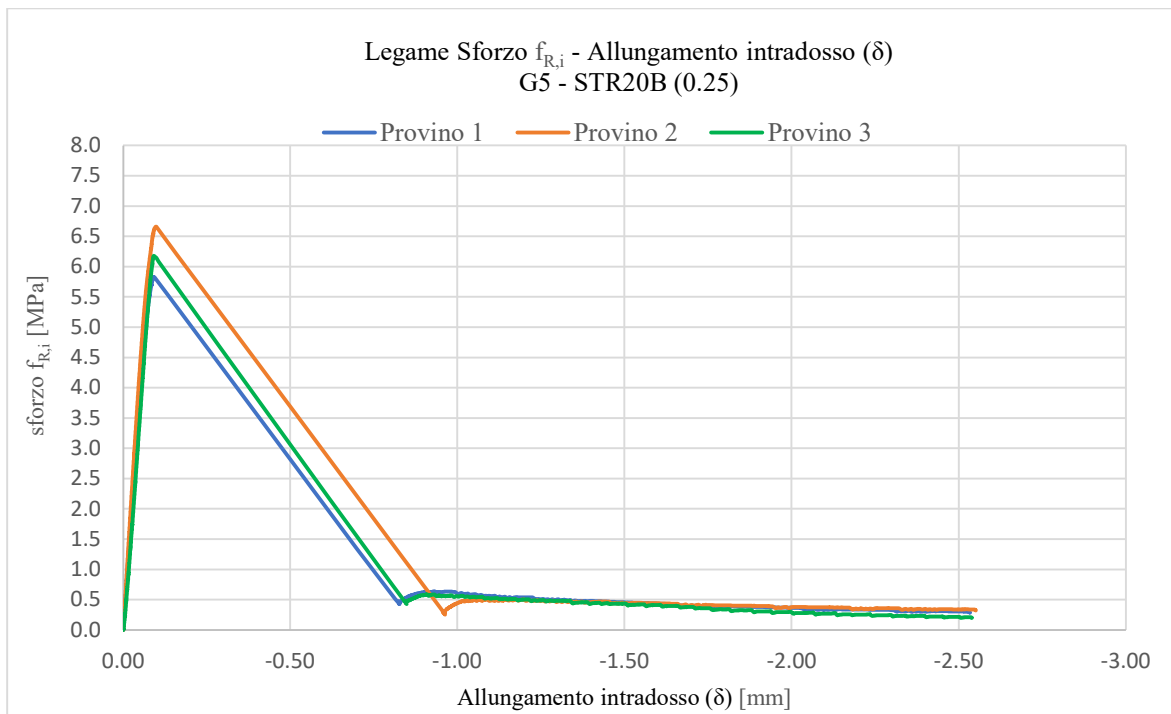


Figura 8-80: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

Anche in questo caso, si riporta l'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

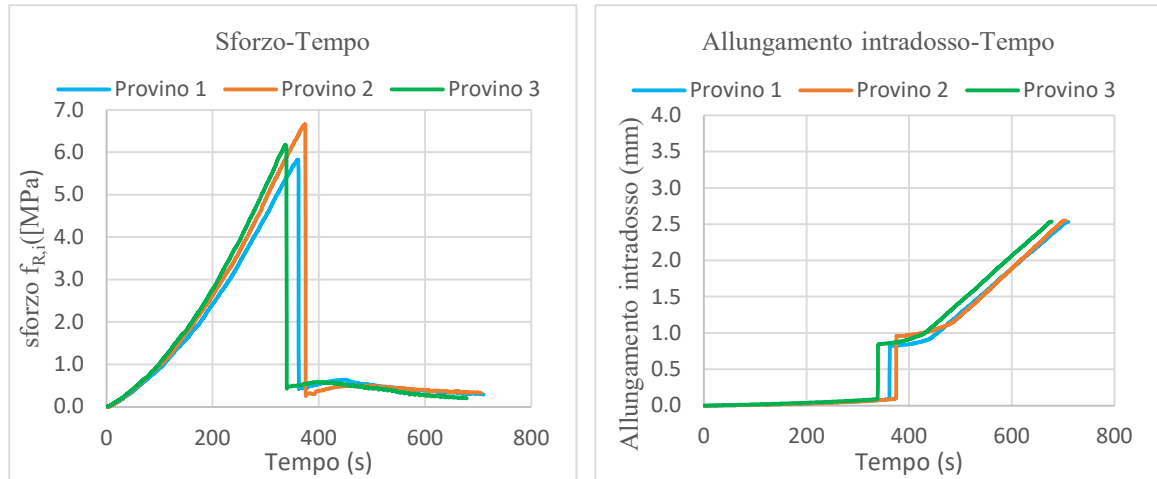


Figura 8-81: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G5-STR20B(0.25)

Pertanto, l'analisi delle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame ha permesso di determinare i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G5-STR20B [0.25%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	3.46	0.30
Provino 2	3.68	0.34
Provino 3	3.17	0.21
Valori medi	3.43	0.28

Tabella 8-32: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G5-STR20B (0.25)



Figura 8-82: distribuzione di fibre in corrispondenza della sezione di rottura di un campione con dosaggio 0.25% di fibre

8.5.6 Campioni serie "G6 – STR20B (0.50)"

I provini della serie G6 – STR20B (0.50) presentano un rinforzo fibroso costituito da fibre lunghe 20 mm ottenute dal taglio di corde da tennis riciclate. Nello specifico, sono state impiegate corde STR 1 - Black adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. Per tali campioni, così come per quelli delle altre serie, si è osservato un comportamento duttile attribuibile all'azione delle fibre. La serie G6 – STR20B (0.50) è composta da tre provini prismatici sottoposti a flessione, dei quali si riportano i risultati integrali. Di seguito si riporta il diagramma carico-freccia in mezzeria, dal quale si evince chiaramente lo sviluppo di un tratto plastico a seguito della fessurazione della matrice.

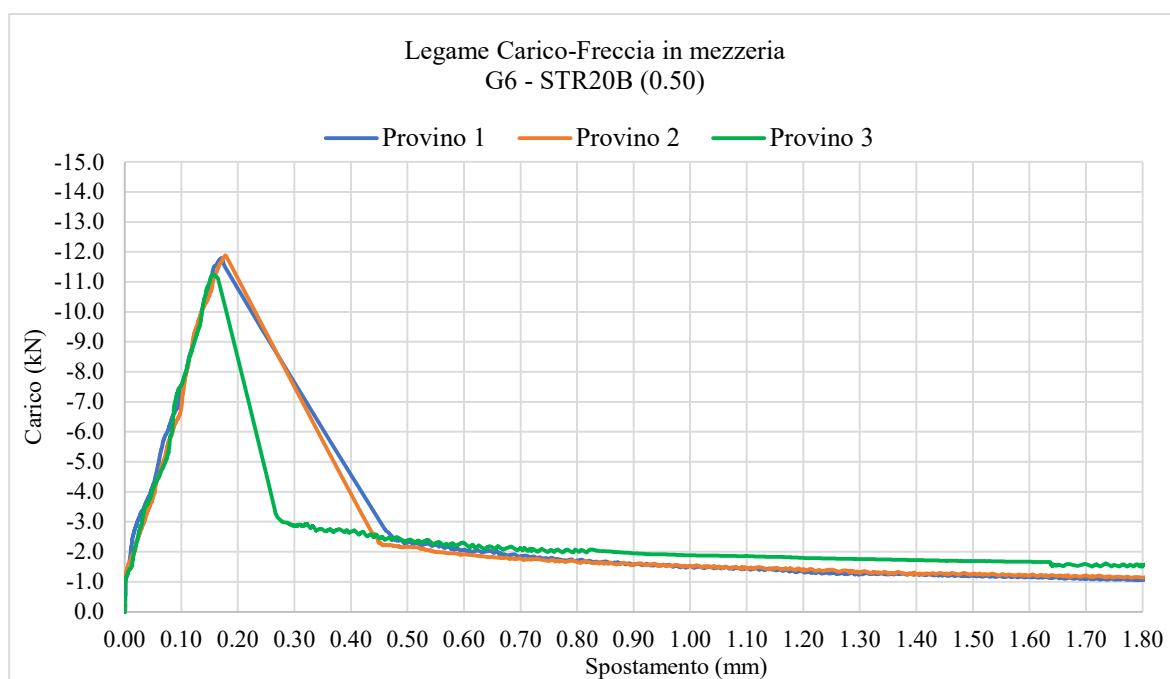


Figura 8-83: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G6-STR20B (0.50)

Il valore medio registrato risulta inferiore rispetto alle altre serie fibrorinforzate, e addirittura più basso di quello misurato per i campioni di riferimento in calcestruzzo non rinforzato.

Miscela di prova	G6-STR20B [0.50%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	11.79	11.89	11.26
$F_{max,medio}$ [kN]	11.64		

Tabella 8-33: valori del carico di picco dei campioni della serie G6-STR20B (0.50)

Parallelamente a tale curva, si riporta l'evoluzione temporale del carico e della freccia, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

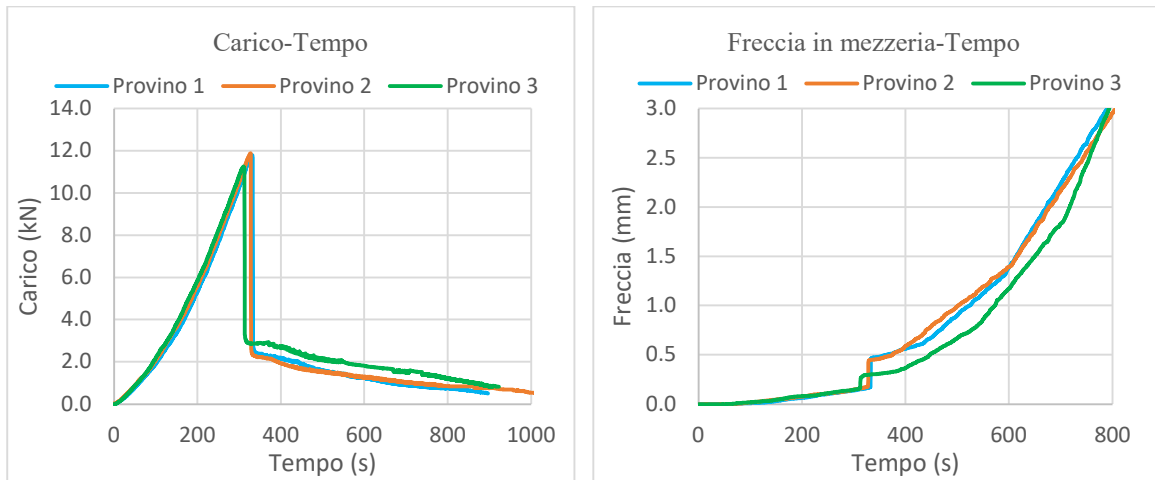


Figura 8-84: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G6-STR20B (0.50)

La correlazione tra il carico applicato e l'allungamento all'intradosso del provino inflesso permette di quantificare l'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale, come osservabile nel diagramma di seguito riportato:

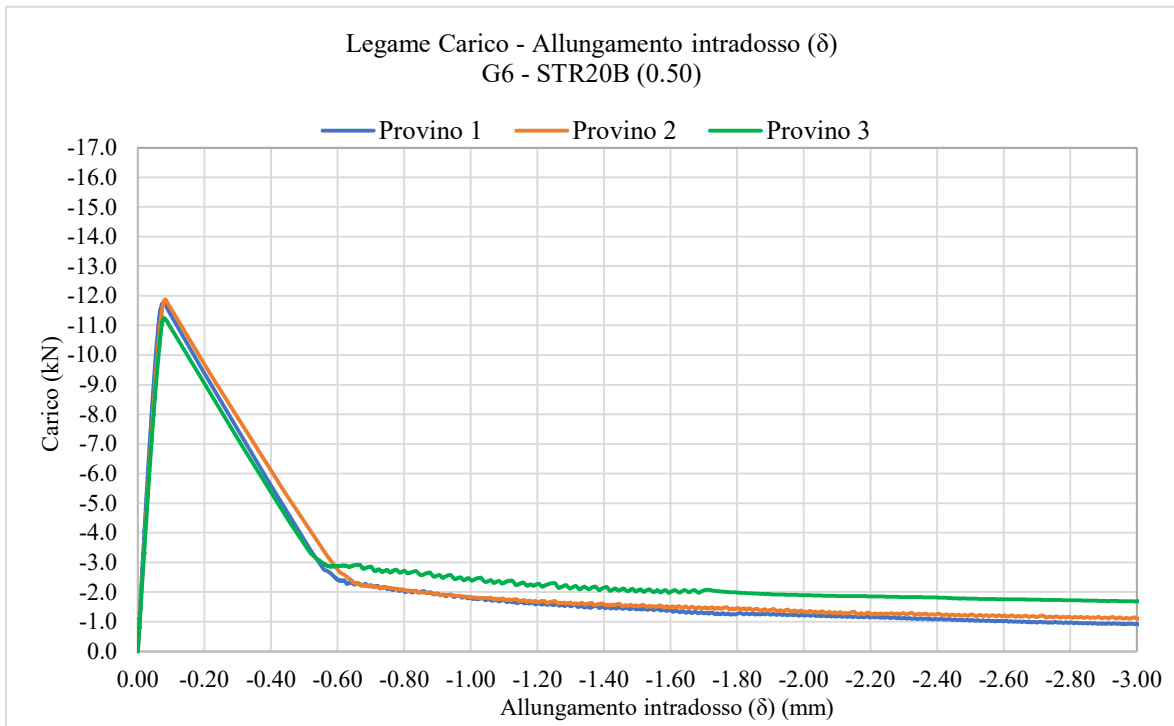


Figura 8-85: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

Al fine di valutare le prestazioni del rinforzo fibroso e qualificare il calcestruzzo testato, risulta essenziale analizzare la relazione tra le tensioni indotte nella sezione e le deformazioni all'intradosso. Nel grafico seguente (Fig. 8-70) viene illustrato l'andamento del legame tensione-allungamento per ciascuno dei tre campioni.

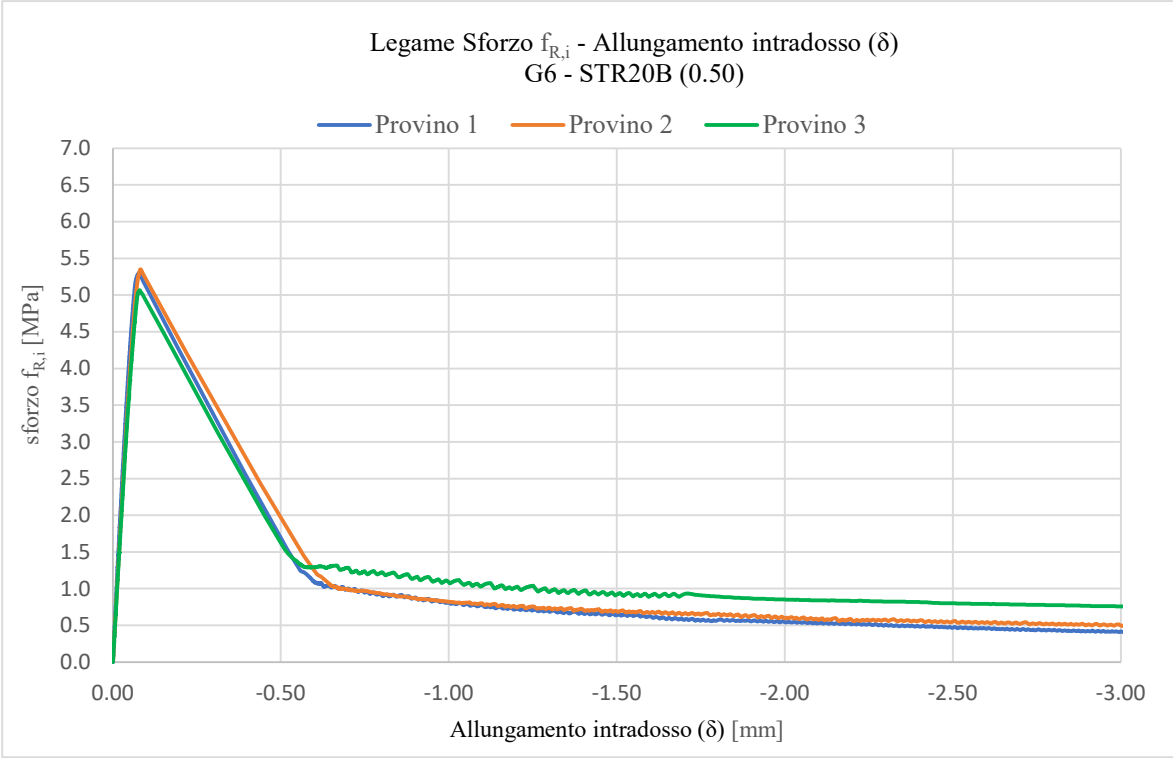


Figura 8-86: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

Anche in questo caso, si riporta l'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

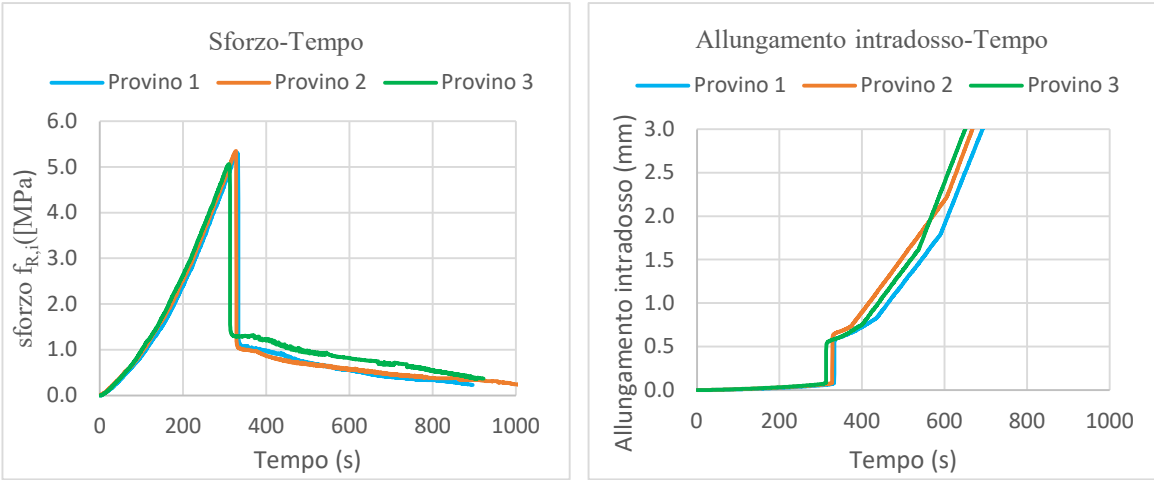


Figura 8-87: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G6-STR20B(0.50)

Pertanto, l'analisi delle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame ha permesso di determinare i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G6-STR20B [0.50%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	1.62	0.47
Provino 2	2.03	0.55
Provino 3	1.55	0.80
Valori medi	1.73	0.60

Tabella 8-34: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G6-STR20B (0.50)

8.5.7 Campioni serie "G7 – STR20B (1.00)"

La serie G7 – STR20B (1.00) comprende tre provini prismatici testati a flessione, realizzati con una matrice cementizia rinforzata con fibre da 20 mm derivanti dal taglio di corde STR 1 - Black. Come indicato dalla nomenclatura, questa serie è caratterizzata dal massimo dosaggio di fibre riciclate, pari all'1.00% in peso. L'elevato quantitativo di rinforzo fibroso ha conferito ai campioni un marcato comportamento duttile, come si evince chiaramente dai diagrammi sottostanti. Si è tuttavia osservata una riduzione del carico di picco rispetto ai dosaggi minori, imputabile all'elevata densità di fibre che penalizza parzialmente la resistenza massima della matrice. Il diagramma carico-freccia in mezzeria mostra che, in seguito all'atteso calo di carico dovuto alla fessurazione del calcestruzzo, si sviluppa un tratto post-picco costante su livelli di forza significativi.

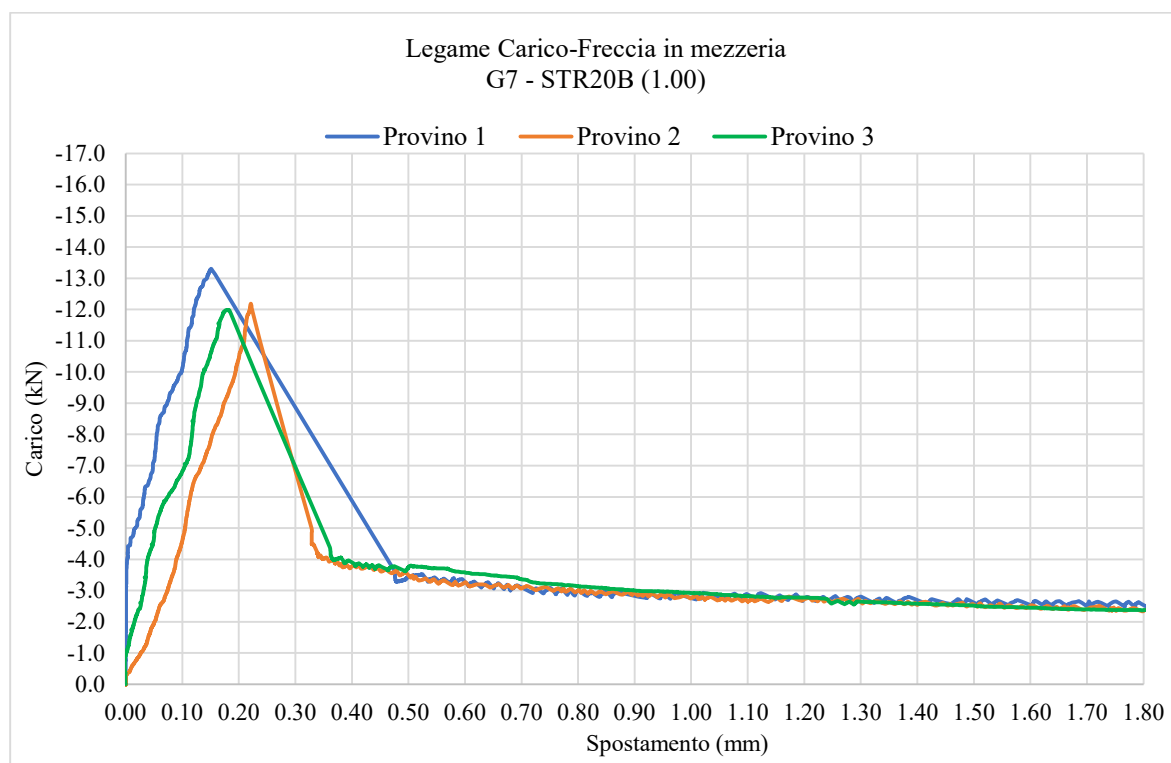


Figura 8-88: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G7-STR20B (1.00)

Ad integrazione di questa curva, vengono illustrati gli andamenti del carico e della freccia in funzione del tempo, permettendo così di valutare l'effettivo andamento della prova.

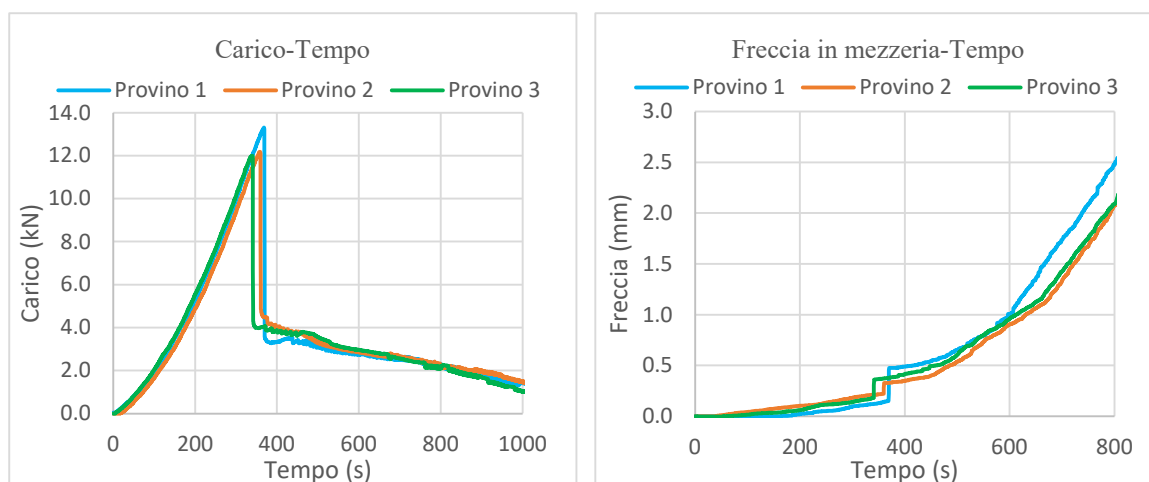


Figura 8-89: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G7-STR20B (1.00)

In questo caso, i risultati sperimentali evidenziano una ridotta variabilità del carico di picco tra i tre provini, il cui valore medio risulta in linea con quello riscontrato per i campioni di riferimento in calcestruzzo non rinforzato.

Miscela di prova	G7-STR20B [1.00%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	13.31	12.19	11.99
$F_{max,medio}$ [kN]	12.49		

Tabella 8-35: valori del carico di picco dei campioni della serie G7-STR20B (1.00)

Mettendo in relazione il carico applicato con l'allungamento all'intradosso del provino, è possibile misurare l'apertura della fessura di pari passo con la capacità portante residua del materiale, come evidenziato nella figura riportata di seguito:

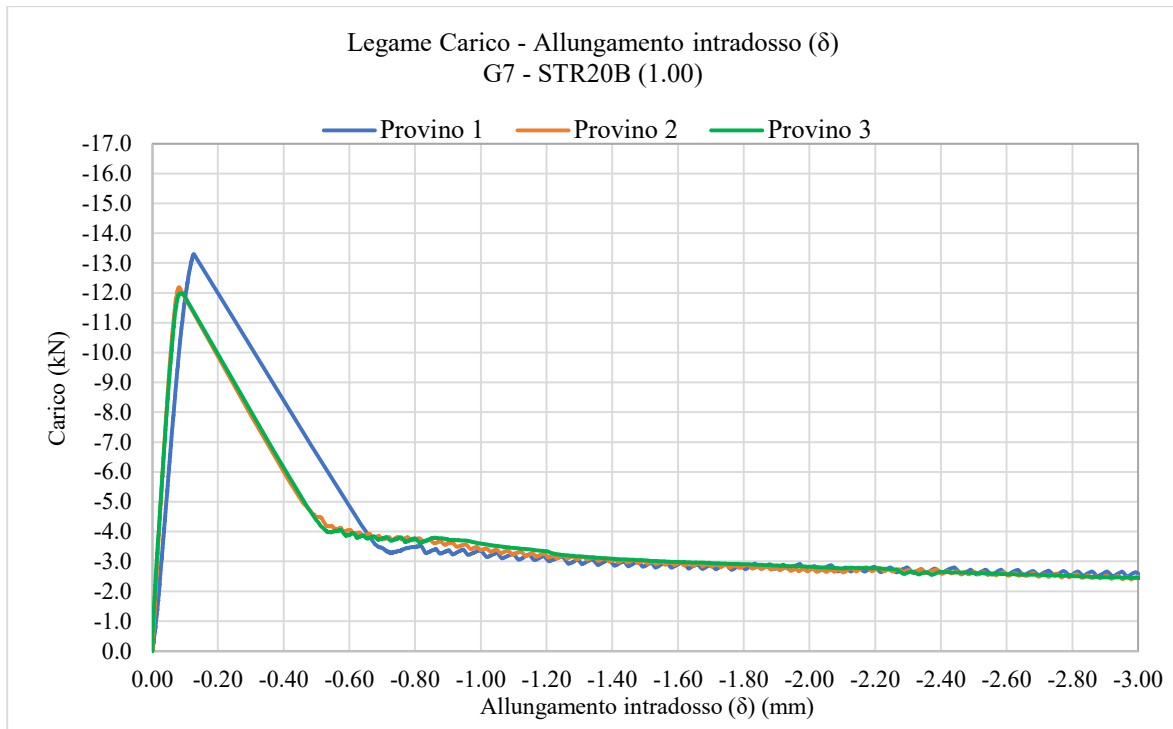


Figura 8-90: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

Di seguito si riporta la curva che mostra il legame tra sforzo e allungamento all'intradosso, sulla quale sono individuati i punti relativi ai valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, corrispondenti ad un valore di apertura della fessura pari rispettivamente a 0.5 mm e 2.5 mm.

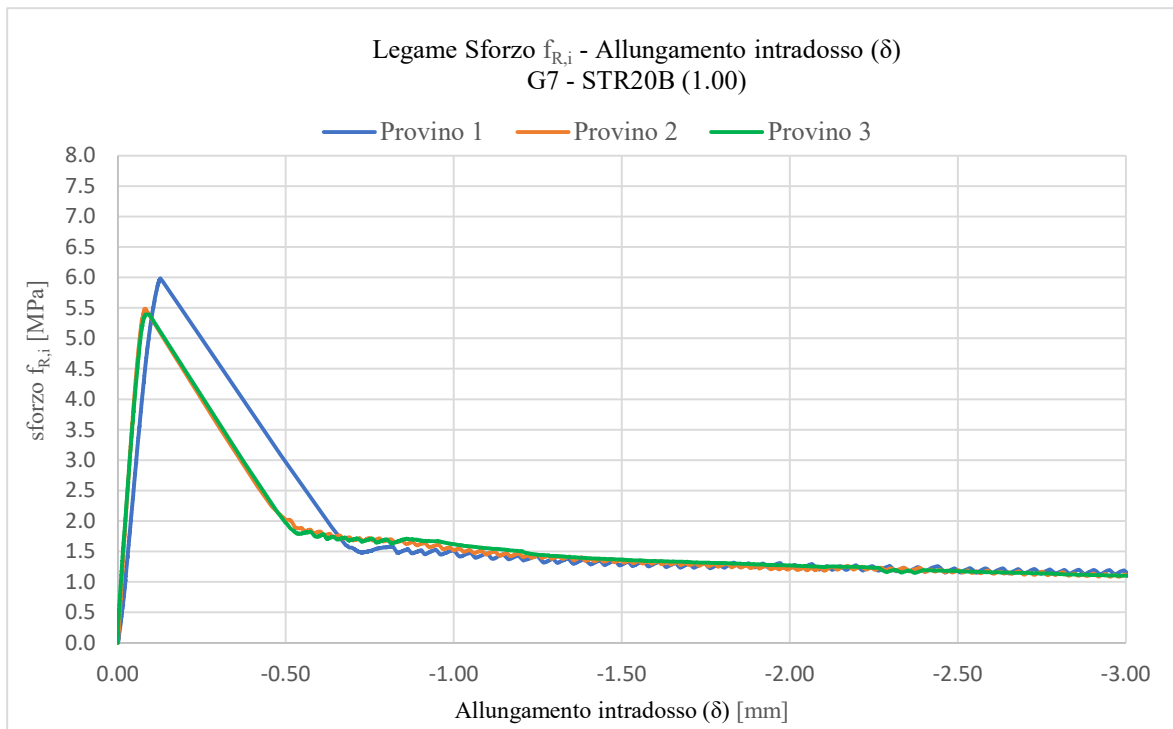


Figura 8-91: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

A completamento dell'analisi, vengono riportate anche le curve relative all'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo durante la prova.

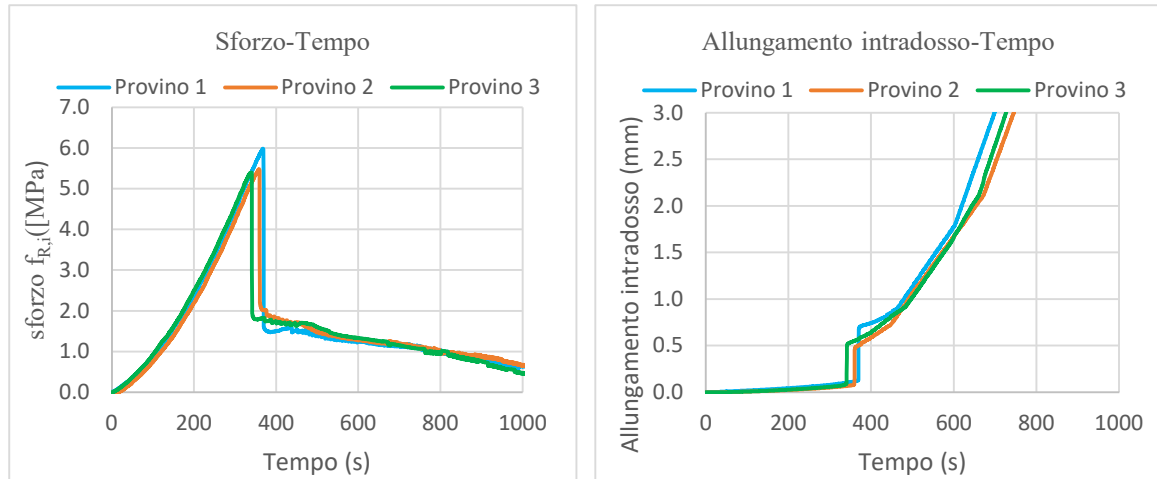


Figura 8-92: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G7-STR20B(1.00)

Dalle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame si sono individuati i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G7-STR20B [1.00%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	3.05	1.17
Provino 2	2.02	1.19
Provino 3	1.97	1.18
Valori medi	2.34	1.18

Tabella 8-36: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G7-STR20B (1.00)

8.5.8 Campioni serie "G8 - STR30M (0.25)"

Le ultime tre serie di campioni sono state realizzate con l'obiettivo di verificare se l'impiego di fibre ricavate da diverse tipologie di corde influenzi le prestazioni del materiale, attraverso un confronto diretto con le fibre standard, ricavate dalle corde STR 1 - Black e utilizzate in precedenza. Tali fibre sono state testate esclusivamente con una lunghezza di 30 mm, consentendo un confronto accurato con i risultati ottenuti dai campioni rinforzati tramite fibre standard con il medesimo dosaggio e lunghezza. Nello specifico, per la miscela in esame è stata adottata una concentrazione pari allo 0.25% in peso, come indicato dalla nomenclatura.

Anche per questi campioni, rinforzati con fibre miste e caratterizzati dal dosaggio minimo, si è osservato un comportamento duttile attribuibile all'azione del rinforzo fibroso, che garantisce una resistenza residua post-picco ben visibile nell'andamento dei diagrammi riportati di seguito. Tra questi, il grafico carico-freccia in mezzeria descrive la risposta del provino sottoposto a flessione, illustrando lo sviluppo di un tratto plastico in seguito all'innescio della fessurazione.

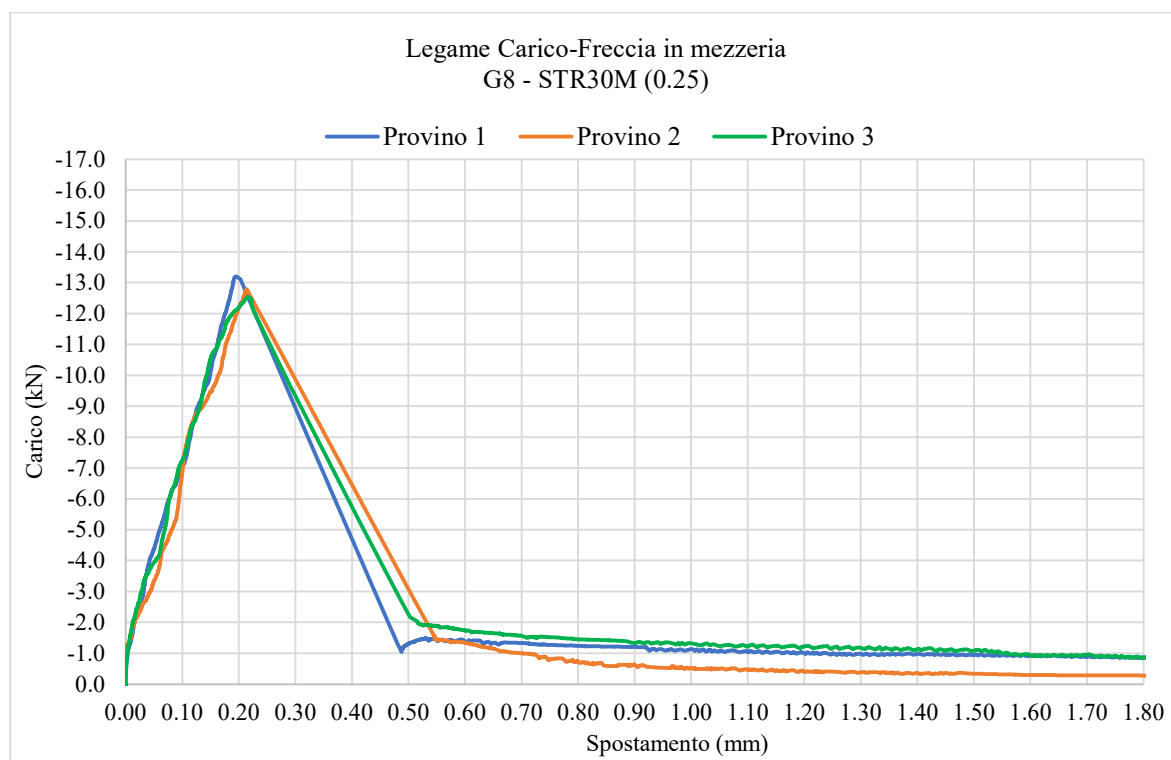


Figura 8-93: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G8-STR30M (0.25)

Ad integrazione di questa curva, vengono illustrati gli andamenti del carico e della freccia in funzione del tempo, permettendo così di valutare l'effettivo andamento della prova.

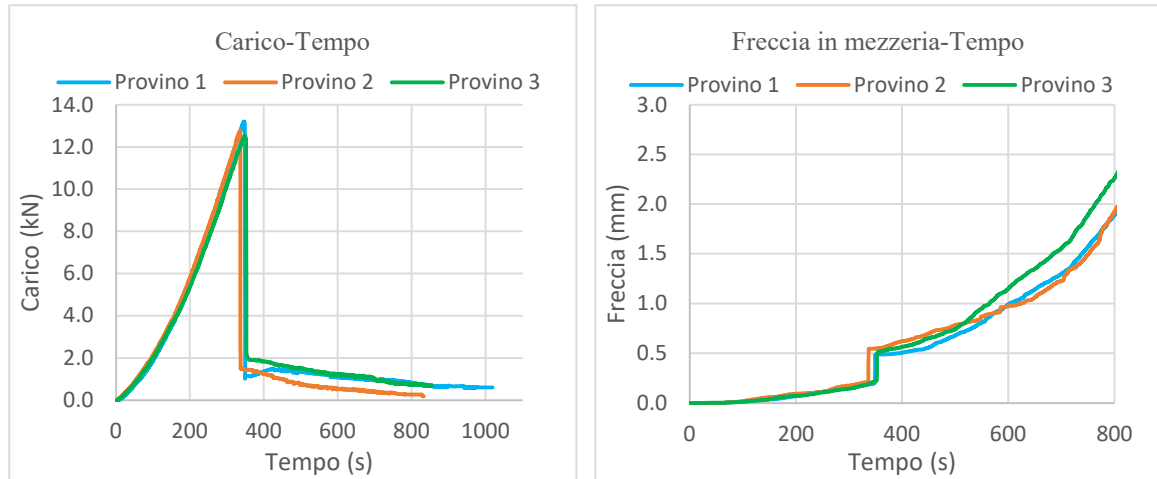


Figura 8-94: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G8-STR30M (0.25)

I risultati ottenuti evidenziano carichi di picco omogenei tra i tre provini, con un valor medio superiore rispetto a quello riscontrato per la miscela di riferimento.

Miscela di prova	G8-STR30M [0.25%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	13.21	12.79	12.54
$F_{max,medio}$ [kN]	12.84		

Tabella 8-37: valori del carico di picco dei campioni della serie G8-STR30M (0.25)

La correlazione tra il carico applicato e l'allungamento all'intradosso del provino inflesso permette di quantificare l'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale, come osservabile nel diagramma di seguito riportato:

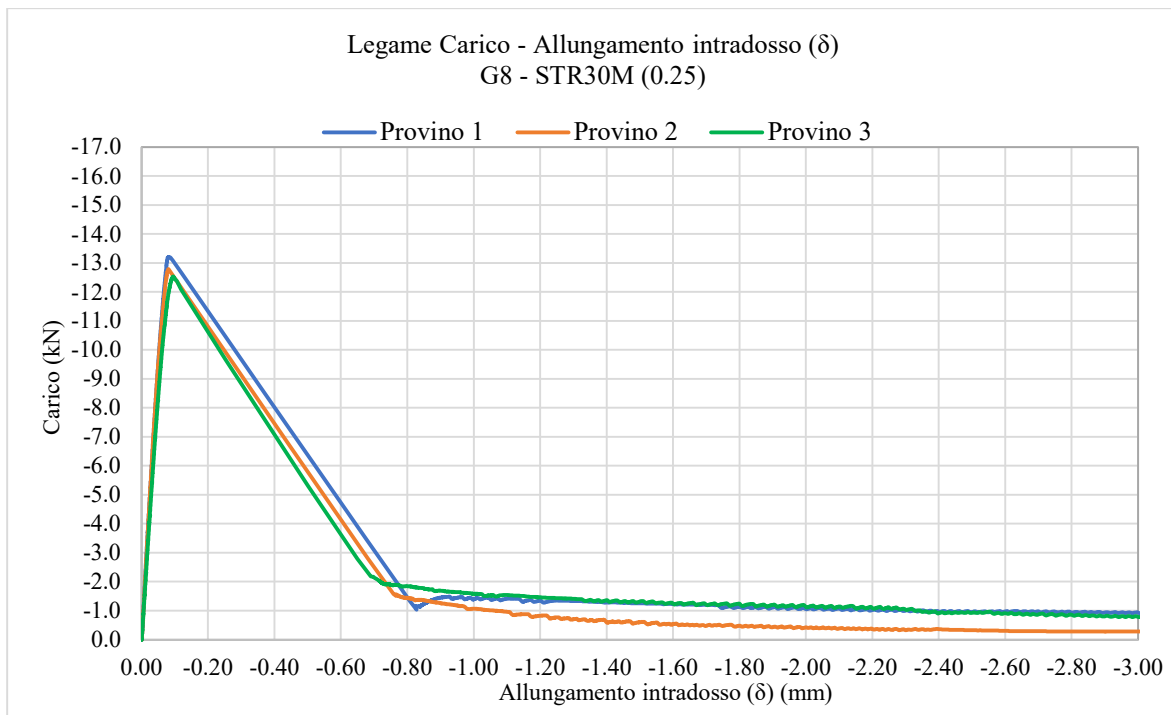


Figura 8-95: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

Di seguito si riporta la curva che mostra il legame tra sforzo e allungamento all'intradosso, sulla quale sono individuati i punti relativi ai valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ corrispondenti ad un valore di apertura della fessura pari rispettivamente a 0.5 mm e 2.5 mm.

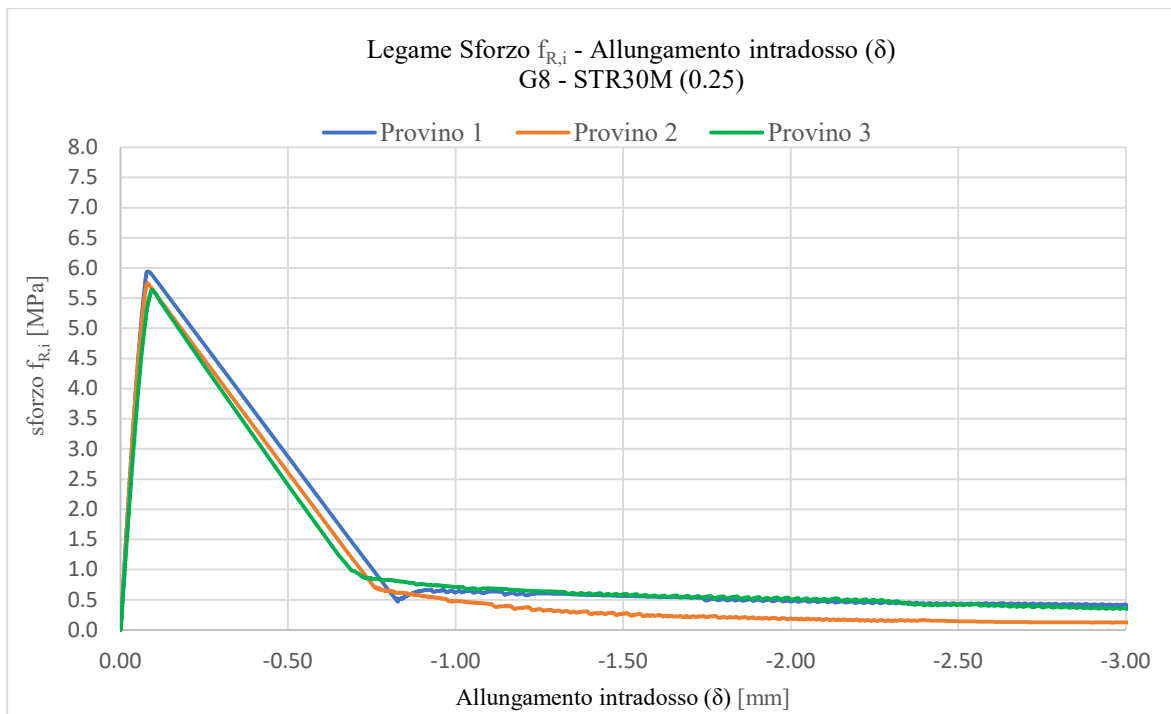


Figura 8-96: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

A completamento dell'analisi, vengono riportate anche le curve relative all'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo durante la prova.

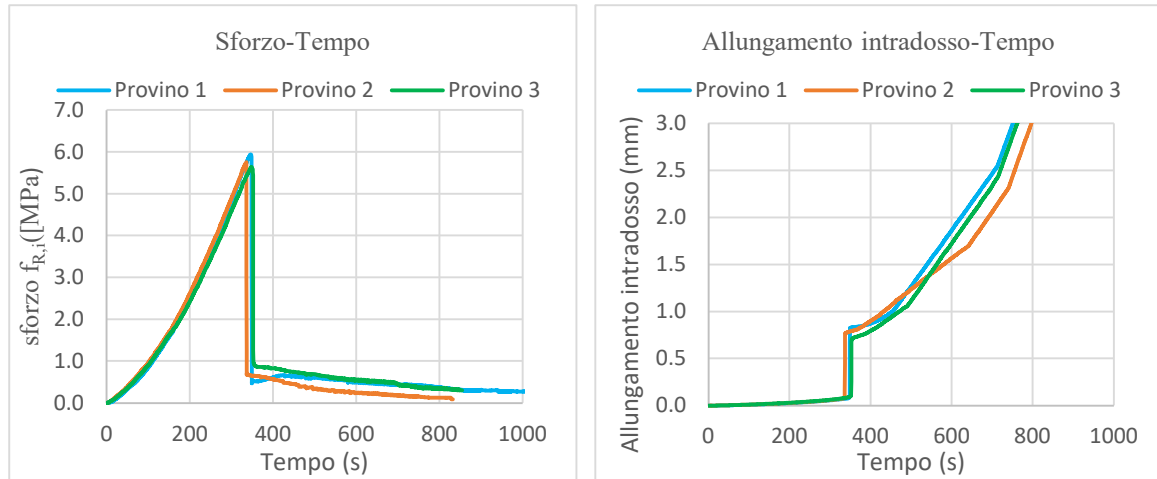


Figura 8-97: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G8-STR30M(0.25)

Dalle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame si sono individuati i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G8-STR30M [0.25%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	2.97	0.43
Provino 2	2.65	0.147
Provino 3	2.38	0.42
Valori medi	2.66	0.33

Tabella 8-38: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G8-STR30M (0.25)

8.5.9 Campioni serie "G9 - STR30M (0.50)"

I provini della serie G9 - STR30M (0.50) presentano un rinforzo fibroso costituito da fibre lunghe 30 mm ottenute dal taglio di corde da tennis riciclate di diversa tipologia. Esse sono state impiegate nella matrice cementizia adottando una concentrazione pari allo 0.50% in peso, come indicato dalla nomenclatura. La serie G9 - STR30M (0.50) è composta da tre provini prismatici sottoposti a flessione, dei quali si riportano i risultati integrali che consentono di rilevare il comportamento duttile attribuibile all'azione delle fibre.

Di seguito si riporta il diagramma carico-freccia in mezzeria, dal quale si evince chiaramente lo sviluppo di un tratto plastico a seguito della fessurazione della matrice.

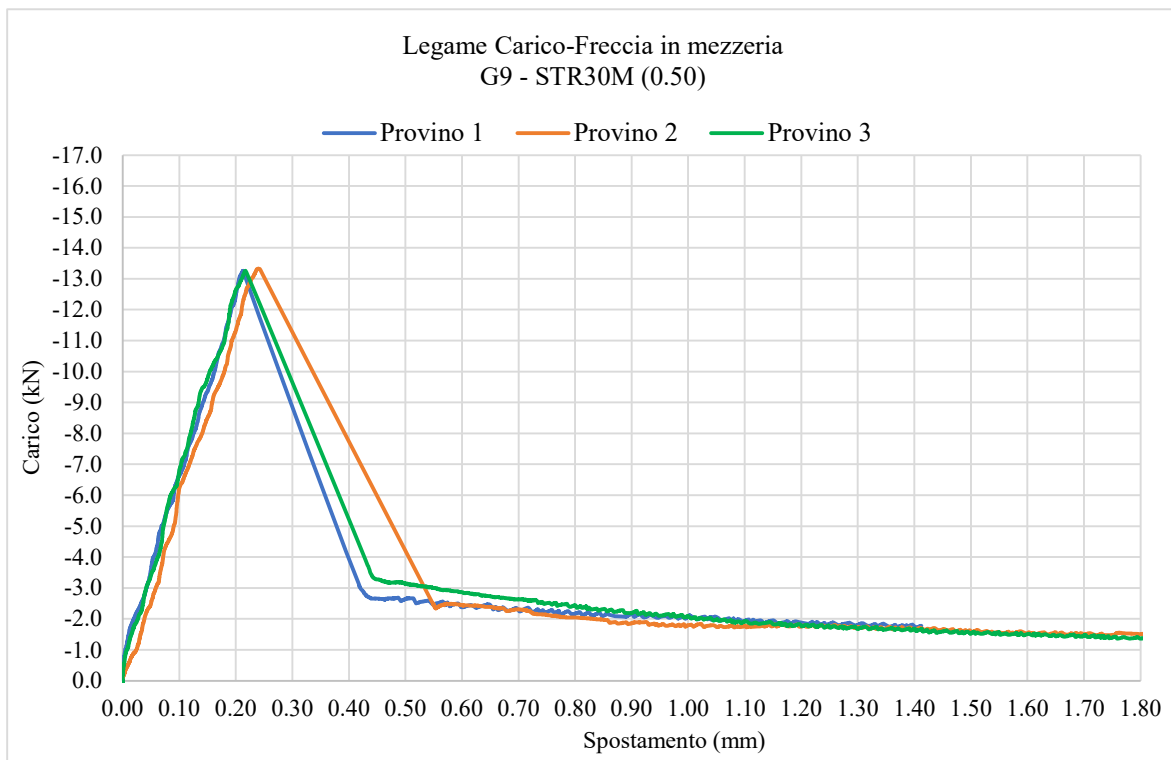


Figura 8-98: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G9-STR30M (0.50)

Ad integrazione della curva in figura 8-98, vengono illustrati gli andamenti del carico e della freccia in funzione del tempo, permettendo così di valutare l'effettivo andamento della prova.

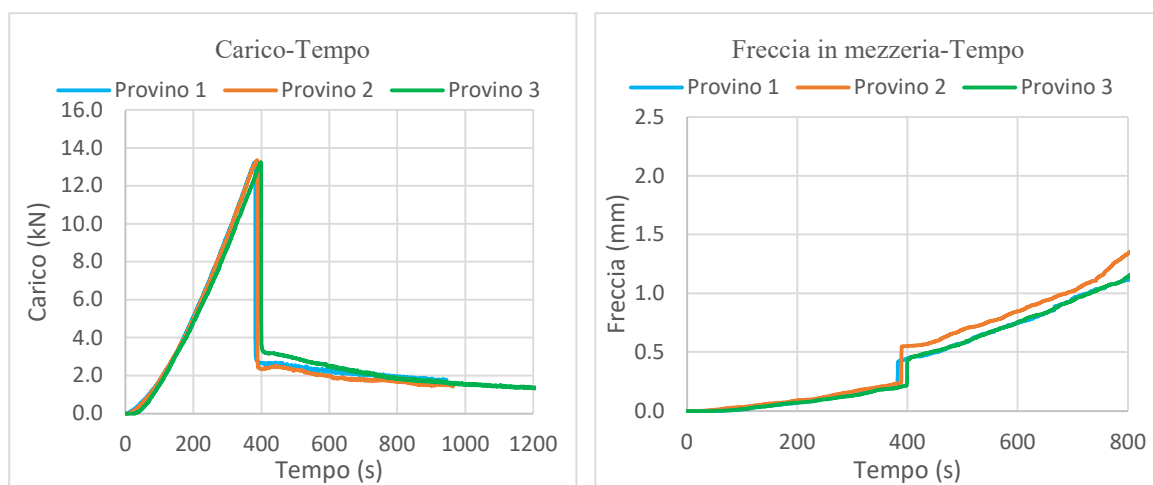


Figura 8-99: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G9-STR30M (0.50)

I risultati ottenuti evidenziano carichi di picco omogenei tra i tre provini. Il valore medio registrato risulta superiore sia rispetto alle altre serie fibrorinforzate, sia ai campioni di controllo in calcestruzzo non rinforzato.

Miscela di prova	G9-STR30M [0.50%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	13.26	13.34	13.26
$F_{max,medio}$ [kN]	13.28		

Tabella 8-39: valori del carico di picco dei campioni della serie G9-STR30M (0.50)

La correlazione tra il carico applicato e l'allungamento all'intradosso del provino inflesso permette di quantificare l'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale, come osservabile nel diagramma di seguito riportato.

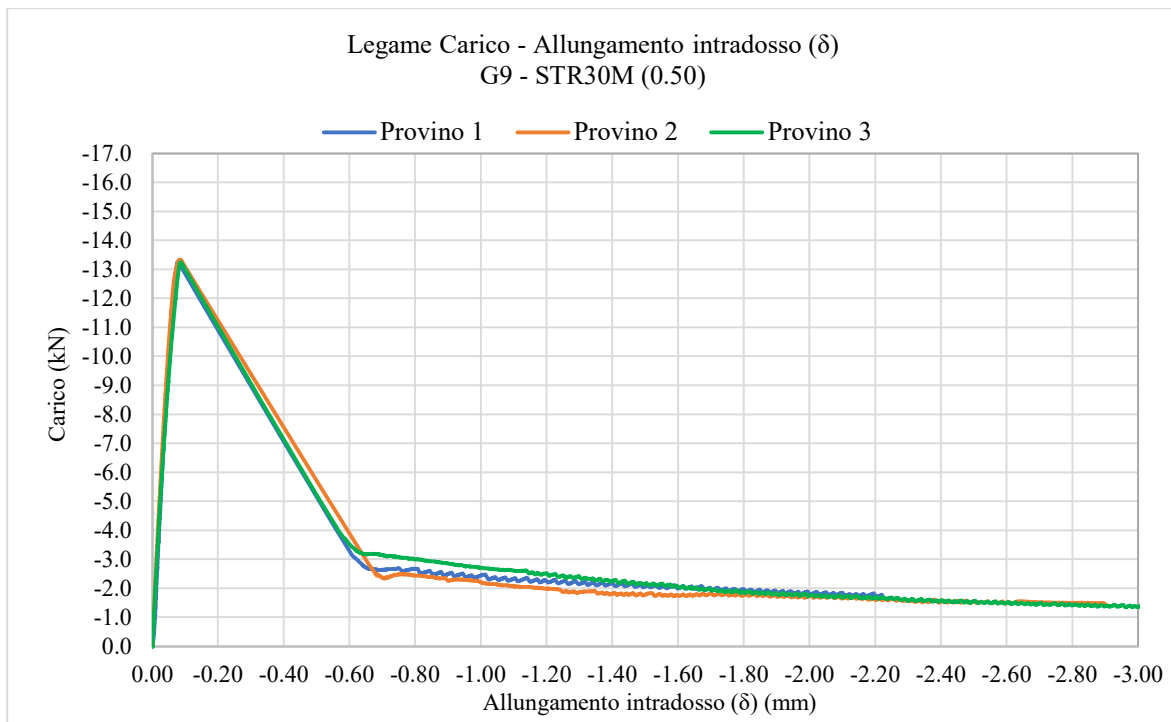


Figura 8-100: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

Al fine di valutare le prestazioni del rinforzo fibroso e qualificare il calcestruzzo testato, risulta essenziale analizzare la relazione tra le tensioni indotte nella sezione e le deformazioni all'intradosso. Nel grafico seguente (Fig. 8-79) viene illustrato l'andamento del legame tensione-allungamento per ciascuno dei tre campioni.

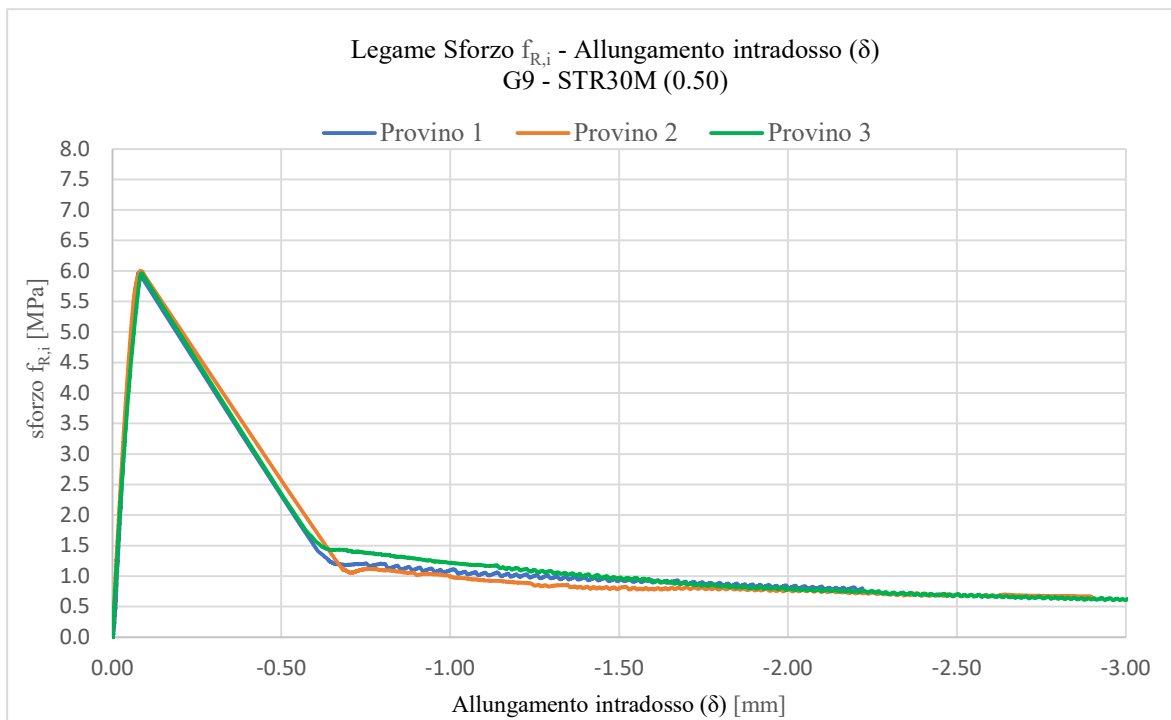


Figura 8-101: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

A completamento dell'analisi, vengono riportate anche le curve relative all'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo durante la prova.

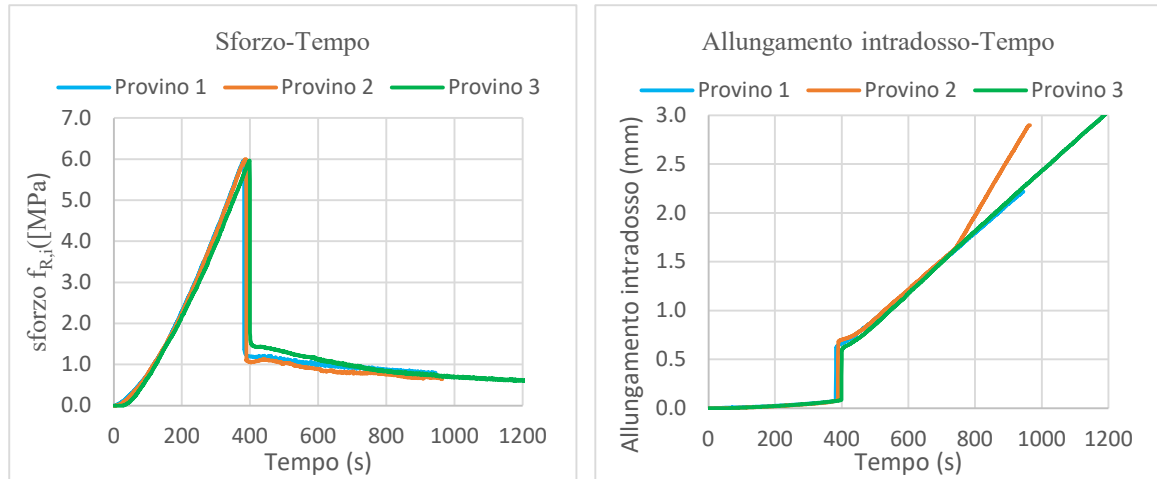


Figura 8-102: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G9-STR30M(0.50)

Dalle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame si sono individuati i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G9-STR30M [0.50%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	2.30	0.81
Provino 2	2.51	0.70
Provino 3	2.30	0.71
Valori medi	2.37	0.74

Tabella 8-40: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G9-STR30M (0.50)

8.5.10 Campioni serie "G10 – STR30M (1.00)"

La serie G10 - STR30M (1.00) comprende tre provini prismatici testati a flessione, realizzati con una matrice cementizia rinforzata con fibre da 30 mm derivanti dal taglio di corde di diversa tipologia. Come indicato dalla nomenclatura, questa serie è caratterizzata dal massimo dosaggio di fibre riciclate, pari all'1.00% in peso. L'elevato quantitativo di fibre riciclate ha conferito ai campioni un marcato comportamento duttile, come si evince chiaramente dai diagrammi sottostanti. Si è tuttavia osservata una riduzione del carico di picco rispetto ai dosaggi minori, imputabile all'elevata densità di fibre che penalizza parzialmente la resistenza massima della matrice, ma che al contempo permette al campione di resistere efficacemente anche dopo la formazione della prima fessura. Il diagramma carico-freccia di seguito riportato mostra un carico di picco ridotto per i tre provini, seguito da un tratto post-picco costante su livelli di forza significativi. Parallelamente a tale curva, si riporta l'evoluzione temporale del carico e della freccia, al fine di evidenziare le dinamiche di acquisizione dei dati durante la prova.

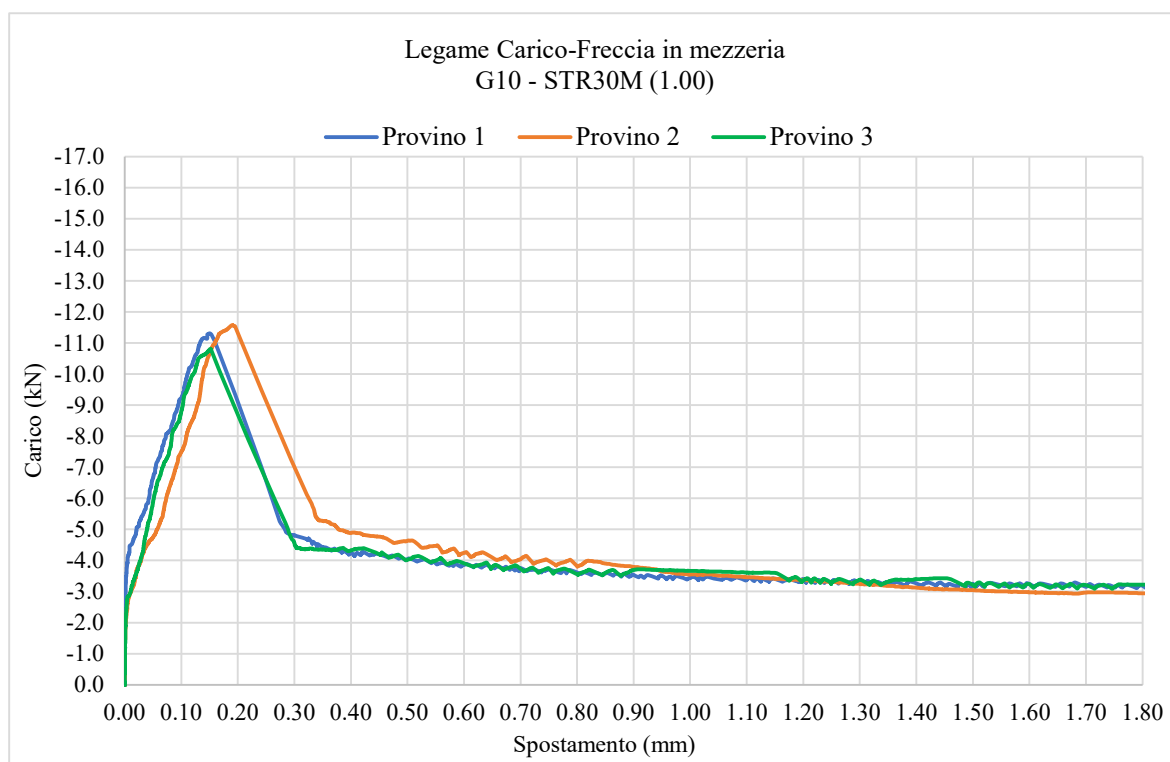


Figura 8-103: correlazione tra carico e freccia in mezzeria dei campioni della serie G10-STR30M (1.00)

In questo caso, i risultati sperimentali evidenziano un valore medio ridotto rispetto a quanto registrato per i provini realizzati con la miscela di riferimento priva di rinforzo fibroso.

Miscela di prova	G10-STR30M [1.00%]		
Campioni	Provino 1	Provino 2	Provino 3
F_{max} [kN]	11.32	11.58	10.82
$F_{max,medio}$ [kN]	11.24		

Tabella 8-41: valori del carico di picco dei campioni della serie G10-STR30M (1.00)

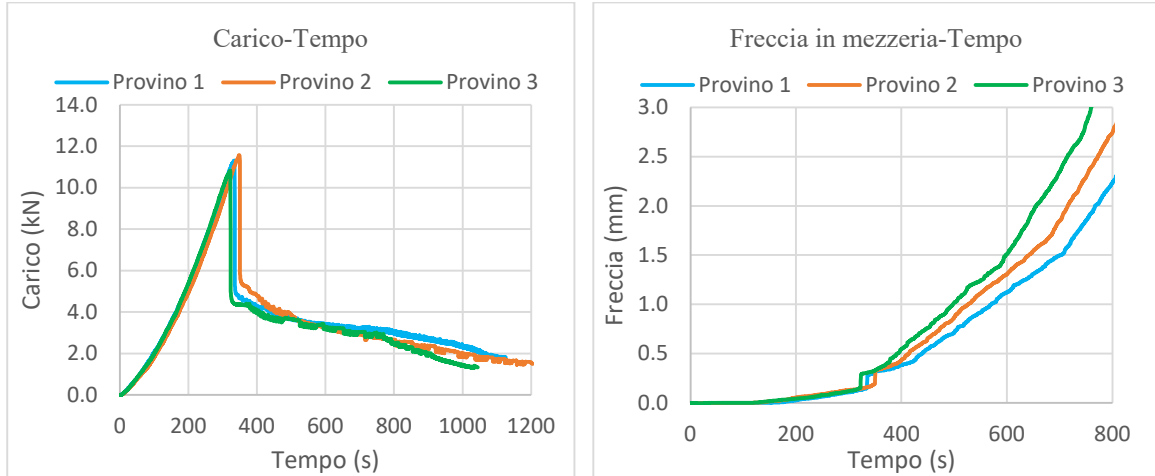


Figura 8-104: andamento di carico e freccia in funzione del tempo - serie G10-STR30M (1.00)

L'apertura della fessura in relazione alla capacità portante residua del materiale è osservabile nel diagramma che mette in relazione il carico applicato con l'allungamento all'intradosso:

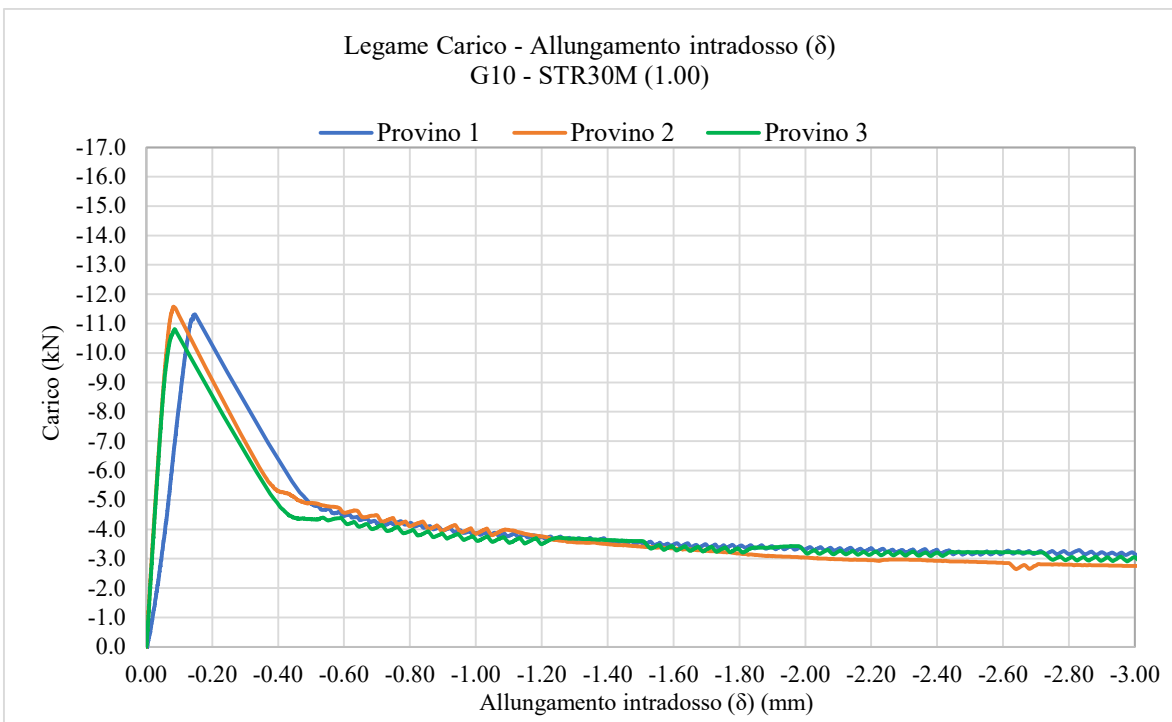


Figura 8-105: correlazione tra l'allungamento all'intradosso ed il carico

Di seguito si riporta la curva che mostra il legame tra sforzo e allungamento all'intradosso, sulla quale sono individuati i punti relativi ai valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, corrispondenti ad un valore di apertura della fessura pari rispettivamente a 0.5 mm e 2.5 mm.

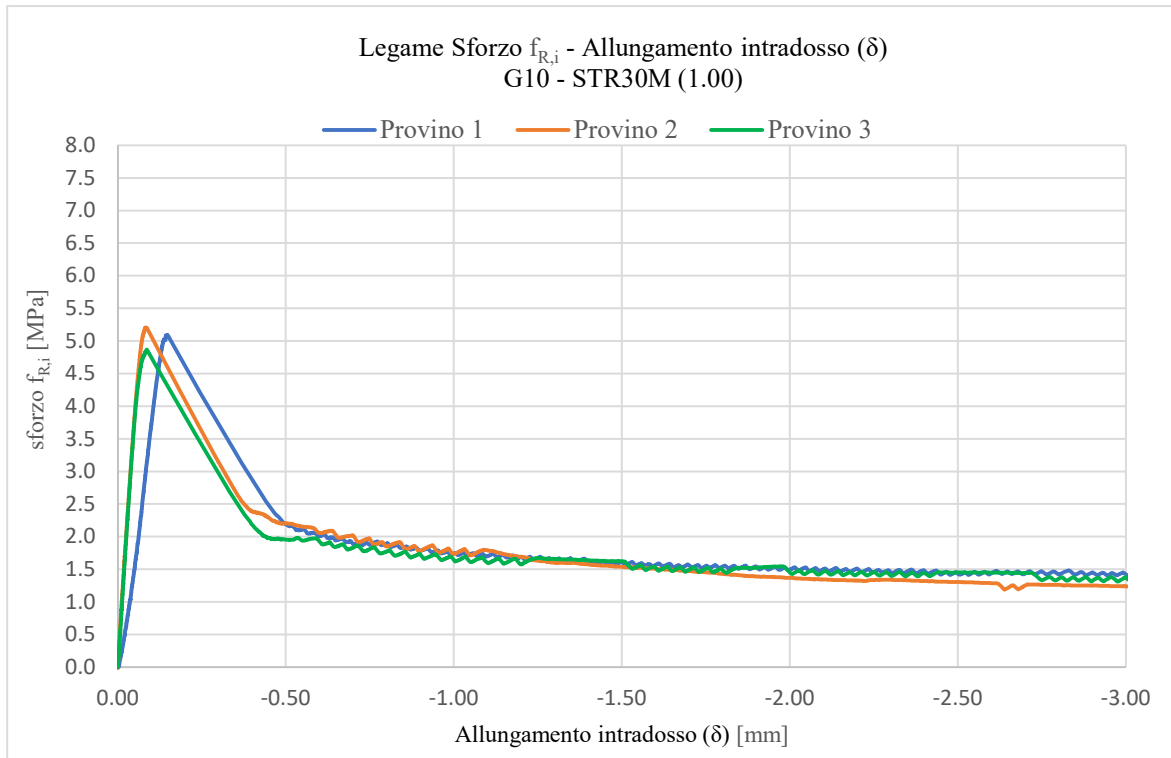


Figura 8-106: correlazione tra l'allungamento all'intradosso e lo sforzo nella sezione

A completamento dell'analisi, vengono riportate anche le curve relative all'evoluzione temporale dell'allungamento all'intradosso e dello sforzo durante la prova.

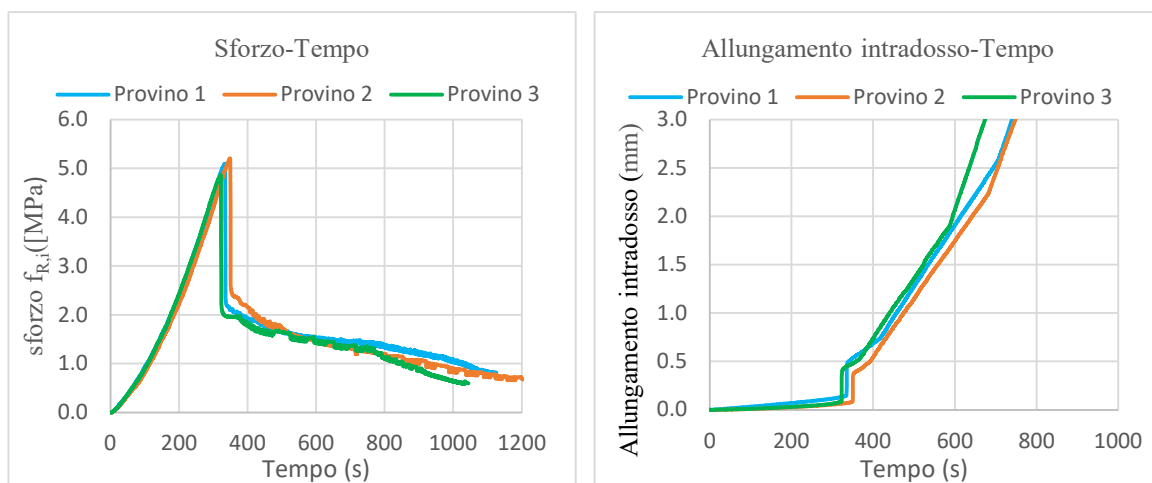


Figura 8-107: andamento di sforzo e allungamento all'intradosso in funzione del tempo - serie G10-STR30M(1.00)

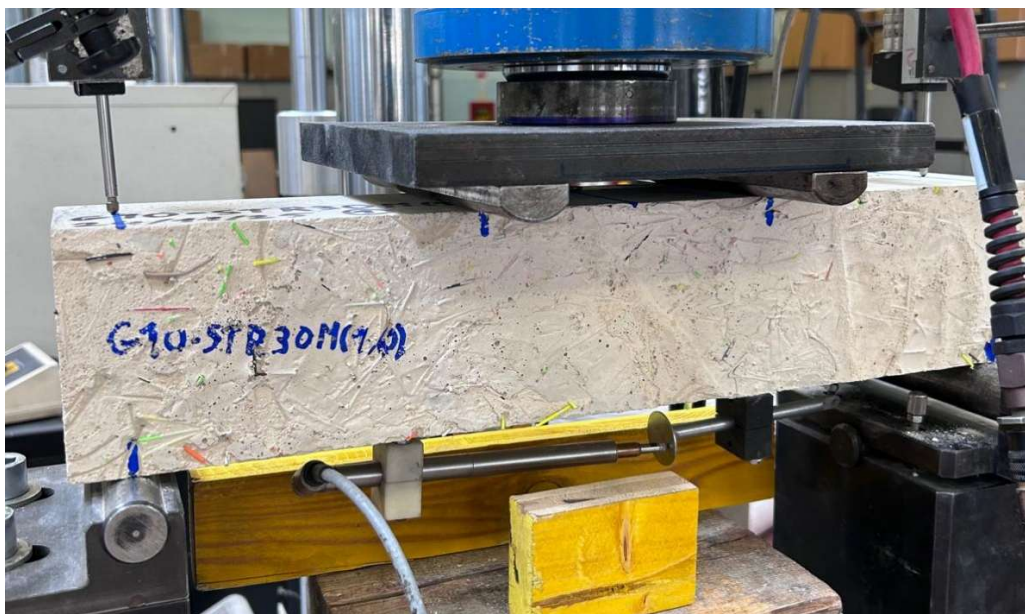


Figura 8-108: prova di flessione su un campione della serie G10-STR30M (1.00)

Dalle prove a flessione condotte sui tre provini della serie in esame si sono individuati i parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, i cui valori sono riepilogati nella seguente tabella:

G10-STR30M [1.00%]	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$
Provino 1	2.19	1.43
Provino 2	2.10	1.30
Provino 3	1.95	1.45
Valori medi	2.08	1.39

Tabella 8-42: parametri di resistenza residua $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ dei campioni della serie G10-STR30M (1.00)



Figura 8-109: fibre miste in azione tra i due piani di fessura generati a flessione

8.6 CONFRONTO GLOBALE DEI RISULTATI A FLESSIONE

I risultati dei test a flessione hanno consentito di verificare l'efficacia delle fibre sintetiche ottenute dal riciclo delle corde delle racchette da tennis. Data la fondamentale importanza di queste prove per la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo fibrorinforzato (FRC), ad esse è stato dedicato ampio spazio all'interno della campagna sperimentale svolta. Lo studio dei campioni sottoposti a flessione permette, infatti, di mettere in pratica l'azione delle fibre nell'opporvi all'apertura delle fessure, consentendo dunque di osservare il comportamento duttile che esse conferiscono alla miscela cementizia. Per ciascuna miscela sono stati registrati i valori di carico e le relative tensioni nominali nella sezione, valutati in funzione dei diversi gradi di apertura della fessura all'intradosso del provino.

Pertanto, una volta accertata la validità prestazionale delle fibre da riciclo, l'ulteriore obiettivo dell'indagine è stato individuare la configurazione di rinforzo ottimale. Nello specifico, il confronto tra le diverse tipologie di fibre e, soprattutto, tra i vari dosaggi impiegati, ha evidenziato come tali parametri incidano in modo significativo sul comportamento duttile e post-fessurativo del materiale.

L'analisi complessiva dei risultati delle prove di flessione ed il confronto tra le diverse miscele testate hanno evidenziato un andamento dei valori di resistenza che richiede un approfondimento specifico. I diagrammi precedentemente riportati per le singole miscele sono stati quindi confrontati tra loro, al fine di analizzare come l'evoluzione della risposta flessionale sia direttamente influenzata dal dosaggio e dalla natura delle fibre utilizzate. In primo luogo, l'analisi comparativa si è incentrata su una specifica tipologia di rinforzo, con l'obiettivo di definire il dosaggio ottimale per tale configurazione di fibre.

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 30 mm ricavate da corde standardizzate (STR 1 - Black)

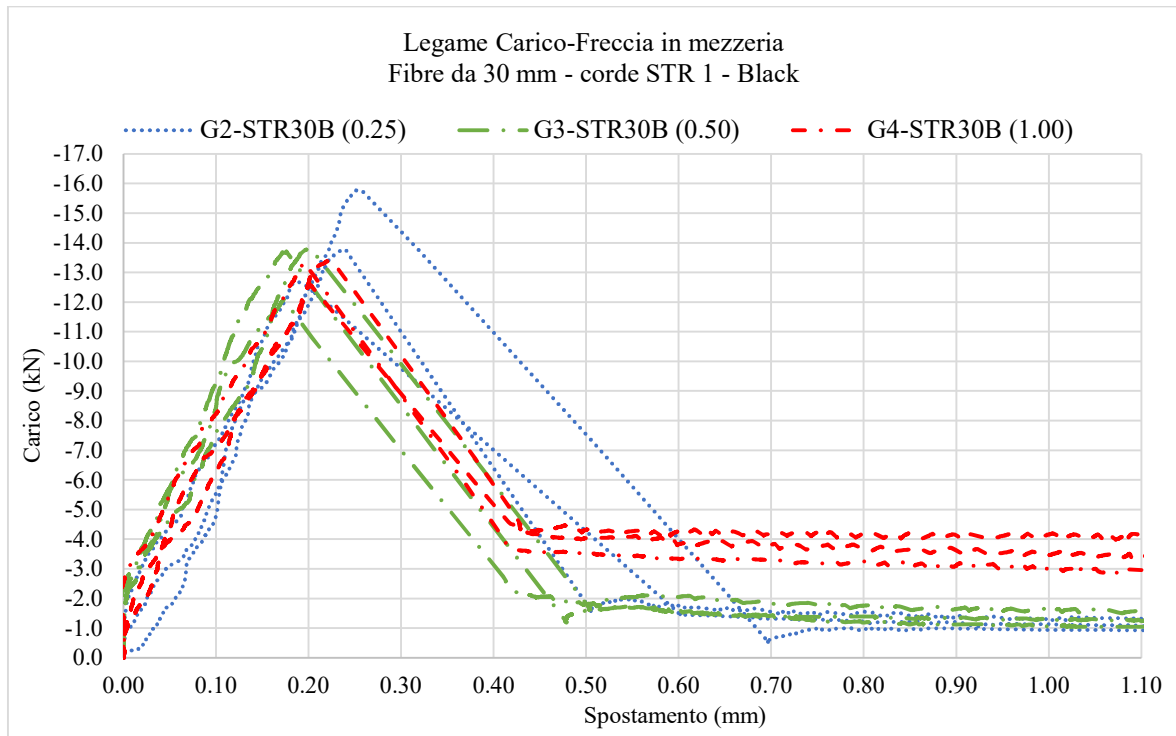


Figura 8-110: confronto del legame carico-freccia in mezzeria per i tre differenti dosaggi della miscela

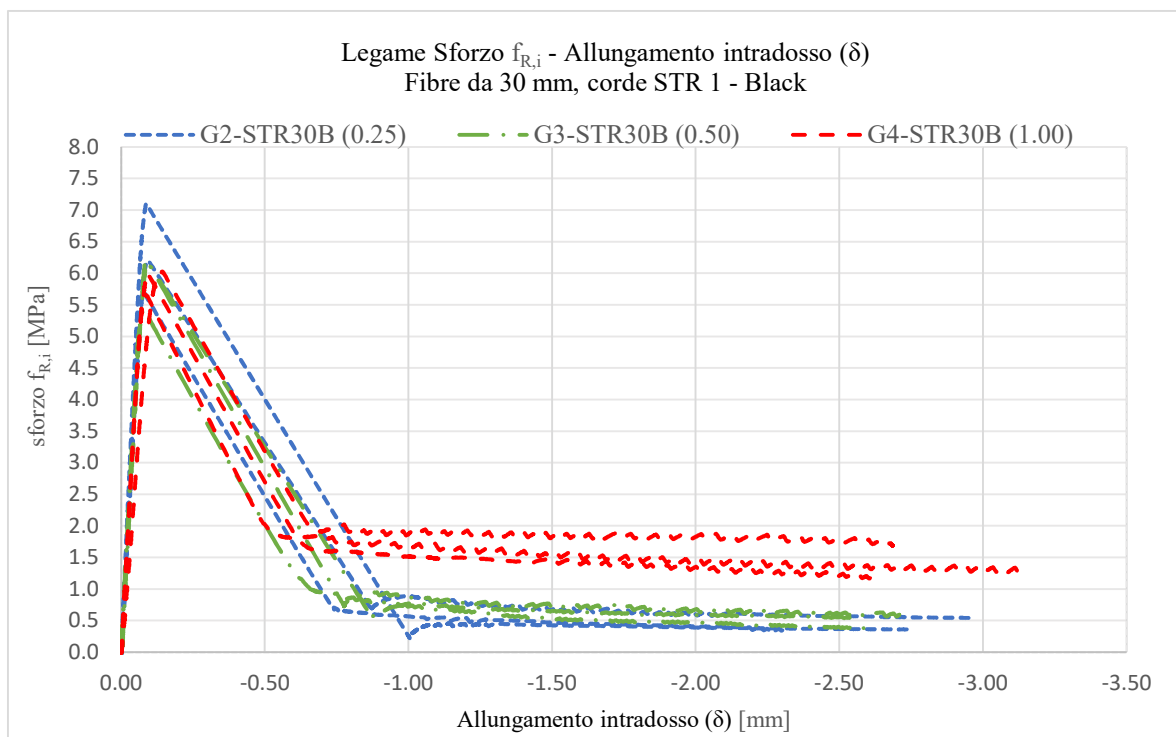


Figura 8-111: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i tre differenti dosaggi della miscela

Dal confronto delle curve emerge chiaramente come la risposta meccanica delle miscele vari in modo significativo in funzione del dosaggio di rinforzo. In generale, la risposta del calcestruzzo rinforzato con fibre standard di lunghezza 30 millimetri risulta positiva in termini di capacità di opporsi all'apertura delle fessure. Il comportamento post-fessurativo, indice della duttilità conferita al materiale, è evidente in tutti i campioni testati, seppur con marcate differenze legate alla percentuale di fibre impiegata. Analizzando sia i diagrammi carico-freccia in mezzeria, sia le curve tensione-apertura della fessura all'intradosso, si osserva che i provini con dosaggi dello 0.25% e dello 0.50% in peso esibiscono andamenti del ramo duttile pressoché sovrapponibili. Uno scostamento sostanziale si registra, invece, per la miscela con il dosaggio massimo, pari all'1.0% in peso, la quale restituisce i massimi livelli di duttilità e tenacità post-fessurativa. Ciò dimostra come la situazione più efficace nel garantire duttilità alla miscela è quella che impiega, come prevedibile, la concentrazione di fibre maggiore.

Tuttavia, l'analisi grafica evidenzia anche l'aspetto negativo legato a un'eccessiva concentrazione di fibre nella miscela. Si nota infatti come il carico di picco sopportabile dal provino subisca una riduzione all'aumentare del dosaggio, imputabile al raggiungimento di un livello di saturazione della matrice cementizia. Questo calo prestazionale della resistenza massima conferma quanto già emerso dalle prove di compressione e trazione indiretta, dove è stata individuata una soglia limite di concentrazione oltre la quale il conglomerato cementizio si indebolisce. In conclusione, coerentemente con le altre prove della campagna sperimentale, i test a flessione confermano che i dosaggi dello 0.25% e 0.50% offrono risposte analoghe e bilanciate, mentre il passaggio all'1.00 % di fibre modifica radicalmente la meccanica della miscela, massimizzandone la duttilità a discapito della resistenza di picco.

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 20 mm ricavate da corde standardizzate (STR

1 - Black)

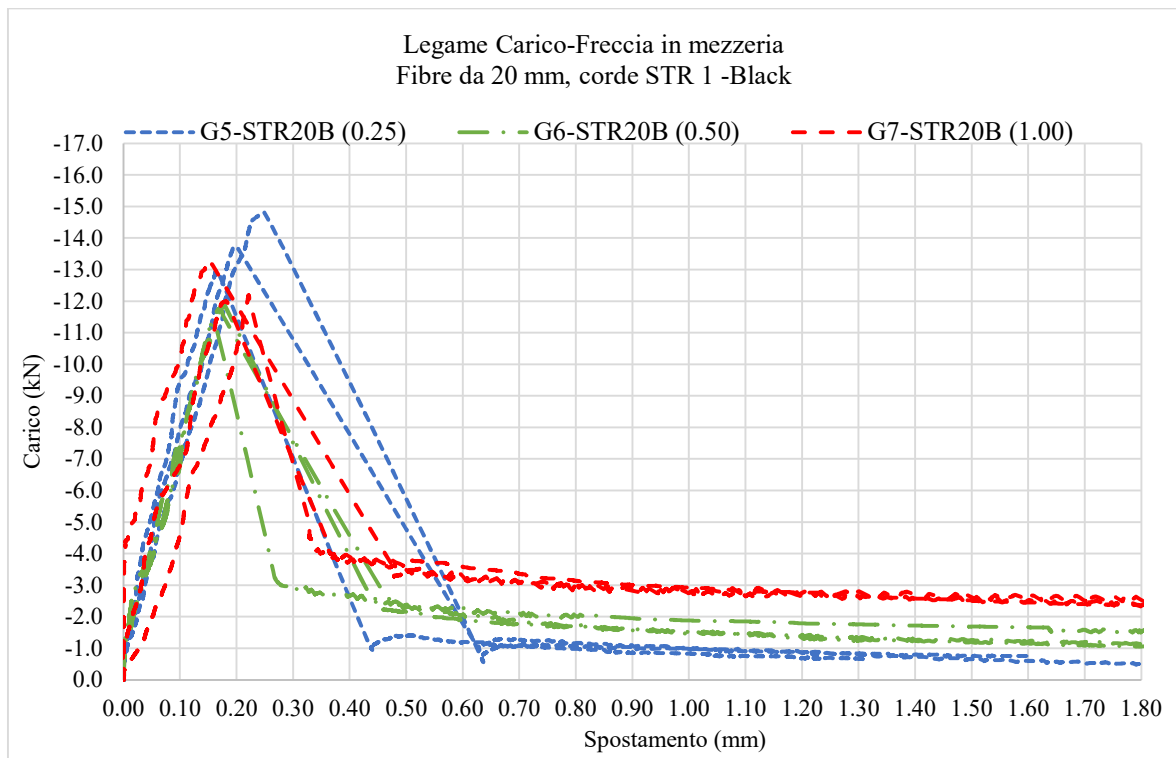


Figura 8-112: confronto del legame carico-freccia in mezzeria per i tre differenti dosaggi della miscela

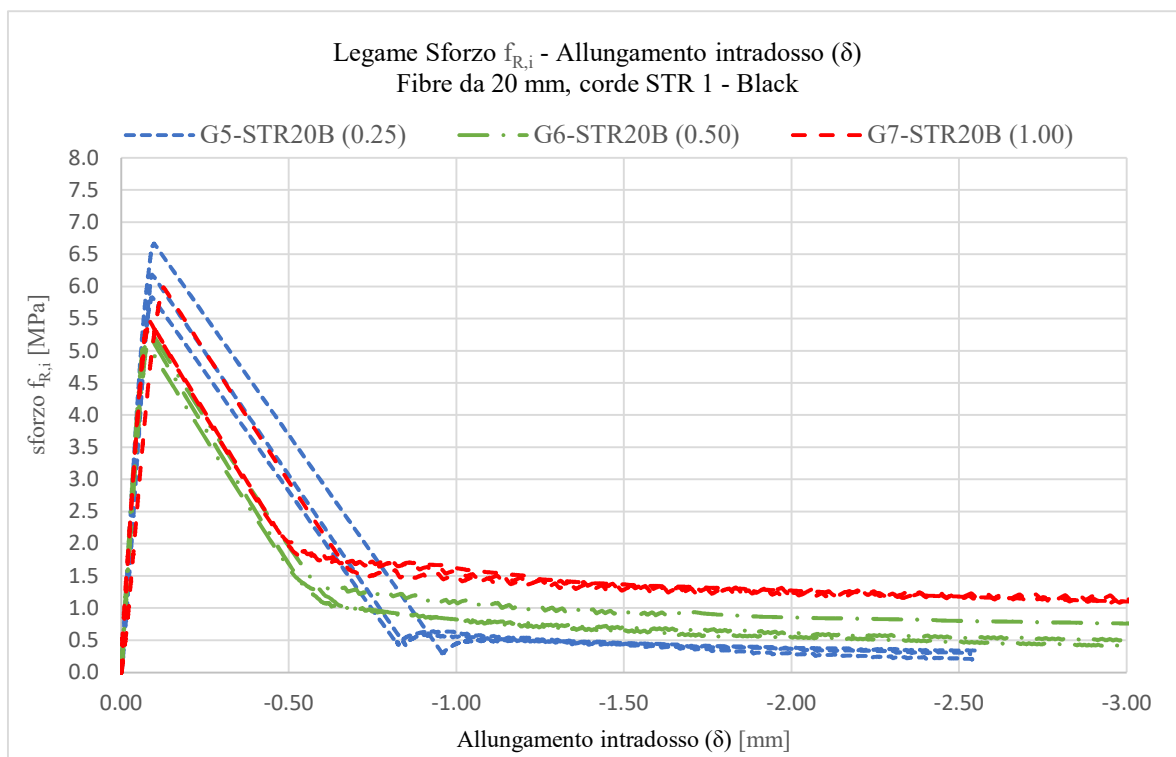


Figura 8-113: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i tre differenti dosaggi della miscela

Dal confronto delle curve si nota che, anche nel caso di fibre da 20 millimetri, la risposta meccanica delle miscele varia in modo significativo in funzione del dosaggio di rinforzo. In generale, la risposta del calcestruzzo rinforzato con tali fibre risulta positiva in termini di capacità di opporsi all'apertura delle fessure. Il comportamento post-fessurativo, indice della duttilità conferita al materiale, è evidente in tutti i campioni testati, seppur con marcate differenze legate alla percentuale di fibre impiegata.

Valutando le curve carico-spostamento e tensione-apertura, le miscele allo 0.25% e allo 0.50% in peso mostrano un comportamento post-fessurativo affine, seppur con un lieve incremento prestazionale a favore del dosaggio allo 0.50%. Come atteso, il salto prestazionale più evidente si ottiene con la concentrazione massima (1.0%), che conferisce al materiale i picchi più alti di duttilità.

Un aspetto interessante che emerge dai grafici riguarda i carichi di picco, infatti il valore minimo non appartiene alla miscela con il dosaggio maggiore, ma a quella allo 0.50%. Dunque, risulta meno evidente la riduzione di carico all'aumentare del dosaggio. Complessivamente, confrontando tali risultati con quelli ottenuti in precedenza a parità di tipologia di corda e di dosaggio, la miscela in questione è risultata meno performante rispetto a quella contenente fibre lunghe 30 millimetri.



Figura 8-114: prova di flessione su campione rinforzato con fibre lunghe 20 millimetri

Calcestruzzo rinforzato con fibre da 30 mm ricavate da corde miste

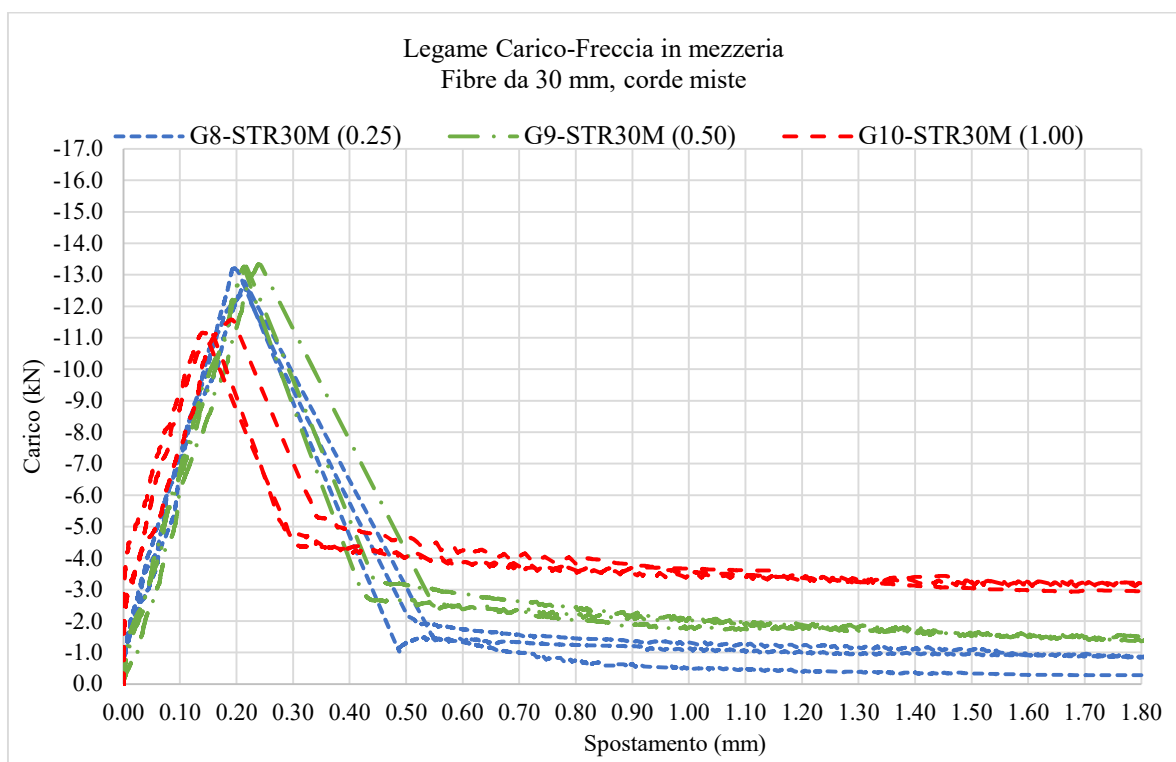


Figura 8-115: confronto del legame carico-freccia in mezzeria per i tre differenti dosaggi della miscela

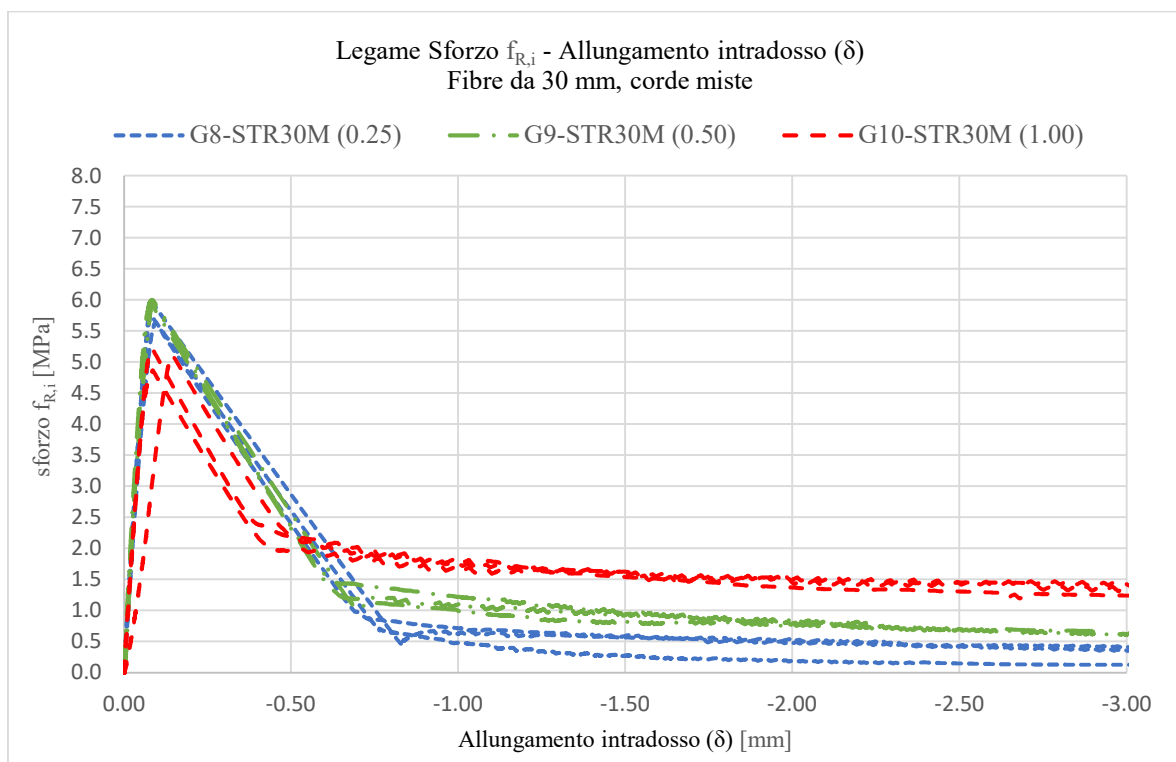


Figura 8-116: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i tre differenti dosaggi della miscela

I diagrammi illustrati evidenziano che, anche impiegando un rinforzo costituito da fibre miste, la risposta meccanica del materiale varia significativamente in funzione del dosaggio. Come atteso, l'impiego di fibre miste da 30 mm conferma i riscontri positivi già osservati per le configurazioni precedenti. Dall'analisi delle curve carico-freccia in mezzzeria e tensione-apertura della fessura, emerge che i provini con dosaggi dello 0.25% e dello 0.50% in peso presentano rami post-fessurativi pressoché sovrapponibili, seppur con un lieve incremento prestazionale a favore della miscela con concentrazione allo 0.50%. Uno scostamento più marcato si registra, invece, per la miscela con dosaggio massimo, pari all'1.00% in peso, capace di garantire i massimi livelli di duttilità e tenacità. Tuttavia, analogamente a quanto riscontrato per le altre formulazioni con fibre della medesima lunghezza, si osserva una progressiva riduzione del carico di picco all'aumentare del quantitativo di rinforzo, un fenomeno imputabile alla saturazione della matrice cementizia. Tale decadimento prestazionale in termini di resistenza massima è del tutto coerente con i risultati delle prove a compressione e a trazione indiretta, le quali avevano già evidenziato l'esistenza di una soglia limite di concentrazione oltre la quale la resistenza del conglomerato tende a diminuire.

In conclusione, coerentemente con le altre prove della campagna sperimentale, i test a flessione confermano che i dosaggi dello 0.25% e 0.50% offrono risposte analoghe e bilanciate, mentre il passaggio all'1.00 % di fibre modifica radicalmente la meccanica della miscela, massimizzandone la duttilità a discapito della resistenza di picco.



Figura 8-117: test su campione con dosaggio massimo di fibre ottenute da corde miste

8.6.1 L'influenza della tipologia di fibre sul comportamento a flessione

Al fine di valutare l'influenza delle caratteristiche geometriche delle singole fibre, come lunghezza e diametro, sull'efficacia del rinforzo nel calcestruzzo, è stato condotto un confronto dei risultati a parità di dosaggio. In particolare, l'analisi si è concentrata sul dato di maggiore rilievo a livello normativo, ovvero la curva che mette in relazione lo sforzo e l'apertura della fessura (CMOD) con l'obiettivo di determinare i parametri $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$. Tali curve risultano molto importanti nel mostrare il ramo duttile di risposta del materiale, il quale è risultato più evidente nel caso del dosaggio massimo pari all'1.00% in peso, ma anche nel caso della concentrazione intermedia (0.50%). Si è esclusa da tale confronto la concentrazione dello 0.25%, in quanto la minore evidenza della fase post-fessurativa non avrebbe consentito un'adeguata comparazione tra le diverse tipologie di fibra.

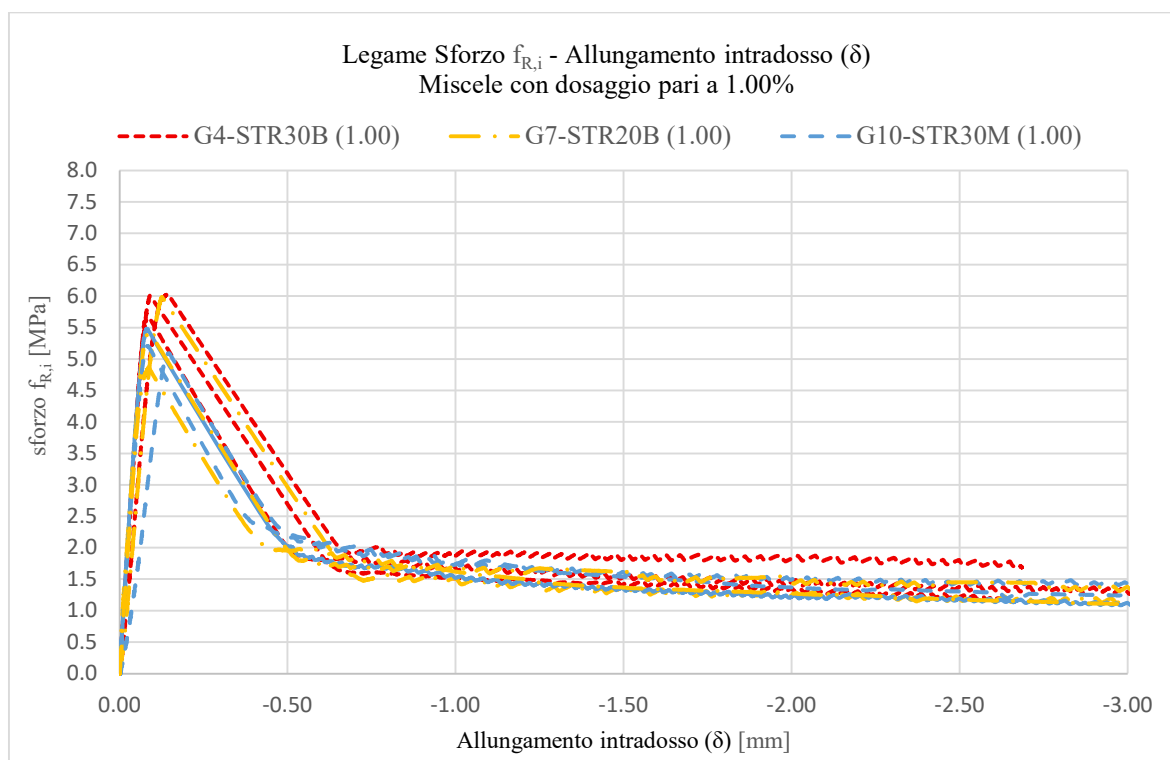


Figura 8-118: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i diversi rinforzi a parità di dosaggio (1.00%)

Nel diagramma riportato si osserva il confronto fra le diverse tipologie di fibre inserite nelle miscele a parità di dosaggio pari all'1.00% in peso. Tutti i campioni testati mostrano un evidente comportamento duttile, a conferma dell'efficacia del rinforzo fibroso in tutte e tre le miscele. Si nota, inoltre, che la tipologia di corda e, in particolare, la lunghezza delle fibre non influenzano in modo significativo la

risposta meccanica dei provini prismatici sottoposti a prova di flessione. Di conseguenza, il comportamento del conglomerato cementizio fibrorinforzato risulta dipendere esclusivamente dal dosaggio. È possibile pertanto affermare che, nel caso di concentrazioni elevate come quella in esame, la presenza di fibre è tale da agire arginando lo sviluppo di fessure indipendente dalle caratteristiche geometriche della fibra stessa.

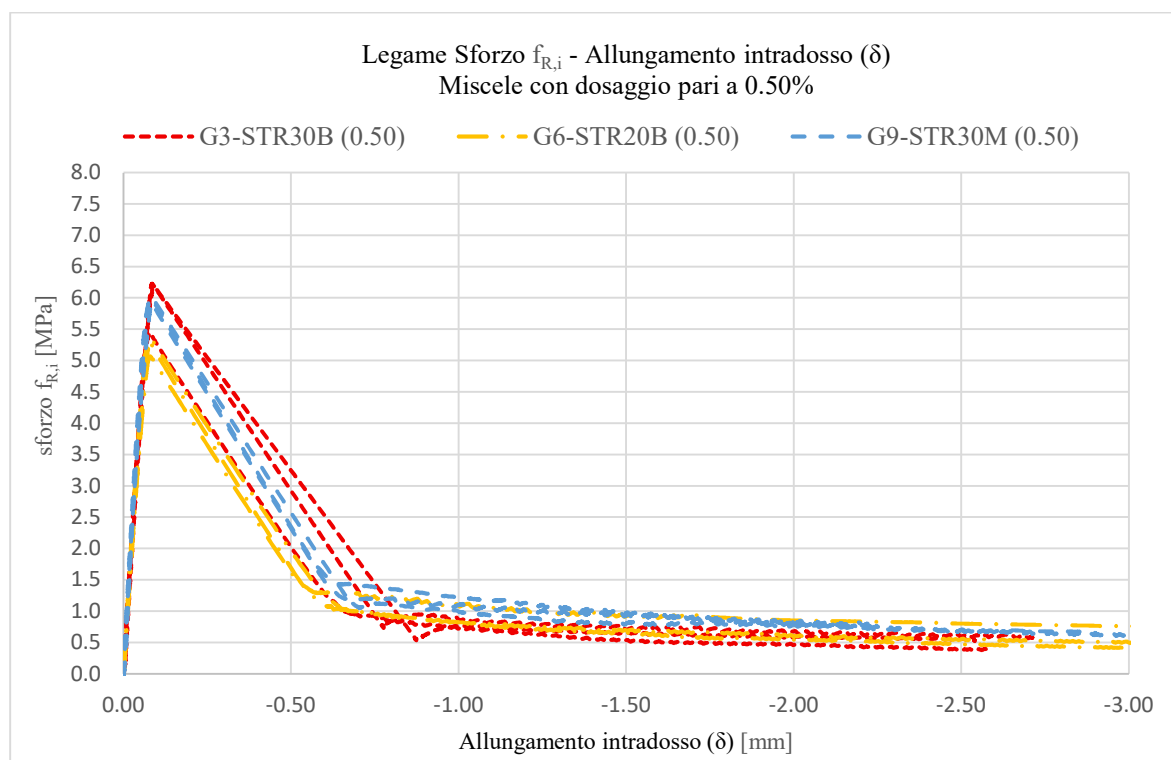


Figura 8-119: confronto del legame sforzo-allungamento all'intradosso per i diversi rinforzi a parità di dosaggio (0.50%)

Confrontando le miscele rinforzate con una concentrazione di fibre pari allo 0.50% in peso, si osserva chiaramente la minore entità della risposta duttile post picco fornita dal materiale rispetto alla concentrazione massima. Il minore quantitativo di fibre riduce infatti la capacità di contrastare l'apertura delle fessure. Tuttavia, tale azione si mantiene sufficientemente efficace da garantire una buona resistenza residua al materiale.

Anche in questo caso, risulta poco marcata la differenza di prestazione legata alle caratteristiche geometriche delle fibre, confermando l'osservazione precedente che attribuisce principalmente al dosaggio di rinforzo la capacità di governare significativamente le prestazioni della miscela.

8.6.2 Definizione della classe di resistenza dei vari FRC contenuti fibre riciclate

Per ogni miscela sottoposta a prova di flessione, sono stati ricavati i parametri caratteristici fondamentali, i quali corrispondono alle tensioni residue nella sezione in corrispondenza di un'apertura della fessura pari a 0.5 mm e a 2.5 mm. Tali fattori, indicati rispettivamente con le sigle $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$, in accordo con le indicazioni delle linee guida [2] [17], consentono di definire una classe di resistenza da assegnare al calcestruzzo fibrorinforzato oggetto di studio.

La classificazione di un FRC viene espressa mediante uno specifico codice alfanumerico: il valore numerico corrisponde alla resistenza $f_{R,1k}$, la lettera invece definisce il rapporto di proporzionalità con la resistenza $f_{R,3k}$. Attraverso questa coppia di parametri è dunque possibile risalire a tutte le informazioni relative alla resistenza a trazione del materiale.

		$f_{R,1k}$ [MPa]											
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0
Classificazione sulla base del rapporto $\frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}}$	a	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
	b	0.70	1.05	1.40	1.75	2.10	2.80	3.50	4.20	5.60	7.00	8.40	9.80
	c	0.90	1.35	1.80	2.25	2.70	3.60	4.50	5.40	7.20	9.00	10.8	12.6
	d	1.10	1.65	2.20	2.75	3.30	4.40	5.50	6.60	8.80	11.0	13.2	15.4
	e	1.30	1.95	2.60	3.25	3.90	5.20	6.50	7.80	10.4	13.0	15.6	18.2

Tabella 8-43: tabella per la classificazione del calcestruzzo fibrorinforzato [17]

Facendo riferimento alla tabella riportata, fornita dalle linee guida per l'identificazione e la classificazione degli FRC, è stato possibile attribuire una specifica classe prestazionale a ciascuna miscela indagata durante la campagna sperimentale. La tabella seguente riporta i valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ riscontrati per ogni conglomerato cementizio prodotto, e la relativa classe di resistenza assegnata:

Miscela fibrorinforzata	$f_{R,1k}$	$f_{R,3k}$	Classe prestazionale
G2 - STR30B (0.25)	3.28	0.42	-
G3 - STR30B (0.50)	2.70	0.51	-
G4 - STR30B (1.00)	2.68	1.45	2.5a
G5 - STR20B (0.25)	3.43	0.28	-
G6 - STR20B (0.50)	1.73	0.60	-
G7 - STR20B (1.00)	2.34	1.18	2.0a
G8 - STR30M (0.25)	2.66	0.33	-
G9 - STR30M (0.50)	2.37	0.74	-
G10 - STR30M (1.00)	2.08	1.39	2.0a

Tabella 8-44: calcolo della classe prestazione delle miscele di calcestruzzo fibrorinforzato prodotte con fibre riciclate

Sebbene le miscele prodotte abbiano esibito il tipico comportamento di un calcestruzzo fibrorinforzato, garantendo una resistenza residua post-picco e la capacità di limitare l'apertura delle fessure, soltanto i compositi con un dosaggio di fibre riciclate dell'1.00% presentano un rapporto tra i valori di $f_{R,1k}$ e $f_{R,3k}$ tale da consentire l'assegnazione di una classe prestazionale tra quelle riportate nei documenti normativi. Le miscele con concentrazioni inferiori (0.25% e 0.50%) hanno mostrato elevati valori di $f_{R,1k}$, relativi a un CMOD di 0.5 mm, subendo tuttavia un marcato decadimento della tensione all'aumentare dell'apertura della fessura. Questa ridotta capacità di resistenza residua si è tradotta in valori insufficienti del parametro $f_{R,3k}$, relativi ad un CMOD di 2.5 mm. Per tali dosaggi, il valore di $f_{R,3k}$ riscontrato è risultato inferiore al valore minimo definito in tabella in relazione al rapporto col parametro $f_{R,1k}$, rendendo dunque impossibile l'assegnazione della lettera che caratterizza il codice alfanumerico di tenacità.

Si può dunque affermare che la risposta prestazionale adeguata alla classificazione come calcestruzzo fibrorinforzato è fornita dai soli campioni rinforzati con una concentrazione di fibre pari all'1.00% in peso. Sebbene tale concentrazione si sia rivelata meno performante in merito alla resistenza a compressione e al carico di picco, va ricordato che l'obiettivo primario di un calcestruzzo fibrorinforzato è il controllo della propagazione fessurativa. Sotto questo aspetto, l'impiego dell'1.00% di fibre derivanti dal riciclo di corde da tennis garantisce pienamente le prestazioni strutturali richieste.

9 PROSPETTIVE FUTURE E ULTERIORI SCENARI DI IMPIEGO DELLE FIBRE

I risultati discussi nel presente elaborato confermano la fattibilità tecnica dell'impiego di corde da tennis esauste come rinforzo fibroso nelle matrici cementizie. Nonostante ciò, la ricerca relativa a tale ambito di reimpiego è ancora in fase embrionale e può avere numerosi sviluppi volti ad evidenziare altri benefici che le fibre di riciclo possono apportare alla miscela cementizia. Le eccellenti proprietà fisico-chimiche dei polimeri costituenti le corde, unite alla particolare geometria delle fibre, aprono la strada a molteplici scenari applicativi non ancora indagati.

Nel presente capitolo vengono delineate le principali prospettive future di indagine, analizzando i potenziali vantaggi prestazionali derivanti dall'integrazione di queste fibre nel calcestruzzo.

9.1 RESISTENZA AL FUOCO DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

L'impiego di fibre polimeriche per migliorare il comportamento del calcestruzzo alle alte temperature è una tecnica ormai nota e consolidata. In diverse opere strategiche soggette a rischio incendio, il calcestruzzo fibrorinforzato viene comunemente utilizzato per preservare l'integrità strutturale in caso di esposizione al fuoco. Il meccanismo di danno in questo contesto è legato alla presenza di umidità all'interno della matrice cementizia, la quale durante un incendio cambia stato trasformandosi in vapore, aumentando di volume e generando una forte pressione interna all'elemento strutturale. L'impossibilità del vapore uscire dalla superficie comporta l'espulsione violenta dello strato corticale del calcestruzzo, dando vita ad un fenomeno noto come spalling esplosivo del calcestruzzo. La pericolosità di tale fenomeno è legata alla conseguente esposizione diretta delle armature all'azione delle fiamme, una condizione estremamente critica poiché l'acciaio subisce un rapido decadimento delle proprietà meccaniche all'aumentare della temperatura. La perdita del copriferro, dunque, riduce drasticamente la resistenza al fuoco della struttura, anticipandone il collasso. L'introduzione di fibre ha proprio lo scopo di mitigare questo rischio, favorendo la dissipazione della pressione di vapore ed evitando la disgregazione esplosiva del materiale.

Il loro contributo è legato alla natura fisica del materiale polimerico, il quale fonde a temperature relativamente basse rispetto a quelle generate da un incendio. Questo processo di fusione crea una rete di canali all'interno del calcestruzzo che facilita la fuoriuscita del vapore, riducendone la pressione interna. Di conseguenza, viene meno la causa scatenante dello spalling esplosivo, preservando l'integrità del materiale

Per indagare tale fenomeno si è fatto riferimento ad una revisione scientifica [21] che definisce quali tipologie di fibre offrono migliori prestazioni in caso di incendio. Tale revisione sistematica della letteratura scientifica si concentra soprattutto su tre tipologie di microfibre polimeriche: polipropilene (PP), polietilene (PE) e polivinilalcol (PVA) confrontandone il comportamento meccanico e termico rispetto al calcestruzzo tradizionale o rinforzato con fibre di acciaio. Lo studio evidenzia come, in assenza di elementi che fondendo creino vie di fuga per il vapore, come nel caso dell'acciaio o del calcestruzzo semplice, il materiale rimanga soggetto al distacco violento delle parti superficiali causato dalla pressione interna.

Lo studio preso in esame dimostra come l'aggiunta di fibre sintetiche modifichi sostanzialmente il comportamento del calcestruzzo esposto al fuoco. In particolare, le fibre in polipropilene risultano particolarmente efficaci nel ridurre lo spalling esplosivo. Esse, infatti, fondono intorno ai 160–170 °C creando micro-canali che aumentano la permeabilità del materiale consentendo al vapore di fuoriuscire, riducendo la pressione interna. In tal caso si tratta di microfibre in polietilene, i risultati più promettenti sono stati ottenuti con l'impiego di macrofibre sintetiche. Queste ultime, per dimensioni e geometria, risultano direttamente assimilabili alle fibre ricavabili dalle corde da tennis. Rispetto alle microfibre tradizionali, le macrofibre presentano un diametro maggiore che garantisce un contributo superiore in termini di tenacità e resistenza post-fessurazione. Secondo gli autori, queste fibre rappresentano una valida alternativa alle fibre d'acciaio, poiché garantiscono buona resistenza alla corrosione, minore peso e adeguate prestazioni meccaniche anche in condizioni severe. Le macrofibre sintetiche sembrano dunque rappresentare il miglior compromesso tra il mantenimento delle proprietà meccaniche residue e il controllo dello spalling esplosivo in caso di incendio.

In definitiva, le macro-fibre sintetiche emergono come la soluzione più promettente per applicazioni strutturali in ambienti ad alto rischio di incendio. Queste conclusioni aprono interessanti prospettive per il riciclo delle corde da tennis ed

analizzarne il comportamento nel calcestruzzo in caso di incendio. A supporto di tale ipotesi, un recente lavoro di tesi condotto presso il Politecnico di Torino [22], focalizzato sul riciclo delle corde nei conglomerati bituminosi, ha fornito dati essenziali sul comportamento termico di questi materiali in contesti ad elevata temperatura. Le analisi hanno confermato che i polimeri delle corde fondono a una temperatura di circa 270 °C. Tali evidenze sperimentali rafforzano l'ipotesi che le fibre da tennis possano essere impiegate con successo nel calcestruzzo per prevenire lo spalling esplosivo, estendendo la durata della struttura in caso di incendio.

9.2 MIGLIORAMENTO DELL'ADERENZA ALL'INTERFACCIA TRA FIBRE E CALCESTRUZZO

Nella campagna sperimentale condotta per questo lavoro di tesi, le fibre sono state ricavate mediante il semplice taglio delle corde da tennis esauste. Di conseguenza, gli elementi ottenuti presentano una geometria rettilinea e una superficie perfettamente liscia. In tale configurazione, l'aderenza tra fibra e matrice cementizia è affidata quasi esclusivamente all'attrito che si sviluppa all'interfaccia tra i due materiali. Tuttavia, le fibre sintetiche strutturali presenti in commercio sono dotate di superfici ruvide, indentature o ganci alle estremità proprio per migliorare l'ancoraggio ed evitare lo sfilamento sotto carico.



Figura 9-1: MAPEFIBRE ST30, particolare della struttura superficiale ad aderenza migliorata [12]

Le corde impiegate nella racchetta da tennis sono invece progettate per essere lisce e scivolose, col fine di favorire lo spin della pallina. Nel contesto cementizio, tuttavia, questa peculiarità rappresenta un limite, in quanto riduce l'ancoraggio meccanico e l'efficacia della fibra nel chiudere le fessure. Tale conformazione

superficiale è comunque in grado di fornire una certa aderenza all'interfaccia tra i materiali, come osservato dai diversi test di laboratorio effettuati per la ricerca in questione. Esistono però delle soluzioni indagabili per migliorare il legame all'interfaccia tra fibra e calcestruzzo e garantire dunque prestazioni migliori al materiale. Futuri sviluppi della ricerca potrebbero dunque indagare trattamenti specifici volti a incrementare la rugosità superficiale o a modificare la geometria delle fibre riciclate, ottimizzando così il trasferimento degli sforzi.

Il miglioramento dell'aderenza fibra-matrice può essere realizzato mediante specifici trattamenti superficiali. Da un lato, è possibile esplorare soluzioni chimiche come l'attacco acido o il plasma, capaci di rendere la superficie della corda più scabra. Dall'altro, più semplici da realizzare e testare sarebbero invece i trattamenti fisici basati sulle modifiche da apportare alla geometria superficiale, come ad esempio lo schiacciamento per formare una indentatura delle fibre, oppure la piegatura delle estremità a gancio.

Dunque, l'obiettivo delle future indagini potrebbe basarsi sul confronto tra i risultati ottenuti dalle miscele contenenti fibre ricavate dalle corde da tennis con superficie invariata (liscia), rispetto alle miscele contenenti fibre trattate superficialmente, al fine di valutare quanto l'incremento dell'aderenza possa influire positivamente sulle proprietà meccaniche complessive del calcestruzzo.

9.3 CAPACITÀ DI CONTROLLO DEL RITIRO DEL CALCESTRUZZO

Il presente lavoro ha confermato l'efficacia delle fibre di riciclo nel calcestruzzo indurito, evidenziandone la capacità di garantire duttilità residua post-fessurazione e di limitare l'apertura delle fessure sotto carico. Tuttavia, un promettente ambito di sviluppo futuro riguarda l'analisi del comportamento del materiale nelle prime fasi di maturazione. Com'è noto, la bassa resistenza a trazione del conglomerato cementizio lo rende particolarmente vulnerabile alle tensioni indotte dal ritiro plastico (nelle prime ore dal getto) e dal ritiro igrometrico (durante l'indurimento). La rapida evaporazione dell'acqua genera infatti stati tensionali interni che portano frequentemente alla fessurazione della matrice.

Analogamente alle fibre sintetiche industriali in polipropilene, già ampiamente utilizzate all'interno del calcestruzzo per ridurre la fessurazione da ritiro plastico, è ipotizzabile che anche le fibre polimeriche derivanti dalle corde da tennis possano

esercitare un'efficace azione di contrasto. È infatti logico supporre che le fibre riciclate possano agire come ponti attraverso le microfratture, in grado di prevenirne l'espansione e garantire una maggiore integrità del materiale sin dalle prime ore di vita. Un futuro sviluppo sperimentale potrebbe focalizzarsi sul valutare la capacità delle fibre riciclate di limitare l'apertura e l'estensione delle fessure generate dalla rapida evaporazione dell'acqua nelle prime 24 ore.

Dal punto di vista sperimentale la ricerca si baserebbe sull'impiego di slab test secondo le indicazioni della normativa ASTM-C1579 (Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking)[23]. La procedura prevede la realizzazione di lastre esposte a ventilazione forzata e temperature elevate, condizioni necessarie per accelerare l'evaporazione e indurre la fessurazione del calcestruzzo. Attraverso il confronto tra lastre di controllo non rinforzate e lastre contenenti le fibre ricavate dalle corde da tennis, sarebbe possibile quantificare il Crack Reduction Ratio (CRR), basandosi sulla misurazione della larghezza media delle fessure.

Un aspetto interessante riguarda l'influenza della geometria della singola fibra. Infatti, dato il diametro elevato delle corde rispetto alle microfibre tradizionali, è fondamentale indagare se la loro azione di cucitura sia efficace anche contro le microfessurazioni capillari o se il loro ruolo diventi predominante solo nel controllo dell'apertura delle macro-fessure nel ritiro impedito. Le prospettive di ricerca in questo ambito appaiono dunque numerose e promettenti per validare l'uso delle corde di riciclo.

9.4 IBRIDAZIONE CON ALTRE TIPOLOGIE DI FIBRE DI RINFORZO E

IMPIEGO IN ELEMENTI IN CALCESTRUZZO ARMATO

Un'ulteriore prospettiva di ricerca riguarda lo studio di sistemi di rinforzo ibrido, ottenuti combinando le fibre ottenute dal riciclo dalle corde da tennis con altre tipologie di fibre, in particolare quelle in acciaio. Tale sistema di rinforzo del calcestruzzo è definito HFRC (Hybrid Fiber Reinforced Concrete), e si basa sul principio di sfruttare la sinergia tra materiali con proprietà meccaniche e geometrie differenti al fine di ottimizzare il comportamento del calcestruzzo. Un sistema ibrido comporta l'instaurarsi di un rinforzo su più livelli: mentre le fibre di acciaio, caratterizzate da un'alta resistenza a trazione, intervengono principalmente nel controllo delle macro-fessure garantendo la capacità portante residua post

fessurazione, le fibre polimeriche derivanti dalle corde da tennis contribuiscono a ritardare l'innesco delle microfessure e a migliorare la duttilità del materiale.

Una futura campagna sperimentale potrebbe indagare diverse proporzioni di miscelazione per individuare il rapporto ottimale, tra fibre in acciaio e polimeriche, capace di massimizzare l'energia di frattura e la resistenza residua. In un sistema combinato, le fibre ricavate dalle corde da tennis fornirebbero un contributo fondamentale alla durabilità del materiale, mentre le fibre metalliche garantirebbero le prestazioni strutturali richieste per impieghi in elementi portanti. Tale sinergia permetterebbe di ridurre il quantitativo totale di fibre industriali di nuova realizzazione, sostituendole parzialmente con materiali di recupero.

Un'ulteriore prospettiva di ricerca scaturisce dalle evidenze emerse durante le prove a flessione effettuate. Sulla base di tali test, infatti, si è osservato che i campioni con un dosaggio maggiore di fibre, e quindi più performanti nel contenere le fessure, si assestano su un comportamento duttile post-fessurazione in corrispondenza di un allungamento all'intradosso di circa 0.5 mm. In questa fase, l'apertura della fessura viene registrata come un rapido incremento dell'allungamento fino al raggiungimento di tale valore di assestamento. Considerando l'utilizzo di una base di misura all'intradosso di lunghezza pari a 200 mm, un allungamento di 0.5 mm corrisponde a una deformazione del 2.5%. Si tratta dunque di un valore che supera il limite di snervamento dell'acciaio B450C tipicamente impiegato per le barre di armatura. Di conseguenza, il comportamento della struttura allo Stato Limite di Esercizio risulta circoscritto in un intervallo di allungamento all'intradosso compreso tra l'innesco della fessura (circa 0.1 mm) e 0.3 mm. Poiché in un elemento in calcestruzzo armato l'efficacia delle fibre nel limitare la fessurazione si esprime principalmente in questa fase, il campo di indagine di reale interesse applicativo si restringe proprio a tale intervallo di allungamento. Per approfondire tale dinamica, futuri sviluppi della ricerca potrebbero replicare le prove a flessione su provini debolmente armati. Ciò consentirebbe di osservare l'effettivo contributo delle fibre riciclate nel suddetto intervallo di fessurazione e di analizzarne in dettaglio la loro interazione meccanica con le barre.

10 CONCLUSIONI

La ridotta biodegradabilità dei materiali plastici di natura polimerica, ampiamente diffusi e impiegati in numerosi contesti, comporta la necessità di individuare possibilità di reimpiego per i rifiuti plastici di difficile smaltimento. Su tale presupposto si fonda la ricerca condotta, incentrata sul riciclo delle corde per racchette da tennis, le quali sono realizzate prevalentemente in poliestere o altri polimeri complessi e rientrano nell'ambito dei rifiuti plastici speciali, la cui valorizzazione sul territorio italiano è tuttora limitata a causa della carenza di tecnologie di recupero specifiche. Il quantitativo di rifiuti plastici complessi ottenuti dalle corde da tennis esauste è considerevole, in quanto esse sono soggette a frequenti sostituzioni da parte dei giocatori, talvolta dopo poche ore di utilizzo, non appena perdono la capacità di garantire prestazioni sportive ottimali.

Il presente lavoro di tesi ha avuto pertanto l'obiettivo di proporre una soluzione di riciclo economicamente sostenibile per le corde da tennis, al fine di conferire loro una seconda vita sfruttandone le prestazioni meccaniche residue. Nello specifico, si è indagata la possibilità di trasformare le corde in fibre polimeriche di rinforzo per il calcestruzzo, in virtù della loro geometria filiforme e di una composizione chimica affine a quella dei prodotti già commercializzati. La struttura di tali corde riciclate e il loro calibro ne consentono, infatti, la perfetta trasformazione in macrofibre sintetiche attraverso un semplice processo di taglio a misura adeguata.

L'efficacia del calcestruzzo fibrorinforzato si basa sulla capacità delle fibre di opporsi all'apertura delle fessure nella matrice cementizia, siano esse indotte dal ritiro della miscela nelle prime ore del getto o dalle sollecitazioni prodotte dai carichi applicati. Dunque, la ricerca svolta nasce dalla necessità di verificare che anche le fibre sintetiche ottenute dal riciclo delle corde delle racchette da tennis siano in grado di garantire l'effetto ponte che comporta la connessione tra i lembi della fessura, impedendone la propagazione.

Lo studio si è basato su una campagna sperimentale condotta in laboratorio, che ha compreso la fase di realizzazione delle miscele cementizie e i successivi test per caratterizzarne le prestazioni. Si è dunque svolto un lavoro pratico di ricerca, legato alla necessità di produrre le fibre dalle corde riciclate e di produrre anche le miscele cementizie nelle quale inserirle. L'attività pratica ha previsto, in primo luogo, la preparazione delle fibre a partire dalle corde riciclate. Il semplice taglio delle corde

in segmenti di diverse dimensioni ha rappresentato l'unica operazione necessaria per trasformare il rifiuto plastico e conferirgli la forma del nuovo prodotto. La lunghezza da assegnare alle fibre è stata definita analizzando le schede tecniche di prodotti industriali analoghi già presenti in commercio, si è optato dunque per la realizzazione di fibre aventi lunghezze pari a 20 mm e 30 mm. Parallelamente, lo studio della letteratura scientifica in materia di calcestruzzo fibrorinforzato ha fornito le informazioni necessarie per individuare le concentrazioni ottimali da impiegare.

La ricerca ha tenuto conto della vasta eterogeneità delle corde da tennis presenti in commercio, le quali differiscono per composizione, calibro e forma della sezione trasversale. Lo studio ha dunque analizzato anche l'influenza dalla tipologia di fibre sulle prestazioni della miscela di calcestruzzo fibrorinforzato. A tal fine, sono state testate sia configurazioni con fibre omogenee, derivate da un'unica tipologia di corda, sia miscele con fibre eterogenee, ricavate da corde di diversa natura aggregate in maniera casuale. L'indagine su quest'ultima configurazione è nata con l'obiettivo di verificare la fattibilità di un processo di riciclo diretto, che consenta di valorizzare il rifiuto omettendo la fase di selezione preliminare dei materiali.

Un'altra attività fondamentale ha riguardato la produzione del calcestruzzo, eseguito sulla base di un mix design accuratamente studiato. L'impasto è stato realizzato all'interno di una betoniera a bicchiere utilizzando calcestruzzo predosato per impieghi strutturali dotato di additivi superfluidificanti, a cui sono stati aggiunti aggregati lapidei e acqua. Al fine di garantire la comparabilità dei risultati, la matrice cementizia di base è stata mantenuta identica per ogni getto, confezionando lotti da 96 kg di conglomerato e variando esclusivamente la quantità di fibre inserita. Nello specifico, la ricerca preliminare ha condotto alla definizione di tre differenti dosaggi di rinforzo, espressi in percentuale rispetto al peso dell'impasto: 0.25%, 0.50% e 1.00%.

Ciascuna miscela, con specifica concentrazione e tipologia di fibra, è stata impiegata per la realizzazione di campioni aventi forme e dimensioni conformi alle indicazioni fornite dalle apposite linee guida. Nello specifico, il calcestruzzo fibrorinforzato realizzato è stato confezionato sotto forma di provini cubici per i test a compressione, cilindrici per quelle di trazione indiretta e prismatici per i test a flessione. Dunque, per ogni tipologia di miscela sono state effettuate delle prove con l'obiettivo di verificare come l'aggiunta di fibre riciclate influisse sul

comportamento meccanico del materiale, confrontando i risultati ottenuti con i valori di riferimento di un calcestruzzo ordinario privo di rinforzo. Tutti i provini sono stati sottoposti a un adeguato ciclo di stagionatura di 28 giorni, come prescritto dalle norme di prodotto, per poi essere testati presso il laboratorio MASTRLab del Politecnico di Torino.

Se le prove di compressione e trazione indiretta hanno permesso di ricavare, rispettivamente, la resistenza a compressione media e il carico di picco sopportabile dal provino cilindrico, particolare rilevanza è stata attribuita ai test di flessione. Questi ultimi, infatti, consentono di quantificare il reale contributo strutturale fornito delle fibre, descrivendo il legame costitutivo tra le tensioni residue generate e l'entità di apertura delle fessure.

I risultati ottenuti dalla campagna di test hanno confermato l'effetto migliorativo fornito dall'aggiunta di tali fibre riciclate al comportamento meccanico del calcestruzzo. L'analisi dei dati ha permesso di evidenziare come le prestazioni siano strettamente dipendenti dalla tipologia di fibra e, in particolar modo, dalla concentrazione impiegata nell'impasto. Nello specifico, l'analisi comparativa delle diverse miscele ha permesso di definire la configurazione ottimale di rinforzo fibroso. Per quanto concerne il comportamento a compressione, si sono registrate variazioni contenute tra le diverse miscele, in linea con le indicazioni delle linee guida che considerano un calcestruzzo fibrorinforzato a compressione facendo riferimento direttamente alla resistenza caratteristica del calcestruzzo privo di fibre. Da tali test si è comunque registrato un miglioramento prestazionale, rispetto ai valori di riferimento, per le miscele rinforzate con una concentrazione di fibre pari allo 0.25% in peso. Osservando un andamento decadente della resistenza all'aumentare della concentrazione, evidenziando dunque una situazione sfavorevole a compressione nel caso di un quantitativo eccessivo di fibre. Concentrandosi dunque sul dosaggio ottimale, si è osservato che né la tipologia e né la lunghezza delle fibre impiegate influenzano in modo determinante la risposta a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato. A differenza dei dosaggi elevati, condizione in cui l'utilizzo di fibre da 2 centimetri garantisce una resistenza a compressione superiore rispetto alla configurazione con fibre più lunghe.

A differenza di quanto rilevato nei test a compressione, i risultati delle prove a trazione hanno mostrato una forte dipendenza dalla tipologia e dalla lunghezza della fibra a parità di dosaggio, definendo come configurazione più performante

quella costituita da fibre omogenee tagliate a 30 mm. Tuttavia, è necessario notare che anche nel caso di risposta a trazione il dosaggio di fibre influisce molto sui risultati. Anche in tal caso si è osservato il picco prestazionale per la concentrazione dello 0.25%, seguito da un netto decadimento per i dosaggi maggiori, fino al totale annullamento dell'effetto benefico in corrispondenza del quantitativo massimo pari all'1.00% in peso. In definitiva, si può affermare che il comportamento a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato prodotto dipende da diversi fattori relativi al tipo di rinforzo impiegato. Oltre al dosaggio, infatti, sia la lunghezza sia l'omogeneità delle fibre influenzano in modo determinante la risposta meccanica del composito.

I risultati delle prove a flessione si sono rivelati fondamentali per valutare la sinergia tra le fibre riciclate e la matrice cementizia. Tutte le miscele prodotte hanno esibito un comportamento duttile, a chiara dimostrazione dell'efficacia delle fibre nel contrastare la propagazione del quadro fessurativo. Da queste prove è emerso che la risposta flessionale dei campioni non è significativamente influenzata dalla tipologia o dalla lunghezza della singola fibra. Il parametro determinante per le prestazioni è risultato essere il dosaggio: in particolare, la miscela più performante è stata quella con la concentrazione massima, pari all'1.00% in peso. Per quest'ultima, infatti, è stato possibile definire e assegnare una specifica classe prestazionale al calcestruzzo fibrorinforzato prodotto.

I risultati della campagna sperimentale hanno dunque confermato la fattibilità tecnica dell'impiego di corde da tennis esauste come rinforzo fibroso nelle matrici cementizie. Tuttavia, il presente lavoro si è concentrato prevalentemente sulla capacità di tali fibre di incrementare il comportamento duttile del calcestruzzo sotto carico e di contrastare l'apertura delle fessure. Restano pertanto da indagare i molteplici e ulteriori benefici derivanti da questo sistema di rinforzo. Le corde riciclate sono costituite da materiali tecnici di alta qualità, composti da polimeri dotati di eccellenti proprietà fisico-chimiche, i quali consentono molteplici scenari applicativi da indagare.

Tra i futuri sviluppi di maggiore interesse spicca l'impiego di queste fibre sintetiche per migliorare la resistenza al fuoco del calcestruzzo. È infatti già noto come le fibre polimeriche ottimizzano il comportamento del conglomerato alle alte temperature. Fondendo, esse creano una rete di cavità interne che agevolano la fuoriuscita del vapore acqueo in pressione. Considerando che i polimeri costituenti le corde da tennis presentano un punto di fusione compreso tra i 160 e i 200 °C, risulta fondata

l'ipotesi che il loro inserimento nella miscela possa prevenire efficacemente il fenomeno dello spalling esplosivo, prolungando così la resistenza strutturale in caso di incendio. Altre possibilità di ricerca introdotte riguardano la struttura della singola fibra, la quale può essere tratta superficialmente per incrementare l'aderenza con la matrice. Risulta inoltre di grande interesse lo studio di sistemi di rinforzo ibridi, in cui le fibre polimeriche di riciclo vengano combinate con fibre metalliche per massimizzare le prestazioni meccaniche complessive. Infine, anche mantenendo la semplice lavorazione per taglio adottata in questa sede, sarebbe opportuno valutare l'efficacia di tali fibre nel mitigare la formazione di fessure da ritiro plastico nelle prime ore di maturazione del getto.

In conclusione, il reimpiego delle corde da tennis come rinforzo fibroso nel calcestruzzo si è rivelato una soluzione di riciclo efficace e a ridotto impatto ambientale. Lo studio ha inoltre permesso di definire la configurazione ottimale delle fibre e il dosaggio più idoneo per massimizzare le prestazioni del composito cementizio.

Il calcestruzzo fibrorinforzato così ottenuto si distingue per la sua spiccata sostenibilità, basandosi sulla trasformazione di un rifiuto plastico complesso in una risorsa di alto valore aggiunto. Le corde così reimpiegate incarnano perfettamente i fondamenti dell'economia circolare, basati sul fornire una seconda vita e una rapida possibilità di riutilizzo a un elemento tecnico che ha ancora un elevato potenziale da esprimere al di fuori dei campi da tennis.

11 BIBLIOGRAFIA

- [1] Fib Bulletin No.55, «Model Code 2010». 2010.
- [2] Consiglio superiore dei lavori pubblici, «Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio o polimeriche», mag. 2022.
- [3] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Norme tecniche per le costruzioni (NTC2018)*. 2018.
- [4] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Circolare esplicativa per l'applicazione delle NTC2018*. 2019.
- [5] J. J. Chopoñan Inoñan *et al.*, «Influence of polypropylene fibers on the microstructure and physical and mechanical properties of concrete», *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 9, fasc. 12, p. 488, dic. 2024, doi: 10.1007/s41062-024-01805-x.
- [6] J. Wang *et al.*, «Investigation on Shrinkage Characteristics of Polyester-Fiber-Reinforced Cement-Stabilized Concrete Considering Fiber Length and Content», *Buildings*, vol. 13, fasc. 4, p. 1027, apr. 2023, doi: 10.3390/buildings13041027.
- [7] F. Wu *et al.*, «Experimental and theoretical investigations on flexural performance of hybrid fiber reinforced ECC-NC composite beams», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 20, p. e03178, lug. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03178.
- [8] I. Bentegri, O. Boukendakdji, E.-H. Kadri, T. T. Ngo, e H. Soualhi, «Rheological and tribological behaviors of polypropylene fiber reinforced concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 261, p. 119962, nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119962.
- [9] R. Rostami, M. Zarrebini, M. Mandegari, K. Sanginabadi, D. Mostofinejad, e S. M. Abtahi, «The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 97, pp. 118–124, mar. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.012.
- [10] GrasCalce, «Scheda tecnica BetonPiu».
- [11] Crawford Lindsey, Tennis Warehouse, San Luis Obispo, CA, 93401, «String Stiffness — The Alpha and Omega of String Performance».
- [12] MAPEI, «Scheda tecnica MAPEFIBRE ST30».
- [13] ISOPLAM, «Scheda tecnica PLAM FIBRE».
- [14] UNI- Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 14889-2:2006 Fibre per calcestruzzo - Fibre polimeriche - Definizioni, specificazioni e conformità*.
- [15] UNI- Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 14651:2007 Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione della resistenza a trazione per flessione*.
- [16] P. Nervi, «Costruire correttamente».
- [17] servizio tecnico centrale Consiglio superiore dei lavori pubblici, «Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)». novembre 2021.
- [18] UNI- Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12390-3:2019 Prove sul calcestruzzo indurito: Resistenza alla compressione dei provini*.
- [19] UNI- Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12390-4:2019 Prove sul calcestruzzo indurito: Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova*.
- [20] UNI- Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12390-6:2024 Prove sul calcestruzzo indurito: Resistenza a trazione indiretta dei provini*.

- [21] P. Mehrabi, U. Dackermann, R. Siddique, e M. Rashidi, «A Review on the Effect of Synthetic Fibres, Including Macro Fibres, on the Thermal Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete», *Buildings*, vol. 14, fasc. 12, p. 4006, dic. 2024, doi: 10.3390/buildings14124006.
- [22] E. Miceli, E. Santagata, P. P. Riviera, D. Dalmazzo, e H. Mozhgam, «Comportamento a fatica di conglomerati bituminosi contenenti fibre di ricicloda corde da tennis esauste», Politecnico di Torino.
- [23] ASTM International, *ASTM C1579-21 - Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete*.
- [24] S. Cho, A. C. Bordelon, e M. O. Kim, «Effects of Macro Fibers on Crack Opening Reduction in Fiber Reinforced Concrete Overlays», *Polymers*, vol. 16, fasc. 16, p. 2282, ago. 2024, doi: 10.3390/polym16162282.
- [25] C. G. Christopher, R. Gopal, S. Sadasivam, A. K. Devi Keerthika Esakki, e P. Dinesh Kumar, «Experimental Toughness and Durability Evaluation of FRC Composite Reinforced with Steel–Polyester Fiber Combination», *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 17, fasc. 1, p. 39, lug. 2023, doi: 10.1186/s40069-023-00599-z.
- [26] P. Hiremath e S. C. Yaragal, «Performance of polypropelene and polyester fibres-reinforced reactive powder concretes at elevated temperatures», *Constr. Build. Mater.*, vol. 373, p. 130862, apr. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130862.

12 SITOGRAFIA

- (1):«Orobor is Recycling Tennis String into a Stylish Solution | Innovate@BU». <https://www.bu.edu/innovate/orobor-is-recycling-tennis-string-into-a-stylish-solution/>
- (2):«Velociti Biodegradable Tennis Strings», Velociti Sporting Goods. <https://velocititenis.com/pages/catalyst-biodegradable-string>
- (3):«ReTurn, il tennis è sostenibile: con una pallina si fanno due scarpe», Supertennis. <https://www.supertennis.tv:443/News/Eventi-internazionali/ReTurn-riciclo-palline-tennis-Nitto-ATP-Finals>
- (4): «Tennis Warehouse University»
https://twu.tenniswarehouse.com/learning_center/index.php
- (5):«Tennis Strings | Babolat Official Website», Babolat US»
<https://www.babolat.com/us/tennis/strings.html>
- (6): C. Agency, «Hyper Strings | Corde da Tennis sviluppate da Andrea Candusso»
<https://hyperstrings.it/>
- (7):«Strings - Badminton - Yonex.com». <https://www.yonex.com/badminton/strings>
- (8):«Solingo® – Performance Engineered Equipment». <https://solincosports.com/>
- (9):«Tecnifibre». <https://www.tecnifibre.com/en>
- (10):«Shop Tennis Strings | Wilson Sporting Goods». <https://www.wilson.com/it-it/tennis/tennis-strings>

13 APPENDICE

Di seguito vengono riportate alcune immagini che ripercorrono le attività svolte: dalla produzione di fibre e miscele cementizie fino ai test sul materiale finito.

Figure 13-1: operazioni di taglio delle corde riciclate e fibre prodotte



Figure 13-2: materiali utilizzati e produzione della miscela fibrorinforzata



Figure 13-3: produzione dei campioni per i test



Figure 13-4: esecuzione delle prove di compressione, flessione e trazione indiretta



Figure 13-5: vista delle fibre all'interno dei campioni post rottura

