



# Una revisione critica sulle barre polimeriche rinforzate con fibra di vetro come rinforzo negli elementi flessionali

Trupti Amit Kinjawadekar <sup>1</sup>, Shantharam Patil <sup>1</sup> · Gopinatha Naya <sup>2</sup>

Received: 8 October 2022 / Accepted: 23 March 2023 / Published online: 17 April 2023 © The Author(s) 2023

## Abstract

A partire dall'Ottocento, il cemento armato si è evoluto come materiale fondamentale per l'edilizia. Questo popolare materiale composito è ampiamente utilizzato in diverse tipologie di edifici. Tuttavia, il decadimento dell'armatura in acciaio dovuto alla corrosione è identificato come un ostacolo che può influire sulla qualità delle strutture in cemento armato. In riferimento a ciò, la barra in polimero rinforzato con fibra di vetro (GFRP) è essenziale per le sue proprietà di resistenza alla corrosione. I ricercatori hanno eseguito vari test e analisi numeriche per conoscere la risposta degli elementi flessionali rinforzati con GFRP nel taglio e nella flessione. Sulla base di studi condotti nell'ultimo decennio, questo studio analizza criticamente la risposta di elementi flessionali rinforzati con barre in polimero rinforzato con fibra di vetro (FRP). La comprensione del comportamento della barra FRP come materiale di rinforzo alternato sarà aiutata da questa revisione. Poiché la barra in PRFV ha un'elevata resistenza e nessun punto di snervamento, le caratterizzazioni convenzionali della duttilità potrebbero non essere applicabili per determinare se i componenti in calcestruzzo rinforzato con GFRP sono duttili. Pertanto, è necessario uno studio dettagliato per comprendere il comportamento di tali strutture. Questo articolo esplora varie proprietà delle travi rinforzate con GFRP per apprezzare le applicazioni del rinforzo in GFRP negli elementi flessionali.

## Introduzione

Nelle strutture in cemento armato, qualità, design e resistenza sono caratteristiche salienti. Il calcestruzzo ha una buona resistenza alla compressione ed è debole in tensione. A causa della sua resistenza alla compressione, il calcestruzzo è stato inizialmente utilizzato in costruzioni massicce e semplici come pilastri di ponti, fondazioni e muri pesanti. Dopo la rivoluzione industriale, i progettisti hanno preferito utilizzare barre d'armatura principalmente in acciaio per costruire elementi in calcestruzzo per rafforzarlo e migliorare la sua capacità di sopportare sollecitazioni di trazione. Questa tendenza innovativa ha portato allo sviluppo del cemento armato (RCC). Una volta evoluta la tecnica di rinforzo, le barre d'acciaio sono state utilizzate principalmente per rinforzare le strutture in calcestruzzo. Questo materiale composito si è apprezzato per la sua capacità di carico [1]. Il calcestruzzo può resistere bene alla compressione e proteggere la corrosione delle barre di acciaio per cemento armato perché l'acciaio può arrugginire a causa dell'alcalinità. Inoltre, il calcestruzzo ben stagionato e adeguatamente compattato con un rapporto inferiore di cemento acquoso ha una minore permeabilità, il che si traduce in una riduzione al minimo della penetrazione di agenti che inducono la corrosione sulla superficie dell'acciaio. Si osserva che, di solito, la corrosione dell'acciaio durante la sua vita di progetto non è un problema importante nelle strutture ben mantenute. Se i requisiti di resistenza e stabilità non vengono presi in considerazione nella pratica, la corrosione delle barre d'acciaio nel calcestruzzo

cementizio è stata osservata come una preoccupazione comune di ridurre la resistenza in diverse strutture in c.a. negli ultimi anni, specialmente in un ambiente aggressivo [2, 3]. È considerato il principale problema di durabilità, soprattutto quando l'armatura è a contatto con cloruri provenienti da ingredienti di calcestruzzo o dalla situazione adiacente [2]. In presenza di umidità, la miscela di cloruri (depassivazione dell'acciaio) e CO<sub>2</sub> (carbonatazione del calcestruzzo) provoca corrosione. Tale corrosione delle barre porta al deterioramento del calcestruzzo e alla perdita di funzionamento efficiente di un assieme. All'inizio del XX secolo, la corrosione indotta dagli ioni cloruro è stata la causa del deterioramento di molte strutture RCC [4]. Sono stati presi in considerazione diversi modi di utilizzare l'acciaio e di ridurre la corrosione in ambienti difficili [5]. Il rivestimento epossidico e la protezione catodica sono solitamente consigliati per ridurre la corrosione delle barre d'acciaio [6]. In generale, verranno effettuate regolarmente valutazioni e manutenzioni delle strutture rinforzate in acciaio per verificare eventuali requisiti di riparazione per la resistenza alla corrosione [4, 5]. Nel corso del tempo, per evitare la corrosione dell'armatura in acciaio, l'FRP si è evoluto come barra d'armatura che può essere utilizzata al posto delle barre d'acciaio [6,7,8,9,10]. FRP è costituito da fibre ad alta sollecitazione di piccolo diametro in una matrice di resina polimerica. La fibra conferisce resistenza e rigidità ai compositi, mentre la matrice di resina offre la trasmissione delle sollecitazioni tra le fibre e funge da adesivo tra il calcestruzzo e il laminato del composito [11]. Un FRP può avere un'elevata resistenza alla tensione e non può cedere con l'orientamento delle fibre utilizzate per il rinforzo. Le fibre comunemente usate nelle barre FRP sono aramide, carbonio e vetro. Questo studio si concentra sulla comprensione della risposta delle barre FRP in vetro. Sotto tensione, le barre in PRFV presentano caratteristiche lineari di sollecitazione-deformazione; ma non sono duttili e possiedono un modulo elastico inferiore, a differenza delle barre d'acciaio [10]. Di conseguenza, il rinforzo FRP non è suggerito quando è necessaria la redistribuzione del momento. Le barre FRP contenenti fibre di rinforzo possono sostituire le barre d'acciaio in numerose strutture in calcestruzzo, in particolare quelle in un ambiente marino. Il principale svantaggio della sezione rinforzata con GFRP è che è soggetta a cedimenti fragili; il rinforzo ibrido con fibre può essere considerato per risolvere il problema di tale cedimento [8,9,10,11,12,13]. Anche diverse strutture marittime e uffici industriali sono soggetti a corrosione [14] a causa di un ambiente aggressivo [15,16,17]. La ricerca è stata condotta per raccomandare un sostituto dell'acciaio con la barra polimerica rinforzata con varie fibre, in particolare la barra polimerica rinforzata con fibra di vetro [18]. Si tratta di un'innovativa barra complessa [19] composta da resina epossidica e fibre di vetro.

Un paese in via di sviluppo come l'India richiederà diversi progetti infrastrutturali. Le infrastrutture includono ponti, dighe, strade e altre strutture marine. La ricerca mostra che, rispetto ai materiali convenzionali per tali usi costruttivi, la combinazione di fibre strutturali ad alta rigidità e ad alta resistenza con polimeri a basso peso, a basso costo e resilienti all'ambiente si tradurrà in materiali compositi durevoli [13, 20]. All'inizio del diciannovesimo secolo, i materiali FRP sono stati presi in considerazione per lo sviluppo di strutture temporanee e infrastrutture [18, 21]. Inizialmente, i materiali compositi erano molto costosi. Molti studi sono stati condotti per evidenziare l'importanza dei compositi FRP [22]. La resistenza alla trazione è una considerazione significativa nell'applicazione dei compositi FRP nell'edilizia [23]. È necessario uno studio dettagliato sull'efficienza dei costi e sulla resistenza al fuoco per comprendere l'applicazione delle barre FRP nell'edilizia. Gli FRP hanno un'eccellente resistenza alla corrosione [24] e resistenza in ambienti alcalini, chimici e difficili; Tuttavia, le loro proprietà meccaniche e le proprietà combustibili vengono influenzate considerevolmente a temperature elevate a causa delle proprietà della resina della matrice [25]. Mohamed Saafi ha studiato che la copertura in calcestruzzo influisce in modo significativo sulla temperatura dell'FRP e che sono necessari circa 70 mm di copertura per le strutture rinforzate con FRP per renderle resistenti al fuoco [26]. I ricercatori hanno anche presentato modelli numerici per comprendere il comportamento degli elementi strutturali rinforzati con FRP sotto il fuoco. L'analisi agli elementi finiti (FE) presentata da Duan et al. ha previsto con precisione la risposta termica delle strutture in calcestruzzo armato con FRP [27]. Il modello FE presentato in questa ricerca ha anche previsto il cedimento dell'ancoraggio degli elementi rinforzati con FRP ad alta temperatura, che era una modalità tipica di guasto nei test antincendio discussi in letteratura. T. Morgado et al. hanno presentato uno studio sulle colonne in GFRP incorporate nelle pareti divisorie e nelle facciate degli edifici rendendole resistenti al fuoco [28]. Il retrofit frequente per mantenere gli elementi in calcestruzzo armato d'acciaio danneggiati dalla corrosione può portare a costi di manutenzione più elevati [29]. In quest'ottica, la barra FRP può essere considerata come un sostituto del rinforzo interno per ridurre i costi di

manutenzione [30]. Ulteriori studi propongono elementi in calcestruzzo a flessione e compressione con rinforzo in GFRP, che potrebbero essere utilizzati per progettare la struttura in ambiente marino dove la corrosione dell'acciaio è la preoccupazione principale. Nel presente studio, si cerca di valutare la risposta degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzati con GFRP in flessione. Vengono studiate varie proprietà degli elementi flessionali rinforzati con FRP in vetro. Una breve rassegna delle varie proprietà degli elementi flessionali rinforzati con GFRP aiuterà a comprendere la risposta di queste armature.

## Barra in polimero fibrorinforzato

La barra in polimero rinforzato con fibre, popolarmente nota come barra FRP [31], può essere prodotta utilizzando fibre ininterrotte racchiuse nella matrice di resina polimerica [32]. Lo scopo principale di una fibra è quello di trasportare un carico e la resina fungerà da materiale legante [33, 34], che trasferisce questo carico alle fibre [27, 28]. Le fibre sono protette dalla resina. La frazione e la quantità appropriate di fibre influenzano considerevolmente la rigidità e la resistenza dell'FRP, mentre il tipo di resina utilizzato può influenzare la tenacità alla frattura e il meccanismo di rottura [18, 21]. Un FRP è prodotto utilizzando diversi metodi come l'estrusione, la tessitura e l'intreccio ed è anisotropo. La velocità di polimerizzazione della resina, l'orientamento delle fibre, il metodo di produzione e il controllo di qualità nella produzione sono tutte variabili che influenzano le caratteristiche della barra [19, 35]. Uno dei vantaggi dell'utilizzo di una barra in GFRP è che è più leggera della barra d'acciaio [36,37,38] e ha una maggiore resistenza e non è corrosiva [22,23,24, 39]. L'opzione migliore è quella di utilizzare barre in PRFV, soprattutto nelle applicazioni marine [36, 40, 41]. Come mostrato in Fig. 1, GFRP è una barra composta increspata con fibre di vetro incorporate in una resina epossidica polimerica di lunga durata [42, 43].



Figure 1- GFRP bars

La sollecitazione di adesione, il modulo elastico e la risposta sotto sforzo sono le caratteristiche meccaniche vitali da considerare quando si utilizza l'armatura in GFRP nei componenti di flessione [44]. La relazione lineare sforzo-deformazione, come illustrato in Fig. 2 fino al cedimento, mostra il comportamento delle barre in PRFV sotto tensione [45].

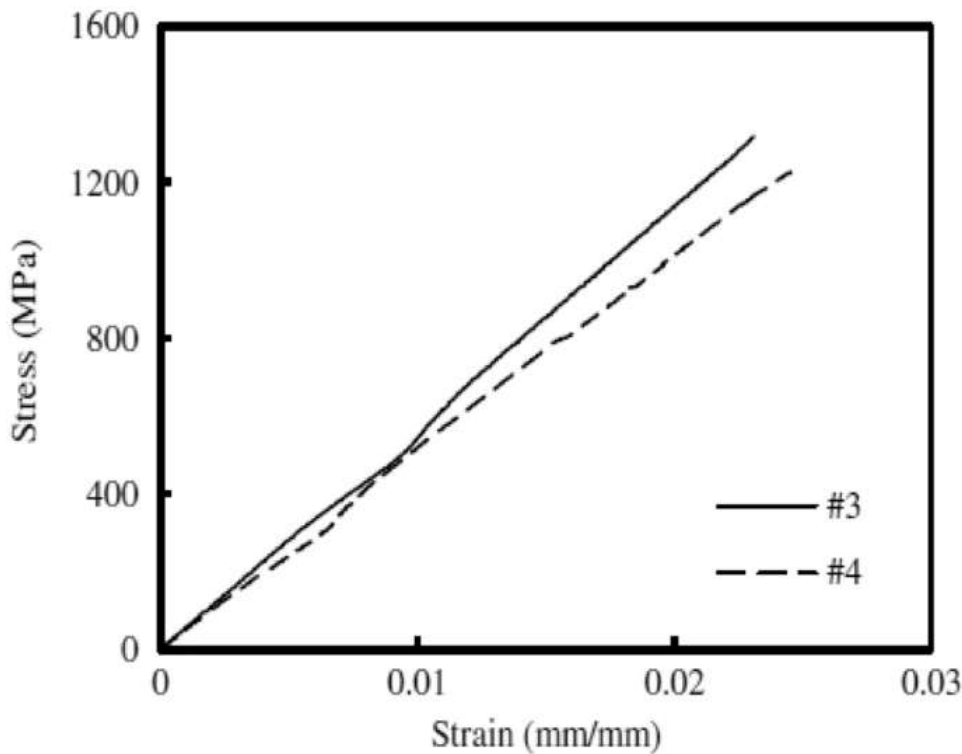


Figure 2- GFRP bars stress–strain curve [46]( Curva sforzo-deformazione delle barre in PRFV [46])

La trave rinforzata con GFRP è spesso eccessivamente rinforzata, con conseguente rottura fragile senza preavviso [30,31,32,33,34]. Può essere considerato uno svantaggio dell'utilizzo di barre in PRFV. Inoltre, a causa del basso modulo di elasticità [28], gli elementi rinforzati con GFRP mostrano deformazioni più significative e crepe più ampie rispetto alle travi e ai pilastri rinforzati con rinforzi in acciaio di sezione e area trasversali simili. Una forma elicoidale nelle barre può migliorare la duttilità degli elementi rinforzati con FRP. Inoltre, l'uso di fibre può regolare efficacemente la deflessione e l'ampiezza della fessura [37, 47]. La tabella 1 indica la costante elastica ( $E_f$ ) e resistenza alla trazione ( $f_t$ ) per barre in PRFV utilizzate in vari studi sperimentali. Si osserva che la resistenza alla trazione di queste barre è superiore a quella delle barre d'armatura in acciaio. Si osserva inoltre che le barre in PRFV sono molto efficaci nel processo di riparazione delle strutture rinforzate, danneggiate dalla corrosione [35]. Queste armature possono migliorare drasticamente la resistenza alla flessione della sezione danneggiata e aumentare la resistenza della malta [35]. È stato eseguito un test di carico in loco per confermare il comportamento della struttura riparata. I ricercatori hanno condotto studi costanti per scoprire altre misure efficaci per superare la perdita dovuta al costo di riparazione delle strutture in calcestruzzo [36, 42, 48]. Si osserva che le fibre polimeriche e le armature, come il carbonio, l'aramide [49] e il GFRP, sono eccezionali per la riparazione e il rafforzamento degli elementi in calcestruzzo a causa delle loro eccezionali proprietà fisiche e meccaniche [30, 31].

**Tabella 1 Riepilogo delle proprietà: Armatura in PRFV utilizzata in studi precedenti**

Referenze	Ø(mm)	ft(MPa)	Ef(GPa)
[50]	9.5, 19 e 28.5	700	48
[51]	12.5	664	34.2
[52]	12.9	740	40
[53]	12 e 16	1000	60
[54]	9.5	1100	52.5
[55]	13	941	48.1
[46]	4	1200	50
[56]	4 e 8	620	41
[57]	10	1090	51.6
[58]	12	1000	60
[59]	12	660	44.25
[60]	12	930	40
[61]	16	1184	62

Ø: Diametro; ft= Resistenza massima alla trazione, Ef: Modulo elastico

**Table 2** Summary of experimental studies carried out on GFRP-RC beams

References	$f_c$ (MPa)	No. of Specimens	Area of Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Concrete Grade	Tension Reinforcement		Hanger Bars		Stirrups		Load at firstCrack $W_c$ (kN)	Ultimate Load $W_u$ (kN)	Failure Mode			
					Type	$\phi$ (mm)	Ratio (%)	Type	$\phi$ (mm)	Type				$\phi$ (mm)	S (mm)	
[62]	740	6	114 × 153	30	STR	10	1.47	ST	5	STR	5	38	15	75.6	T	
					GFR	10	1.82	–	–	–	–	–	–	14.8	34.7	S
					GFR	16	1.82	ST	5	STR	5	40	55	62.1	62.1	T
					GFR	16	2.73	–	–	–	–	–	–	55	69.7	S
[63]	760	7	150 × 200	30	STR	10	0.81	ST	10	STR	6	100	30	39.3	SYCC	
					GFR	9.53	0.59	ST	10	STR	6	100	7	34.2	BF	
					GFR+STR	10	0.59	ST	10	STR	6	100	35	63.5	CC	
					GFR+STR	10	0.89	ST	10	STR	6	100	40	65.9	CC	
					GFR	9.53	0.59	ST	10	STR	6	100	7	36.4	GR	
					GFR+STR	10	0.59	ST	10	STR	6	100	30	60.3	CC	
[64]	970	5	180 × 250	65	GFR+STR	10	0.89	ST	10	STR	6	100	4.2	77.3	SF	
					STR	16.8	1.25	ST	6	STR	8	130	7.2.85	299.20	CC	
					GFR	10	0.85	ST	6	STR	8	130	74.05	174.24	BF	
					GFR	10	0.85	ST	6	STR	8	130	71.75	168.96	BF	
					STR	16	1.20	ST	6	STR	8	130	56.86	294.53	CC	
					GFR	10	0.90	ST	6	STR	8	130	58.03	194.57	BF	
[53]	1000	6	190 × 190	50	GF	12	0.99	ST	6	STR	8	70	15	127.4	CC	
					GFR	16	1.78	ST	6	STR	8	70	20	150.2	SY & CC	
[65]	600	9	200 × 250	20	STR	25	2.07	–	–	–	–	–	–	252.7	CC & GR	
					GFR	16	0.89	GF	10	STR	6	100	30	81.52	CC & GR	
					GFR	20	1.25	–	–	–	–	–	–	35	90	–
					GFR	24	1.80	–	–	–	–	–	–	30	105	–
					GFR	16	0.89	–	–	–	–	–	–	35	115	–
					GFR	20	1.25	–	–	–	–	–	–	35	135	–
[66]	1000	6	100 × 150	80	GFR	24	1.80	–	–	–	–	–	40	145	–	
					GFR	6	0.5	GF	6	STR	4	50	3.1	15	GR	
					GFR	10	1.00	–	–	–	–	–	–	3.8	33	CC
					GFR	12	2.00	–	–	–	–	–	–	4.0	46.1	CC
					GFR	6	0.50	–	–	–	–	–	–	3.3	16.2	GR
					GFR	12	2.00	–	–	–	–	–	–	3.0	52.2	CC

$f_c$ : Tensile Strength of GFRP Bar;  $\phi$ : Dia of Reinforcement; S: spacing; GFR: GFRP Rebar; STR: Steel Rebar  
 Mode of failure—T: Tension; C: Compression; S: Shear; SC: Shear and Compression; GR: GFRP Rupture; CC: Concrete Crushing; SY: Steel Yielding; and BF: Bond Failure

Referenze	ft (MPa)	N° di Esemplari	Area di Sezione trasversale (mm <sup>2</sup> )	Grado di calcestruzzo	Rinforzo di tensione			Barre appendiabiti		
					Digitare	Ø (mm)	Rapporto (%)	Digitare	Ø (mm)	Digitare
<a href="#">[62]</a>	740	6	114 × 153	30	STR	10	1.47	SAN	5	
					GFR	10	1.82	–	–	
					GFR	16	1.82	SAN	5	
					GFR	16	2.73	–	–	
<a href="#">[63]</a>	760	7	150 × 200	30	STR	10	0.81	SAN	10	
					GFR	9.53	0.59	SAN	10	
					GFR + STR	10	0.59	SAN	10	
					GFR + STR	10	0.89	SAN	10	
				50	GFR	9.53	0.59	SAN	10	
					GFR + STR	10	0.59	SAN	10	
					GFR + STR	10	0.89	SAN	10	
<a href="#">[64]</a>	970	5	180 × 250	65	STR	16,8	1,25	SAN	6	
					GFR	10	0.85	SAN	6	
					GFR	10	0.85	SAN	6	
	470			35	STR	16	1.20	SAN	6	
					GFR	10	0.90	SAN	6	
<a href="#">[53]</a>	1000	6	190 × 190	50	S.E.	12	0.99	SAN	6	
					GFR	16	1.78	SAN	6	
					STR	25	2.07			
<a href="#">[65]</a>	600	9	200 × 250	20	GFR	16	0.89	S.E.	10	
					GFR	20	1.25			
					GFR	24	1.80			
				40	GFR	16	0.89			
					GFR	20	1.25			
					GFR	24	1.80			
<a href="#">[66]</a>	1000	6	100 × 150	80	GFR	6	0.5	S.E.	6	
					GFR	10	1.00			
					GFR	12	2.00			
				120	GFR	6	0.50			
					GFR	12	2.00			



# Panoramica della letteratura

## Comportamento flessionale

Per comprendere l'uso del vetro FRP come rinforzo nella struttura, vengono condotti vari studi sperimentali da ricercatori e ingegneri di tutto il mondo. Questa sezione fornisce una panoramica dei principali studi sperimentali su tali membri negli ultimi dieci anni. I risultati degli studi sperimentali sono riportati nella Tabella 2.

Bazli [67] ha studiato e testato assemblaggi RCC con barre ibride rinforzate, scoprendo che la nuova tecnica di rinforzo presenta caratteristiche di sollecitazione-deformazione bilineari che possono essere implementate in nuove strutture in calcestruzzo. Inoltre, le barre rinforzate ibride [68] superano il rinforzo tradizionale in termini di peso, resistenza alla corrosione e resistenza; Inoltre, le prove di trazione mostrano caratteristiche lineari di sollecitazione-deformazione. Il fascio può resistere a una deformazione più significativa rispetto alla deformazione anelastica durante i test [69]. Sono stati condotti studi sulla sollecitazione di taglio degli elementi rinforzati con GFRP [70] ed è stato scoperto che il rinforzo longitudinale ha poche conseguenze sulla capacità di taglio nelle travi rinforzate con GFRP con vari rapporti. Di conseguenza, le solite equazioni razionali possono essere utilizzate per approssimare la resistenza al taglio.

Al contrario, durante la deformazione a taglio, le travi rinforzate con GFRP sono state osservate parallele alle travi in c.a. con rinforzo in acciaio. Inoltre, è stato notato che la resistenza al taglio è inferiore nelle travi di rinforzo in GFRP rispetto alle travi di barre d'armatura in acciaio [66]. La ragione principale della minore capacità di taglio degli elementi in GFRP-RC rispetto agli elementi in acciaio RC è il loro modulo di elasticità inferiore che porta a una minore profondità del blocco di compressione e a un interblocco dell'aggregato più debole. È stata proposta un'equazione della sollecitazione di taglio alla luce dei dati ricevuti dall'analisi sperimentale sull'elemento rinforzato con acciaio, risultato non conservativo nelle travi che utilizzano l'armatura in GFRP [71]. Sono stati testati sette elementi rettangolari flessionali RC, ciascuno con rinforzo in GFRP e armature in acciaio (armatura ibrida). Due diversi tipi di armature in due strati diversi sono stati utilizzati vicino alla faccia di trazione della trave. Inoltre, si formano due miscele di calcestruzzo con valori di resistenza rispettivamente di 30 MPa e 50 MPa [63]. Esperimenti con la flessione a quattro punti sono stati eseguiti sull'elemento flessionale, mostrato in Fig. 3, per la campata di 2,1 m.

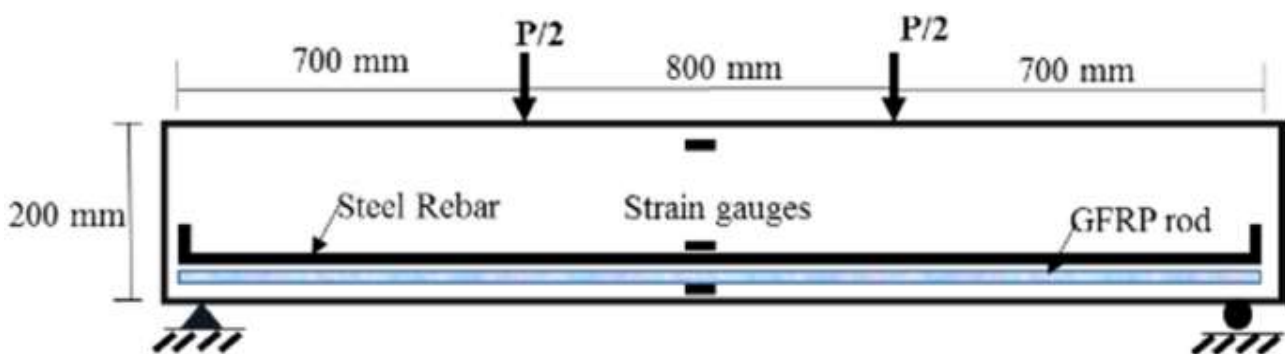


Figure 3: Provino

È stato testimoniato che il cedimento della trave è stato causato da un'elevata deflessione. L'elemento flessionale rinforzato con sole barre in GFRP ha mostrato che con un carico di 7 kN, la rigidità della trave cambia e aumenta il comportamento carico-deflessione fino a quando non cede a circa 56 mm di deflessione. Per le travi in acciaio e ibride-rinforzate, si osserva una variazione della rigidità a un carico di circa 10 kN e un aumento del comportamento carico-deflessione fino a quando non si rompe a circa 60-70 mm di deflessione. Inoltre, a causa di crepe distinte lungo la parte centrale che progredivano in direzione della parte superiore della trave, l'armatura in acciaio impiegata per il rinforzo aveva prodotto un cedimento da schiacciamento nel



calcestruzzo sotto compressione. Questo cedimento si osserva al valore di carico di circa 40 kN (deflessione: media 70 mm). È stato osservato un campione della trave in calcestruzzo con resistenza inferiore con crepe aumentate. Il cedimento della trave si è verificato anche a causa di uno slittamento nell'incollaggio delle barre interne in vetroresina, dove le travi con armatura composita hanno mostrato un cedimento principalmente schiacciante del calcestruzzo. Il cedimento dello scorrimento per la trave rinforzata con GFRP si è verificato con un carico di circa 34 kN (deflessione a 56 mm). D. H. Tavares condusse esperimenti su sei travi con rinforzo in acciaio e barre in GFRP [31]. La sezione trasversale del provino della trave era di 150 × 300 mm per una lunghezza della campata di 2,9 m. Lo studio delle travi è stato effettuato utilizzando un esperimento di flessione a quattro punti.

Le osservazioni hanno mostrato una deformazione relativamente elevata e un modulo elastico inferiore in caso di rottura. Questi parametri critici influiscono sulla risposta a flessione delle travi con armatura in PRFV. Quando il comportamento delle travi rinforzate con armatura ibrida (GFRP e acciaio) è stato valutato rispetto a travi in calcestruzzo solo con acciaio rinforzato, è stato osservato che la regolazione della forza di trazione interna massima e della rigidità dell'armatura potrebbe portare a caratteristiche di flessione appropriate delle travi rinforzate con armatura ibrida [72]. Biswarup Saikia ha studiato le prestazioni e la funzionalità degli elementi flessionali rinforzati con GFRP [64]. Nelle travi in calcestruzzo armato con PRFV, le barre cedono principalmente a causa dello scivolamento lungo il calcestruzzo e la barra, nonché della riduzione del valore di rigidità post-fessurazione. L'integrazione delle fibre di polipropilene non ha comportato in modo significativo la caratteristica post-fessurazione delle travi rinforzate con GFRP [73]. L'equazione analitica è impiegata per prevedere la risposta carico-deflessione per le travi rinforzate utilizzando GFRP, e le previsioni erano vicine alla corrispondente risposta osservata sperimentalmente [74].

La risposta delle travi ibride rinforzate in flessione è stata studiata da Wenjun Qu.

Sono state gettate otto travi. Due travi hanno utilizzato solo armature in acciaio e vetroresina, rispettivamente, e il resto delle sei travi è stato gettato utilizzando un'armatura ibrida. La lunghezza della trave è stata misurata in 1800 mm, mentre l'area della sezione trasversale era di 180 × 250 mm. Sono state utilizzate staffe in acciaio con spaziatura di 100 mm e barre di 10 mm di diametro come rinforzo a taglio [75].

Leung e Balendran hanno studiato l'analisi del carico in funzione della deformazione di travi in calcestruzzo rinforzate internamente con vetroresina e barre d'acciaio. Hanno osservato che la presenza di barre in GFRP e la resistenza del calcestruzzo influenzerebbero in modo significativo la capacità di carico massima e il modello di rottura dell'elemento flessionale [63]. Hanno anche osservato che la resistenza alla flessione per la trave rinforzata con armatura mista o ibrida è maggiore.

Saikia e P. Kumar hanno sperimentato la resistenza e le prestazioni di manutenzione delle travi con rinforzo in GFRP. Si è visto che le condizioni di esercizio per le travi rinforzate con GFRP sono regolate dalla larghezza massima della fessura [76]. I ricercatori hanno studiato l'influenza del rapporto di rinforzo, delle caratteristiche superficiali e del copriferro sulla larghezza e sulla spaziatura delle crepe negli elementi rinforzati con GFRP [77]. Si osserva che una maggiore copertura in calcestruzzo offre una maggiore distanza tra le fessure. Per vari casi di carico, il valore più alto del copriferro darà risultati sparsi.

K. Subramanian e V. G. Kalpana valutano il comportamento delle travi con armatura in GFRP in flessione. I risultati sperimentali sono stati confrontati con i risultati numerici. Hanno osservato che una minore rigidità del GFRP provoca un aumento della larghezza della fessura. La resistenza del calcestruzzo non influirà in modo significativo sulla larghezza della fessura. La risposta al carico rispetto alla deformazione dei modelli numerici e di prova era comparabile [65]. Goldstone ha presentato studi sul comportamento alla flessione del calcestruzzo HS (ad alta resistenza) e UHSC (ad altissima resistenza) rinforzato con FRP in vetro. Fang Yuan ha studiato il comportamento delle travi in cemento armato con CFRP e il calcestruzzo è stato miscelato utilizzando aggregati di corallo di acqua di mare e sabbia marina. La distribuzione lineare della deformazione è notata lungo la sezione trasversale della trave. A causa del momento più elevato, l'asse neutro si è spostato verso la parte superiore della trave, mostrando la graduale formazione di crepe in flessione [78]. Omar Gouda ha condotto studi sperimentali sulla funzionalità e sulle prestazioni delle travi in calcestruzzo armato con GFRP a flessione [79]. Si vede che la trave cede a causa dello schiacciamento del calcestruzzo nello strato di

compressione più esterno. Le travi con un rapporto di rinforzo inferiore ( $\leq 0,85\%$ ) hanno mostrato un comportamento bilineare in carico-deflessione, mentre quelle con un elevato rapporto di rinforzo hanno mostrato un comportamento trilineare. Un aumento del rapporto di rinforzo ha portato a una significativa riduzione in termini di deformità utilizzando approcci influenzati dalla deflessione e dall'energia. Inoltre, per un incremento simile del rapporto di rinforzo, la capacità di flessione in esercizio è aumentata in modo più significativo rispetto alla capacità di momento più elevato. Omar Gouda ha anche presentato studi sulle "equazioni della lunghezza di sviluppo" per le barre in PRFV nelle travi in cemento armato. Le "equazioni" proposte dagli autori hanno mostrato l'efficacia e l'affidabilità richieste nel prevedere la lunghezza di sviluppo in base all'intercetta di sollecitazione iniziale secondo l'analisi di regressione dei risultati del test di giunzione finale. Dopo aver esaminato il comportamento flessionale delle travi in calcestruzzo con armatura in vetroresina, si può concludere che la sezione con GFRP può essere progettata come sezione rinforzata ed è critica per la flessione.

La resistenza delle barre in PRFV e il grado del calcestruzzo influenzano in modo significativo il comportamento di deflessione del carico dell'elemento e la capacità di carico dell'elemento. Il forte confinamento nella regione di flessione da parte di un'armatura secondaria ravvicinata potrebbe comportare un alto indice di duttilità e massima capacità con un'influenza trascurabile sulla rigidità "post-fessurazione" delle travi. Inoltre, un rapporto di rinforzo più elevato può aumentare la capacità finale e può ridurre la deflessione in condizioni di servizio e di carico finale. Le coperture in calcestruzzo influenzano considerevolmente la previsione della "lunghezza di sviluppo" che a sua volta dipende dalla dimensione della barra. Per lo sviluppo della sollecitazione di incollaggio completo delle barre in PRFV, la copertura del calcestruzzo fino al punto medio della barra è suggerita come 2,5 del diametro della barra per quasi tutti i diametri della barra [80].

I carichi di rottura nelle travi testate mostrano che la capacità di flessione della trave in calcestruzzo con armatura ibrida con acciaio ibrido/GFRP aumenta con un elevato rapporto di armatura effettivo,  $\rho_{eff}$ . L'osservazione implica che  $\rho_{eff}$  è uno dei parametri principali nel determinare la sua capacità flessionale per l'armatura ibrida nelle travi in calcestruzzo utilizzando acciaio/GFRP. Questa struttura ibrida migliora il comportamento flessionale nelle travi in calcestruzzo, mentre l'armatura in acciaio migliora la duttilità nelle travi con armatura ibrida. R. Mathieu, B. Brahim hanno studiato il risultato dell'invecchiamento di questo legame insieme al calcestruzzo e alla barra in vetroresina. Lo studio mostra che questa modalità di deformazione del legame si basa principalmente sullo strato di rivestimento e sul profilo superficiale della barra [81]. Lo strato di rivestimento migliora le prestazioni di adesione. La forza di adesione lungo il calcestruzzo GFRP si ridurrà con l'aumentare del tempo di immersione. In condizioni atmosferiche aggressive, lo studio mostra che la variazione della forza di adesione è minore e quindi trascurabile a temperature elevate.

V G Kalpana ha fuso e studiato nove travi per la sperimentazione del carico a due punti. Per la trave data, una dimensione della sezione trasversale di 200 × 250 mm con una lunghezza della campata di 1800 mm. Hanno studiato il comportamento caratteristico delle travi rinforzate con barre in vetroresina nel calcestruzzo sotto un sistema di carico a due punti con un diametro della barra e una qualità del calcestruzzo come parametri variabili. Nel primo gruppo, tre travi sono state gettate utilizzando un valore di resistenza effettivo di 20 N/mm<sup>2</sup>. Inoltre, per l'armatura lungo la superficie di tensione sono state utilizzate barre in PRFV di diametro 16 mm, 20 mm e 24 mm. Nella seconda fase, le travi sono state gettate utilizzando lo stesso valore di barra e diametro in PRFV con un valore di resistenza a compressione del calcestruzzo di 40 N/mm<sup>2</sup>. L'ultimo gruppo è costituito da tre travi con lo stesso numero di barre in PRFV e un valore di resistenza a compressione del calcestruzzo di 60 N/mm<sup>2</sup>. Per tutte le travi sono state impiegate due barre di sospensione (GFRP) con diametro di 10 mm. Il calcestruzzo ad alta resistenza incorporato con barra in GFRP presenta prestazioni migliori rispetto al calcestruzzo a resistenza normale incorporato con barra in GFRP per quanto riguarda la capacità di carico e di deflessione a causa della capacità di alta tensione. Le barre in PRFV con rigidità depresso hanno portato a una maggiore larghezza della fessura. Mohamed S. Issa ha sperimentato il comportamento delle travi utilizzando le fibre per valutare le proprietà meccaniche come la flessione e la duttilità.

Inoltre, è stato notato che l'aggiunta di fibre di acciaio migliora la duttilità negli elementi flessionali rinforzati con FRP di circa il 300%. La precisione nell'equazione di deflessione varia al variare dei livelli di carico. Deviazioni più sostanziali sono state osservate in prossimità del carico finale.

Il rapporto tra campata e deviazione del carico sperimentale era comparativamente più notevole del rapporto regolarmente riconosciuto per la campata/250. M.W. Goldston ha sperimentato e studiato il comportamento flessionale nella trave in calcestruzzo con l'alta e altissima resistenza rinforzata con GFRP. Sono state osservate che l'utilizzo di UHSC con 117 MPa è più consigliabile per migliorare la capacità di carico in travi sovra-rinforzate (GFRP-RC) rispetto all'HSC con 95 MPa [5]. Inoltre, poiché la resistenza del calcestruzzo è aumentata a 117 MPa, UHSC da 95 MPa, la capacità di carico HSC è elevata del 13% e del 27% per il rapporto di armatura di  $p_f = 2,0\%$  e  $p_f = 1,0\%$ , rispettivamente [56]. Si è notato che la deviazione al centro della campata è aumentata con l'aumento della resistenza del calcestruzzo a 117 MPa, UHSC da 95 MPa e HSC con lo stesso rinforzo per le travi in PRFV-RC su quelle armate. Si osserva che nel corso del periodo sono stati condotti molti studi per comprendere il comportamento flessionale degli elementi in calcestruzzo armato con vetroresina. Questa discussione evidenzia i vari parametri che influenzano la resistenza alla flessione. Armatura ibrida, calcestruzzo ad alta resistenza migliora il comportamento flessionale delle strutture in calcestruzzo armato con FRP. Il copriferro, il rapporto di armatura, la distanza tra le barre e il confinamento dovuto all'armatura trasversale nella zona di flessione sono i parametri necessari per studiare la resistenza alla flessione di tali strutture.

## Comportamento carico-deflessione e modello di cricca

Lapko e Urbański hanno presentato le seguenti osservazioni sulle deflessioni basate su diversi metodi e studi sperimentali di travi rinforzate con barre FRP [82]. A differenza delle tradizionali travi rinforzate con barre d'acciaio, le travi rinforzate con fibre di basalto presentano un comportamento lineare tra carico e deflessione. I valori ottenuti dagli studi sperimentali sono notevolmente più elevati per la trave rinforzata con FRP rispetto alle flessioni della trave rinforzata con acciaio, come mostrato in Fig. 4 e Fig. 5. Ciò è dovuto al modulo di elasticità inferiore nella barra FRP rispetto alle barre in acciaio.

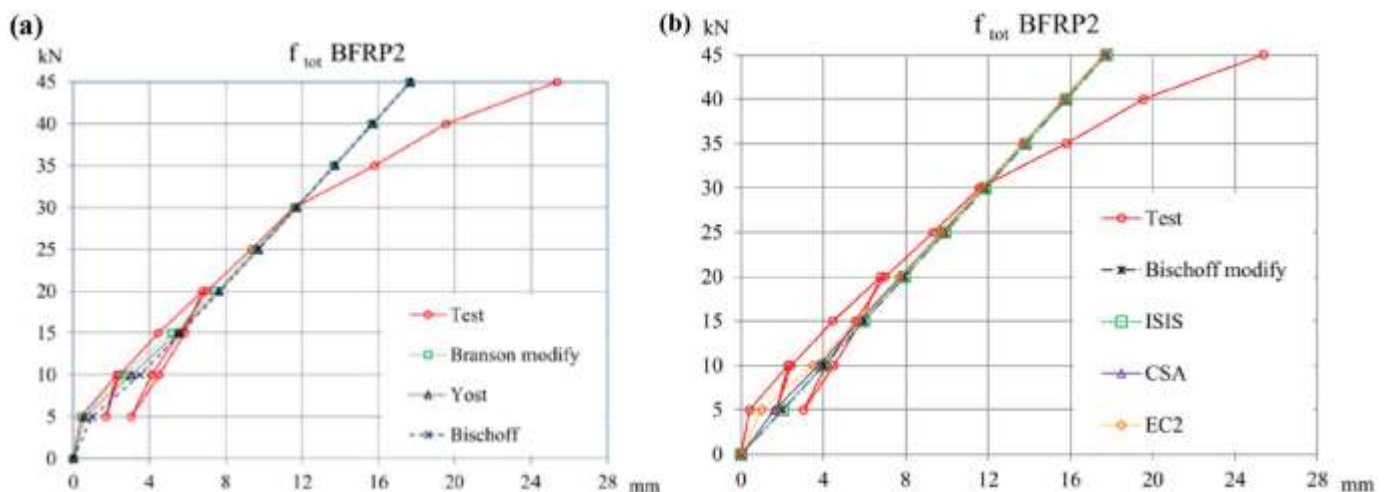


Figure 4: a Teorico, b Comportamento sperimentale carico-deflessione per trave rinforzata con FRP

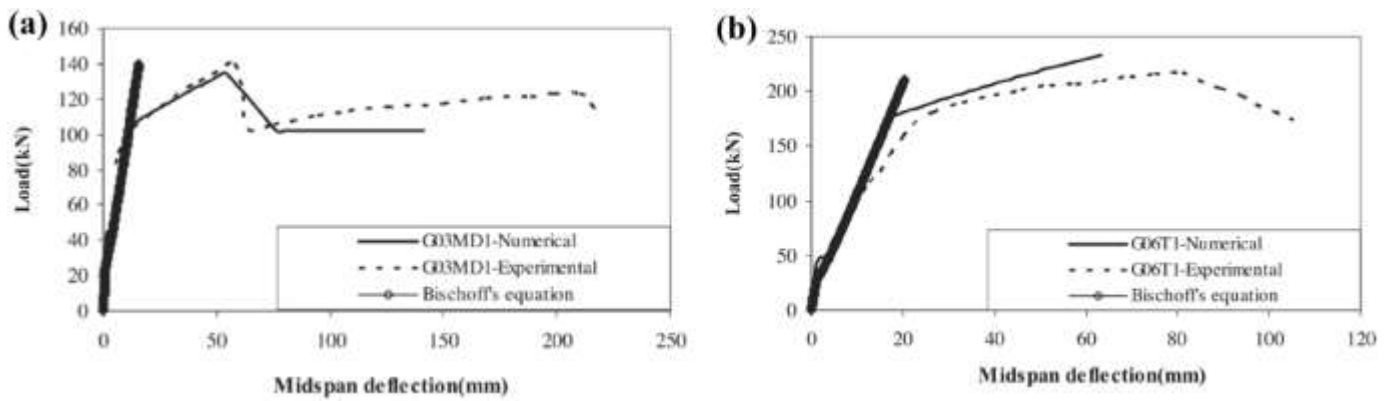


Figure 5: Rapporto di carico vs deformazione per travi in calcestruzzo che utilizzano armature ibride (FRP e acciaio) [66]

La Figura 4 mostra i risultati di esperimenti a deformazione controllata, mentre Fatih et al. hanno presentato studi sulle caratteristiche di deflessione e sollecitazione di flessione per travi in calcestruzzo armato ibrido (acciaio-FRP) [66]. I risultati della deflessione utilizzando varie tecniche numeriche vengono confrontati con i risultati sperimentali dopo aver applicato il carico alla deformazione. La Figura 5 mostra che i metodi numerici predicono adeguatamente le deflessioni post- e pre-fessurazione considerando gli aspetti controllati dalle sollecitazioni e le deformazioni controllate. La Figura 5 mostra anche il confronto del comportamento nelle deflessioni assunte dal modello di Bischoff e ai livelli di carico più bassi dopo e prima della prima fessurazione del carico. Gli studi sono stati condotti da M. Issa et al. per comprendere l'impatto delle fibre sul comportamento flessionale della trave rinforzata con GFRP [47]. Gli studi dimostrano che numerosi tipi di fibre come il vetro, l'acciaio e il polipropilene hanno migliorato la duttilità di una trave in calcestruzzo (rinforzata con FRP) in particolare; L'impiego di fibre d'acciaio aumenta notevolmente la duttilità del fascio. Quindi, l'integrazione delle fibre di acciaio è una delle soluzioni per migliorare la minore duttilità del rinforzo FRP. Il comportamento carico-deflessione delle travi in calcestruzzo a bassa resistenza rinforzate con GFRP e barre d'acciaio è mostrato in Fig. 6. Introduzione

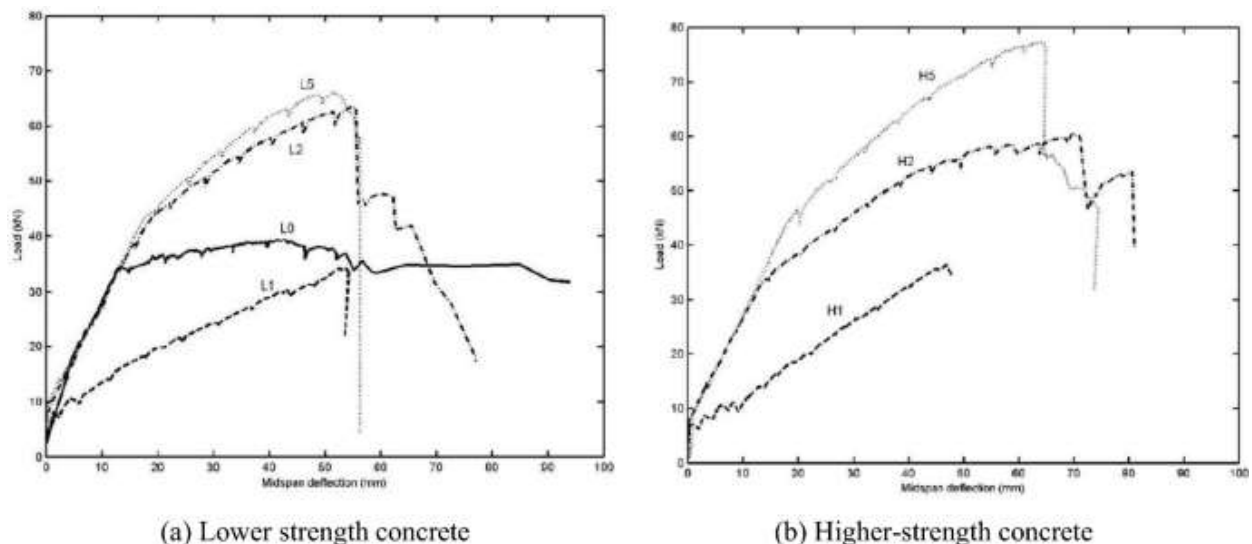


Figure 6: Curva di carico in funzione della deformazione della trave rinforzata con GFRP per vari tipi di calcestruzzo [63]

Si osserva che il comportamento di pre-servamento per le travi rinforzate con acciaio (L0) e GFRP (L2, L5) era identico. Le travi rinforzate con sole barre (L1) (GFRP) hanno mostrato variazioni nella rigidità della trave a un carico di 7 kN (carico di cricca) e, successivamente, il provino della trave (L1) mostra un comportamento di carico-deformazione crescente fino alla completa deformazione. La trave rinforzata con solo acciaio (L0)

mostra un tipico comportamento orizzontale post-snervamento senza alcun incremento notato nella capacità portante della trave. Dopo il carico di snervamento delle barre d'acciaio, gli elementi di flessione ibridi rinforzati (L2 e L5) hanno mostrato un aumento della capacità di tenuta del carico della trave. Si noti che le caratteristiche carico-deflessione di (L1) e (H1) erano paragonabili a quelle di (L2) e (H2). Le capacità di resistenza al carico delle travi (H2, H5) sono maggiori con gradi di calcestruzzo più elevati rispetto al grado di calcestruzzo più basso (L2, L5). I ricercatori hanno adottato un approccio controllato dal ceppo. La Figura 7 illustra le prestazioni di carico-deformazione delle travi in calcestruzzo armato con vetroresina. Il comportamento carico-deflessione delle travi in calcestruzzo armato con vetroresina riflette una variazione del grafico al carico di fessurazione.

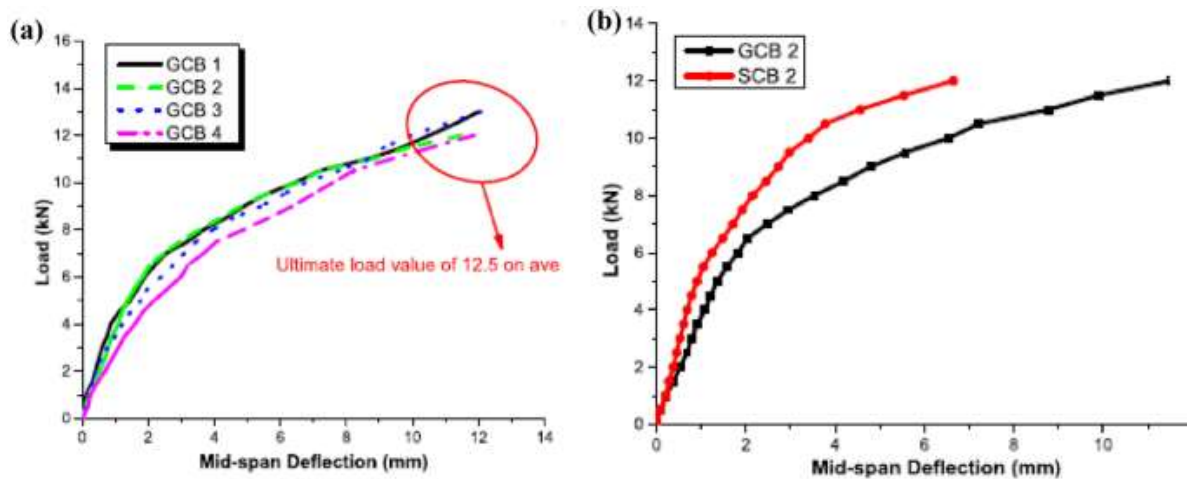


Figure 7: Diagrammi di carico e deflessione: a Le travi rinforzate con GFRP e b Le travi in calcestruzzo armato con vetroresina e acciaio a confronto [57]

Inizialmente, le pendenze delle curve di carico rispetto a quelle di deformazione sono relativamente maggiori, suggerendo che la rigidità è maggiore prima della rottura, con conseguente graduale cambiamento della deformazione all'aumentare del carico. Tuttavia, la pendenza diminuisce dopo la fessurazione nelle zone di trazione, riducendo la rigidità. La Figura 7 (b) mostra che la deflessione nelle travi in cemento armato in acciaio è più lenta del valore di deflessione più elevato, inferiore a quella delle travi in cemento armato in PRFV con solo il 60%. Questi risultati sono legati principalmente al modulo elastico del materiale rinforzato; le travi in PRFV hanno un basso modulo elastico e quindi si deformano facilmente. Dimostra inoltre che si dovrebbe prestare particolare attenzione all'impatto del rapporto di rinforzo sulla capacità di deformazione strutturale negli elementi rinforzati con GFRP. Si osserva che principalmente le travi rimangono rigide e non fessurate [83]. Quando il carico aumenta, si osservano crepe nella zona di flessione pura [84]. Il comportamento del carico rispetto alla deflessione delle travi è vicino l'uno all'altro fino a quando il servizio non viene caricato. Questo mostra la rigidità delle travi. Il raggio è stato caricato in piccoli incrementi fino a un punto in cui ha subito deformazioni più significative in precedenza. Nella deflessione ad ogni aggiunta di carico, le barre in GFRP nel calcestruzzo ad alta resistenza hanno ottenuto risultati migliori rispetto alle barre nel calcestruzzo a resistenza standard [85]. La Figura 8 illustra i modelli di controllo del cedimento e l'ampiezza delle fessure su tutti e quattro i lati delle travi in calcestruzzo armato con PRFV.



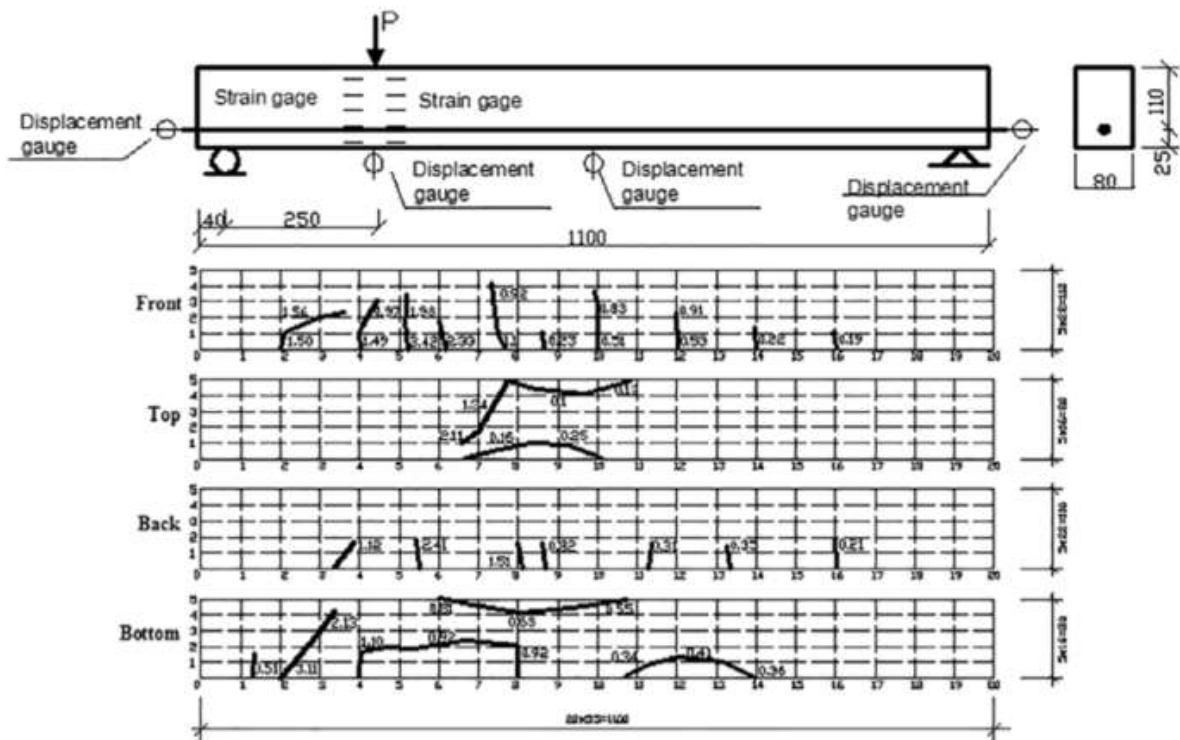


Figure 8: Crepe su una trave rinforzata con GFRP dopo il cedimento [57]

L'innescio di crepe si verifica quando la sollecitazione di trazione viene esercitata sul calcestruzzo che supera la sua capacità di tensione. Rispetto alle travi piane, la velocità di propagazione della cricca [86] nelle travi rinforzate con GFRP è lenta e l'ampiezza della fessura, che corrisponde a un carico ultimo, è piccola. Tali risultati mostrano che le travi in calcestruzzo armato con GFRP hanno una maggiore resistenza ai danni rispetto alle travi in calcestruzzo semplice. Facendo riferimento alla Fig. 9, si osserva che la resistenza alla flessione delle armature ibride è maggiore per una trave in calcestruzzo rispetto a quella delle strutture in calcestruzzo realizzate con barre in vetroresina o armature in acciaio [87].



Figure 9: Modelli di fessurazioni per trave ibrida-rinforzata [63]

Inoltre, sono state osservate più crepe nel sistema di rinforzo ibrido. Per quanto riguarda i rinforzi ibridi, una maggiore superficie di GFRP potrebbe migliorare le capacità di carico. Le barre in GFRP nell'armatura ibrida

migliorano il comportamento di snervamento post-snervamento dell'elemento flessionale. Il rinforzo in vetroresina è più efficace dopo lo snervamento del rinforzo in acciaio.

## Forza di adesione del calcestruzzo GFRP

---

Per tre decenni sono stati condotti studi sperimentali e analitici per conoscere la capacità di diversi FRP come rinforzo nelle strutture in calcestruzzo.

I ricercatori hanno testato la trave rinforzata in FRP per la forza di adesione e la durata. Hanno anche cercato di conoscere il comportamento alla flessione e la resistenza al taglio di questi campioni. I campioni utilizzati negli studi sperimentali sono stati preparati secondo le normative ACI-440-3R [88] e testati secondo gli standard ASTM [89]. Si osserva che la resistenza del calcestruzzo, il copriferro, il diametro della barra [90] e il confinamento fornito dall'armatura trasversale influenzano la forza di adesione [85, 86]. La barra in PRFV ha caratteristiche elastiche non omogenee, anisotrope e lineari. Per questo motivo, la proprietà di sollecitazione di adesione delle barre di vetro FRP all'interno del calcestruzzo è stata un fattore critico preso in considerazione per la sua applicazione nelle strutture in calcestruzzo. Inoltre, poiché il pH alcalino del calcestruzzo è elevato, compreso tra 12,7 e 13,6, ricerche precedenti hanno dimostrato che le barre in vetroresina rinforzate nel calcestruzzo riducono la resistenza alla trazione e all'adesione [91].

La sollecitazione di adesione all'interno del calcestruzzo e delle barre d'armatura svolge un ruolo fondamentale nelle caratteristiche di stabilità, sicurezza e deformabilità delle strutture in calcestruzzo [92]. La forza di adesione è una caratteristica comune considerata nel calcestruzzo armato. È la misura della trasmissione del carico tra armatura e calcestruzzo. La forza di adesione è influenzata dalle proprietà del calcestruzzo, dalla geometria della barra, dal confinamento, dalla lunghezza di sviluppo e dalle condizioni della superficie dell'armatura. La ricerca è condotta per comprendere la sollecitazione di legame nelle strutture in calcestruzzo rinforzato con FRP. Il codice di progettazione del Canadian Highway Bridge (CHBDC) CSA S6-06 e il codice canadese CSA S806-02 [93] forniscono equazioni per la lunghezza di sviluppo delle barre FRP nel calcestruzzo convenzionale, considerando la superficie di una barra, la posizione della barra, la copertura trasparente e la distanza tra le barre. Hossain K. M. A. et al. hanno presentato studi sulle proprietà di sollecitazione di legame delle barre di vetro FRP nel calcestruzzo ad altissima resistenza [94]. Si osserva che sia nel calcestruzzo ad alta resistenza che in quello a sollecitazione ultra-elevata, la forza di adesione si riduce con un aumento delle dimensioni della barra in PRFV. La riduzione della forza di adesione è stata compresa tra il 10% e il 40%, come mostrato in Fig. [Ore 10](#).



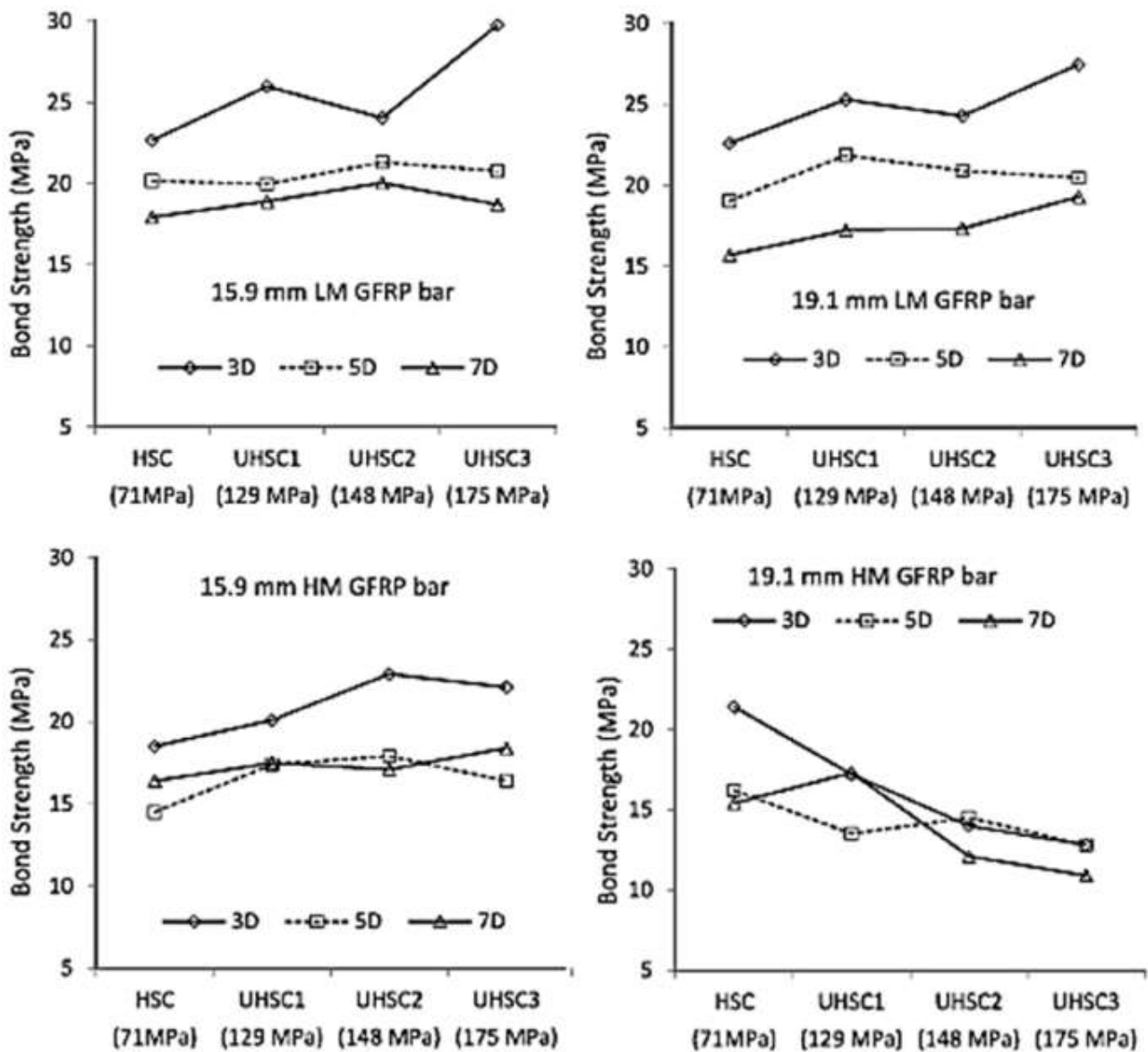


Figure 10: Effetto del tipo/diametro dell'armatura, della sollecitazione di compressione del calcestruzzo e della lunghezza di ancoraggio sulla sollecitazione di adesione [94]

La Figura 10 mostra che la forza di adesione per le barre in GFRP HM (alto modulo) e LM (basso modulo) diminuisce con l'aumentare della lunghezza dell'inclusione per i provini a fascio. Questa riduzione è dovuta alla maggiore distribuzione delle sollecitazioni non lineari insieme alla lunghezza più estesa della barra in vetroresina nel calcestruzzo. Harajli, M. e Abouniaj hanno studiato le linee guida ACI 440 [20] per il comportamento della forza di adesione delle barre in GFRP in tensione [95]. Hanno effettuato due test di legame: la risposta allo scorrimento della forza di legame locale utilizzando campioni di estrazione e la forza di adesione di giunzione utilizzando campioni di fascio. La Figura 11 presenta la configurazione di prova per i campioni estraibili.

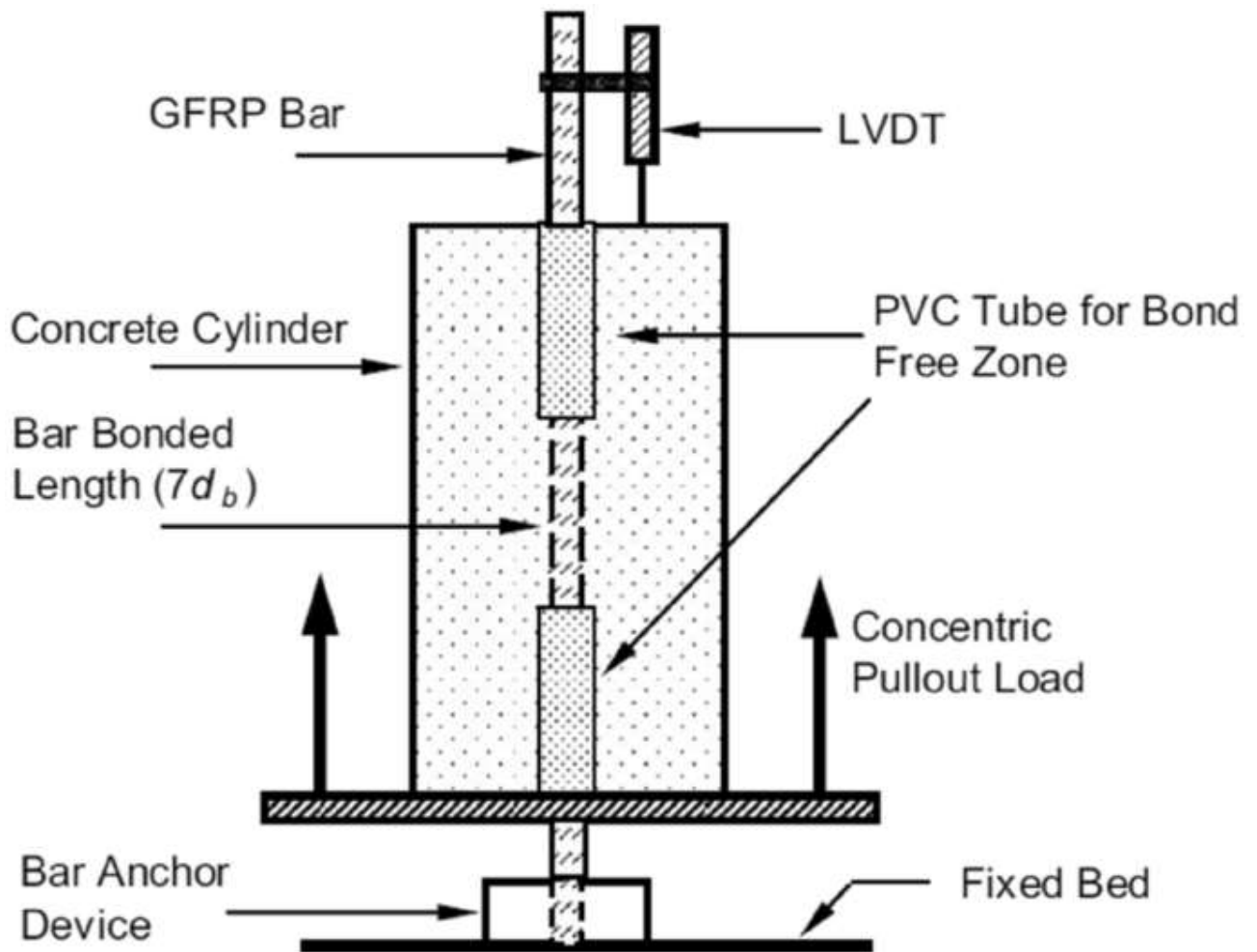


Figure 11: Configurazione di prova per provini estraibili [95]

A causa del copriferro in calcestruzzo più grande, è stato osservato che il test di estrazione dei provini fallisce in modalità di estrazione, come mostrato in Fig. 12, che mostra anche varie modalità di rottura della forza di adesione.

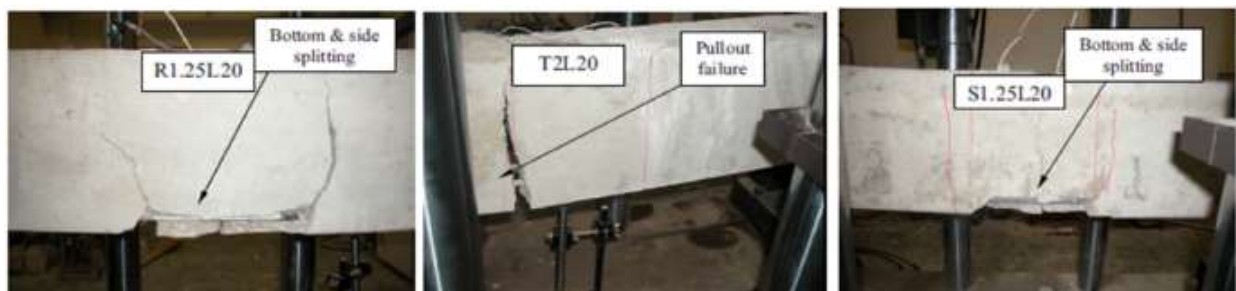


Figure 12: Modalità di rottura del legame dei provini del fascio [95]

Ahmed G. Bediwy e Ehab F. El-Salakawy hanno valutato lo stress di legame delle barre di GFRP incorporate nei compositi FRC [96]. È stata suggerita un'espressione analitica che si aspetta lo stress di legame di provini rinforzati con barre di testa contenenti fibre discrete. Sono state prese in considerazione le formule di sollecitazione di legame, come da varie disposizioni di progettazione. Il nuovo modello ha studiato l'effetto dell'aggiunta di diversi tipi di fibre distinte in campioni rinforzati con barre terminali a testa. Questo modello ha prodotto stime decenti per i campioni FRP-FRC.

Fei Yan Et Al. hanno creato 682 campioni di prova di estrazione per comprendere le prestazioni di legame delle barre in GFRP [91]. La Figura 13 mostra il modello di valutazione delle prestazioni di adesione (BPE) per l'armatura in calcestruzzo e acciaio.

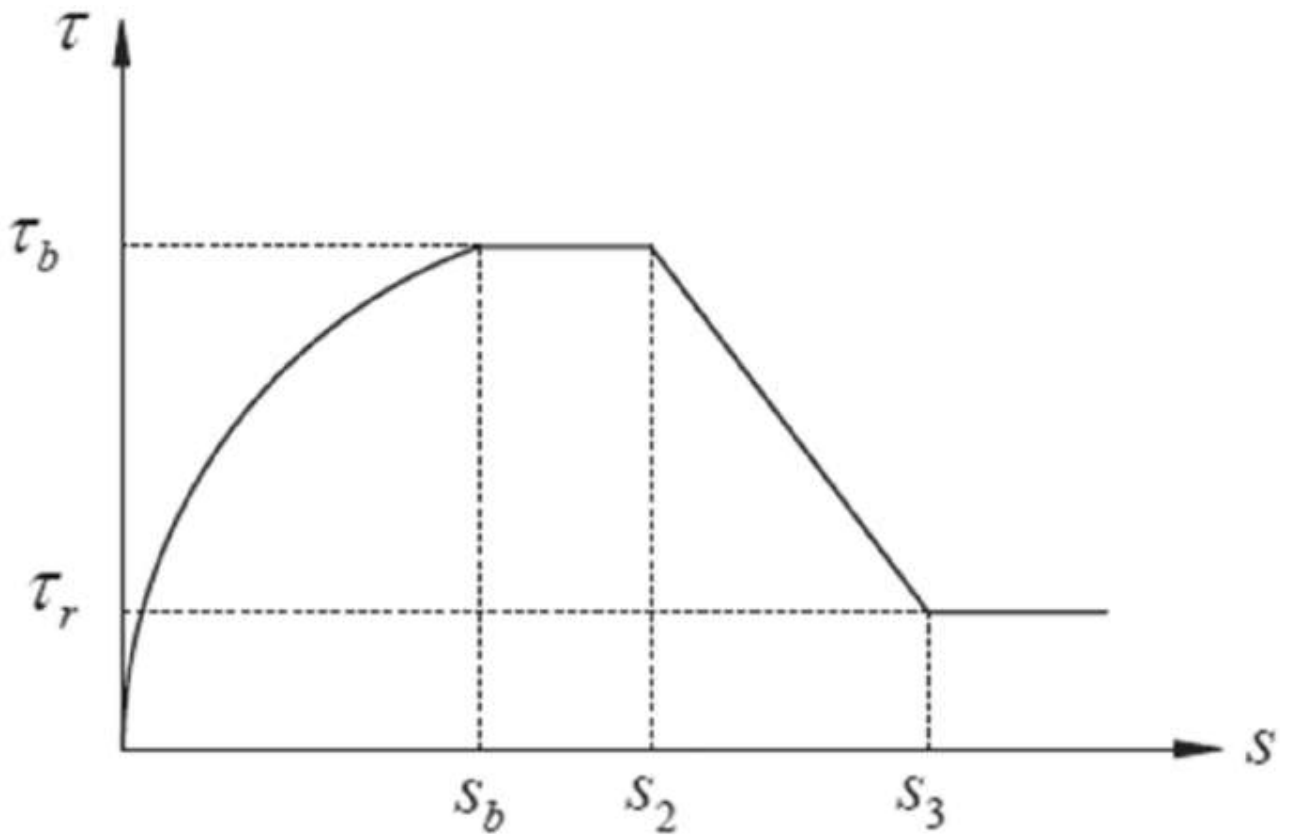


Figure 13: Modello BPE per tondo per cemento armato in acciaio [91]

Il modello di sollecitazione bond-slip modificato mBPE mostrato in Fig. 14 può essere espresso da equazioni in tre stadi (Eq. 1-3) [91].

$$\frac{\tau}{\tau_b} = \left(\frac{s}{s_b}\right)^a \text{ for } 0 \leq s \leq s_b \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\tau_b} = 1 - p \left(\frac{s}{s_b}\right) \text{ for } s_b \leq s \leq s_3 \quad (2)$$

$$\tau = \tau_3 \text{ for } s \geq s_3 \quad (3)$$

Dove  $s$  e  $\tau$  può essere definito come lo slittamento e la sollecitazione di adesione, mentre  $s_b$  e  $\tau_b$  sono lo slittamento estremo e la sua corrispondente forza di adesione. Il risultato del trattamento di una superficie sulla sollecitazione di legame è stato considerato in un modello migliorato per la barra FRP. Bogachan

Basaran et al. hanno condotto un'indagine dettagliata sull'effetto della lunghezza di sviluppo sulla forza di adesione delle barre FRP incorporate nel calcestruzzo [97]. La ricerca è condotta per uno studio analitico approfondito per valutare le sollecitazioni di legame delle barre d'armatura FRP nel calcestruzzo. I risultati dei modelli analitici sono stati confrontati con i risultati sperimentali presenti in letteratura. Sono stati sviluppati algoritmi pratici per prevedere i punti di forza delle lunghezze di sviluppo delle barre d'armatura in FRP con diverse proprietà fisiche. Doost Mohamadi et al. hanno valutato l'influenza del tipo di calcestruzzo sulla forza di adesione delle barre in GFRP [98]. Si osserva che l'aumento della resistenza alla compressione sia nel calcestruzzo normale che in quello leggero migliorerà la forza di adesione. A causa della forma, della struttura superficiale e delle proprietà meccaniche, le barre in PRFV indicano una minore forza di adesione con il calcestruzzo. Applicando un adeguato sistema di ritenuta, questa carenza può essere presa in considerazione nell'approccio progettuale. Le barre in BFRP rivestite in sabbia possedevano una maggiore adesione e forza di adesione al calcestruzzo rispetto alle barre in GFRP nervate [99]. La temperatura elevata può degradare la forza di adesione del calcestruzzo rinforzato con FRP.

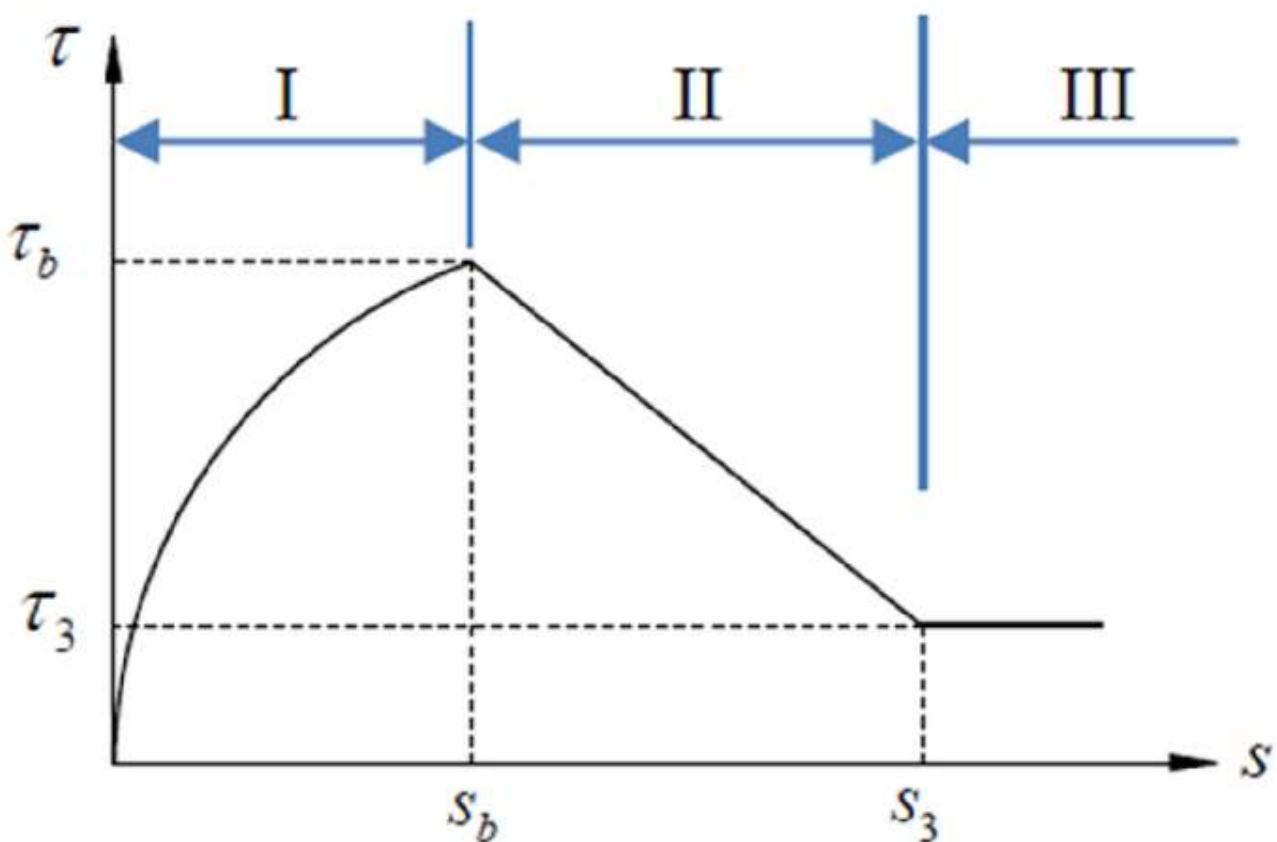


Figure 14: Modello mBPE per barra in FRP [91]

## Conclusioni

Il documento esamina il comportamento degli elementi strutturali rinforzati con GFRP in flessione e discute le caratteristiche di carico-deflessione, la forza di adesione e i modelli di cricche per tali elementi. L'articolo si propone di esaminare criticamente l'applicazione dei PRFV come barre d'armatura nelle strutture in calcestruzzo, in particolare nelle travi. I risultati dello studio della letteratura sono riassunti come segue.

- Generalmente, gli elementi in calcestruzzo armato FRP sono progettati in base a valori aumentati dei fattori di sicurezza.

- Le linee guida progettuali fornite dal codice ACI e CSA saranno applicate alla progettazione di strutture in calcestruzzo armato con PRFV. Tuttavia, non sono disponibili codici di progettazione specifici, soprattutto nel contesto indiano, per tali membri.
- Il valore più basso del modulo di elasticità e la maggiore deformazione di rottura in GFRP sono i principali fattori responsabili della maggiore resistenza finale, della minore rigidità e della maggiore deflessione delle travi rinforzate con GFRP rispetto alle travi rinforzate con acciaio. Gli elementi rinforzati in GFRP in flessione hanno superato le travi rinforzate in acciaio.
- Il comportamento della trave in flessione può essere migliorato utilizzando l'armatura in acciaio in combinazione con il rinforzo in GFRP in termini di maggiore capacità di sostenere il carico, maggiore deflessione rispetto alla trave rinforzata con GFRP. Nella fase di post-fessurazione, la barra in PRFV, insieme alla barra d'acciaio, sta sopportando più carico e la trave cede a taglio. Pertanto, è necessario prestare attenzione all'armatura a taglio.
- La capacità di carico critica delle travi in calcestruzzo armato ibrido è maggiore rispetto alle travi rinforzate utilizzando solo GFRP e acciaio, rispettivamente.
- Varie indagini sull'utilizzo di fibre negli elementi in calcestruzzo armato con GFRP indicano il miglioramento delle proprietà meccaniche degli elementi in calcestruzzo. Le fibre d'acciaio possono resistere alle macro-crepe. Il basalto e le fibre di vetro possono resistere alle microfessure. La percentuale di fibre ibride viene decisa in base ai risultati dei test e al confronto dei costi dell'utilizzo delle fibre nel calcestruzzo.
- La capacità di carico massima nelle travi in calcestruzzo rinforzato con GFRP con fibre è superiore a quella delle travi rinforzate con GFRP senza fibre.
- Lo studio della letteratura ha dimostrato che l'armatura in forma ibrida svolge un ruolo sostanziale nel migliorare la sollecitazione di flessione delle travi. Migliora la resistenza alla flessione delle travi. Le curve carico-deflessione prima dello snervamento rimangono le stesse per gli elementi flessionali rinforzati con GFRP o rinforzati con acciaio per la stessa serie di resistenza alla compressione del calcestruzzo.
- Le barre in PRFV sono operative per l'armatura ibrida dopo aver raggiunto il punto di snervamento delle armature in acciaio. L'integrazione di fibre di acciaio agli elementi in calcestruzzo, rinforzate con GFRP, è una delle tecniche per sopprimere la limitazione della duttilità inferiore.
- I rapporti di rinforzo effettivi influenzano sostanzialmente la capacità di carico delle travi ibride-rinforzate più del rapporto di rigidità assiale tra acciaio e vetroresina. La capacità di carico aumenta all'aumentare del rapporto di rinforzo effettivo. La corrosione e il deterioramento del calcestruzzo armato in acciaio e gli elevati costi per il risanamento e la bonifica delle strutture portano all'applicazione pratica delle barre in PRFV.
- Anche dopo alcuni inconvenienti, come il basso modulo di elasticità e la minore resistenza al taglio a causa della maggiore resistenza alla trazione e alla natura non corrosiva delle barre in PRFV, può essere considerata un'alternativa migliore al rinforzo in acciaio. Verranno condotti studi sperimentali e analitici per comprendere meglio il comportamento flessionale di tali elementi e potranno essere sviluppati nuovi fattori di riduzione della resistenza per un approccio progettuale innovativo per elementi in calcestruzzo armato con GFRP.
- Nonostante gli studi precedenti, le equazioni proposte in vari studi hanno limitazioni nella comprensione del comportamento delle barre in GFRP negli elementi di flessione del calcestruzzo. Non sono disponibili linee guida di progettazione standard per affrontare gli svantaggi dei membri in GFRP-RC puro. Di conseguenza, lo sviluppo di una nuova metodologia o di linee guida di progettazione è fondamentale per l'uso futuro delle armature in PRFV negli elementi strutturali in calcestruzzo, che alla fine sostituirebbero le barre d'armatura in acciaio con barre in PRFV. In

questo modo è possibile evitare problemi di corrosione negli elementi strutturali, con conseguente maggiore durata delle strutture.

## Referenze

---

1. T.C. Bakis, C.E. Bank, L.C. Asce, F. Brown, V.L. Asce, M. Cosenza, E. Davalos, J.F. Asce, A.M. Lesko, J.J. Machida, A. Rizkalla, S.H. Triantafyllou, Compositi polimerici rinforzati con fibre per l'edilizia: revisione. *J. Compos.* **6**(2), 73–77 (2002). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)) - [Articolo Google Scholar](#)
2. S. Ahmad, Corrosione dell'armatura nelle strutture in calcestruzzo, il suo monitoraggio e la previsione della vita utile: una revisione. *Cem. Concr. Compos.* **25**(4–5), 459–471 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00086-0) - [Articolo Google Scholar](#)
3. M. Panahi, S.A. Zareei, A. Izadi, Rinforzo flessionale di travi in cemento armato mediante lastre FRP incollate esternamente e barre FRP montate in prossimità della superficie. Perno della cassa. *Constr. Mater.* **15**, E00601 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00601> - [Articolo Google Scholar](#)
4. A.K. Sethi, T.A. Kinjawadekar, P. Nagarajan, A.P. Shashikala, Progettazione di elementi flessionali rinforzati con barre in GFRP. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **936**, 012036 - (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/936/1/012036> - [Articolo Google Scholar](#)
5. M.W. Goldston, A. Remennikov, M.N. Sheikh, Comportamento flessionale delle travi in calcestruzzo rinforzato con GFRP ad alta e altissima resistenza. *Cost. Costruire. Mamma.* **131**, 606–617 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.094> - [Articolo Google Scholar](#)
6. A.C. Manalo, P. Mendis, Y. Bai, B. Jachmann, C.D. Sorbello, Barre polimeriche fibrorinforzate per strutture in calcestruzzo: stato della pratica in Australia. *J. Compos.* **25**(1), 1–19 (2021). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001105](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001105) - [Articolo Google Scholar](#)
7. M.N.S. Hadi, J.S. Yuan, Indagine sperimentale su travi composite rinforzate con trave a I in GFRP e barre d'acciaio. *Cost. Costruire. Mamma.* **144**, 462–474 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.217> - [Articolo Google Scholar](#)
8. T.A. El-Sayed, Y.A. Algash, Comportamento flessionale di travi in geopolimero RC ad altissime prestazioni rinforzate con barre in GFRP. Perno della cassa. *Constr. Mater.* **15**, E00604 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00604> - [Articolo Google Scholar](#)
9. S.A.A. Mustafa, H.A. Hassan, Comportamento delle travi in calcestruzzo rinforzate con acciaio ibrido e compositi FRP. *HBRC J.* **14**(3), 300–308 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2017.01.001> - [Articolo Google Scholar](#)
10. M.A. Adam, M. Said, A.A. Mahmoud, A.S. Shanour, Comportamento a flessione analitica e sperimentale di travi in calcestruzzo rinforzate con barre polimeriche rinforzate con fibra di vetro. *Cost. Costruire. Mamma.* **84**, 354–366 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057> - [Articolo Google Scholar](#)
11. E. Gudonis, E. Timinskas, V. Gribniak, G. Kaklauskas, A.K. Arnautov, V. Tamulėnas, Rinforzo FRP per strutture in calcestruzzo: revisione dello stato dell'arte dell'applicazione e della progettazione. *Ing. Struct. Technol.* **5**(4), 147–158 (2014). <https://doi.org/10.3846/2029882x.2014.889274> - [Articolo Google Scholar](#)

12. P. Kumar, S. Bishnoi, B. Bhattacharjee, Influenza della lamiera di CFRP sul rinforzo flessionale della trave in cemento armato. *J. Adv. Concr. Technol.* **18**(12), 778–793 (2020). <https://doi.org/10.3151/JACT.18.778> - [Articolo Google Scholar](#)
13. H.J. Zadeh, A. Nanni, Progettazione di colonne in c.a. con rinforzo in vetroresina FRP. *J Compos Constr* **17**(3), 294–304 (2013). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000354](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000354) - [Articolo Google Scholar](#)
14. W. Hu, Y. Li, H. Yuan, Revisione di studi sperimentali sull'applicazione di FRP per il rafforzamento delle strutture dei ponti. *Avv. Mater. Sci. Ing.* (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/8682163> - [Articolo Google Scholar](#)
15. T. D'Antino, M.A. Pisani, Influenza delle sollecitazioni sostenute sulla durabilità delle barre d'armatura in vetroresina. *Cost. Costruire. Mamma.* **187**, 474–486 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.175> - [Articolo Google Scholar](#)
16. H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop, M. Trada, A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Compos. Part B Eng.* **42**(4), 856–873 - 2011). <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2011.01.010> - [Article Google Scholar](#)
17. J. Zhou, X. Chen, S. Chen, Effect of different environments on bond strength of glass fiber-reinforced polymer and steel reinforcing bars. *KSCE J. Civ. Eng.* **16**(6), 994–1002 (2012). <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1462-3> - [Article Google Scholar](#)
18. R.J. Gravina, S.T. Smith, Flexural behaviour of indeterminate concrete beams reinforced with FRP bars. *Eng. Struct.* **30**(9), 2370–2380 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.12.019> - [Article Google Scholar](#)
19. S.A.A. Jabbar, S.B.H. Farid, Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures. *Karbala Int. J. Mod. Sci.* **4**(2), 216–227 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2018.02.002> - [Article Google Scholar](#)
20. L.C. Bank, T.I. Campbell, C.W. Dolan, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP Bars reported by ACI committee 440. *Concrete* (2003). [https://doi.org/10.1061/40753\(171\)158](https://doi.org/10.1061/40753(171)158) - [Article Google Scholar](#)
21. A. Elansary, A. Farag, M. Abdeen, M. Zawam, M. El-Shabrawy, Estimation of corrosion-free reinforcement as replacement to steel rebars for concrete walls. *J. Inst. Eng. Ser. A* (2022). <https://doi.org/10.1007/s40030-022-00663-z> - [Article Google Scholar](#)
22. B. Sagar, M.V.N. Sivakumar, Performance evaluation of basalt fibre-reinforced polymer rebars in structural concrete members—a review. *Innov. Infrastruct. Solut.* **6**(2), 1–18 (2021). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00452-2> - [Article Google Scholar](#)
23. Z. Sun, L. Fu, D.C. Feng, A.R. Vatuloka, Y. Wei, G. Wu, Experimental study on the flexural behavior of concrete beams reinforced with bundled hybrid steel/FRP bars. *Eng. Struct.* **197**, 109443 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109443> [Article Google Scholar](#)
24. A. Abadel, S. Alenzi, T. Almusallam, H. Abbas, Y. Al-Salloum, Shear behavior of self-consolidating concrete deep beams reinforced with hybrid of steel and GFRP bars. *Ain Shams Eng. J.* **18**, e01872 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102136> - [Article Google Scholar](#)



25. D. Cree, E.U. Chowdhury, M.F. Green, L.A. Bisby, N. Bénichou, Performance in fire of FRP-strengthened and insulated reinforced concrete columns. *Fire Saf. J.* **54**, 86–95 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.08.006> - [Article Google Scholar](#)
26. M. Saafi, Effect of fire on FRP reinforced concrete members. *Compos. Struct.* **58**(1), 11–20 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00045-4) - [Article Google Scholar](#)
27. D. Duan, L. Ouyang, W. Gao, Q. Xu, W. Liu, J. Yang, Fire performance of FRP-RC flexural members. *Polymers* **14**, 346 (2022) - [Article Google Scholar](#)
28. T. Morgado, J.R. Correia, A. Moreira, F.A. Branco, C. Tiago, Experimental study on the fire resistance of GFRP pultruded tubular columns. *Compos. Part B Eng.* **69**, 201–211 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.005> - [Article Google Scholar](#)
29. S. Masoud, K. Soudki, Evaluation of corrosion activity in FRP repaired RC beams. *Cem. Concr. Compos.* **28**(10), 969–977 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.013> - [Article Google Scholar](#)
30. Z. Huang et al., Experimental and numerical study on concrete beams reinforced with Basalt FRP bars under static and impact loads. *Compos. Struct.* **263**, 113648 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113648> - [Article Google Scholar](#)
31. D.H. Tavares, J.S. Giongo, P. Paultre, Behavior of reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars. *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.* **1**(3), 285–295 (2008). <https://doi.org/10.1590/S1983-41952008000300004> - [Article Google Scholar](#)
32. F. Sharifianjazi et al., Fibre-reinforced polymer reinforced concrete members under elevated temperatures: a review on structural performance. *Polymers.* (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14030472> - [Article Google Scholar](#)
33. O.H. Zinkaah, Z. Alridha, M. Alhawat, Numerical and theoretical analysis of FRP reinforced geopolymer concrete beams. *Case Stud. Constr. Mater.* **16**, e01052 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01052> - [Article Google Scholar](#)
34. F. Abed, A.R. Alhafiz, Effect of basalt fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars. *Compos. Struct.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.050> - [Article Google Scholar](#)
35. N. Yazdani, M.A.D.L.F. Montero, Structural performance of impact damaged and repaired concrete bridge girder using GFRP rebars. *Innov. Infrastruct. Solut.* **1**(1), 1–13 (2016). <https://doi.org/10.1007/s41062-016-0034-7> - [Article Google Scholar](#)
36. L. Ascione, G. Mancusi, S. Spadea, Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Strain* **46**(5), 460–469 (2010). <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00662.x> - [Article Google Scholar](#)
37. H. Hajiloo, M.F. Green, J. Gales, Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures. *Constr. Build. Mater.* **162**, 142–154 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.025> - [Article Google Scholar](#)
38. A. Younis, U. Ebead, S. Judd, Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement. *Constr. Build. Mater.* **175**, 152–160 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.183> - [Article Google Scholar](#)

39. S. Reichenbach, P. Preinstorfer, M. Hammerl, B. Kromoser, A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe. *Constr. Build. Mater.* **307**, 124946 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124946> - Article [Google Scholar](#)
40. J. Du, C. Wang, M. Qiao, X. Chang, H. Chen, Flexural behavior of concrete beams reinforced by CFRP bars. *J. Compos. Constr.* **13**(5), 350–359 (2010). <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536776> - Article [Google Scholar](#)
41. L.C. Hollaway, A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Constr. Build. Mater.* **24**(12), 2419–2445 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062> - Article [Google Scholar](#)
42. O.H. Zinkaah, Z. Alridha, M. Alhawat, Numerical and theoretical analysis of FRP reinforced geopolymer concrete beams. *Case Stud. Constr. Mater.* **16**, e01052 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01052> - Article [Google Scholar](#)
43. G. Fava, V. Carvelli, M.A. Pisani, Remarks on bond of GFRP rebars and concrete. *Compos. Part B Eng.* **93**, 210–220 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.012> - Article [Google Scholar](#)
44. P. Santos, G. Laranja, P.M. França, J.R. Correia, Ductility and moment redistribution capacity of multi-span T-section concrete beams reinforced with GFRP bars. *Constr. Build. Mater.* **49**, 949–961 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.014> - Article [Google Scholar](#)
45. T.A. Niyazuddin, P. Kinjawadekar, A.P. Nagarajan, Shashikala, design of short columns reinforced with GFRP bars subjected to axial loading. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **936**, 012003 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/936/1/012003> - Article [Google Scholar](#)
46. M.N.S. Hadi, H. Karim, M.N. Sheikh, Experimental investigations on circular concrete columns reinforced with gfrp bars and helices under different loading conditions. *J Compos Constr* **20**(4), 1–12 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000670](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000670) - Article [Google Scholar](#)
47. M.S. Issa, I.M. Metwally, S.M. Elzeiny, Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars. *Eng. Struct.* **33**(5), 1754–1763 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.014> - Article [Google Scholar](#)
48. C.B. Nayak, M. Tade, S.B. Thakare, Strengthening of Beams and Columns using GFRP Bars. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **225**, 012144 (2017). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/225/1/012144> - Article [Google Scholar](#)
49. X. Hu, J. Xiao, K. Zhang, Q. Zhang, The state-of-the-art study on durability of FRP reinforced concrete with seawater and sea sand. *J. Build. Eng.* **51**, 104294 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104294> - Article [Google Scholar](#)
50. M.R. Ehsani, H. Saadatmanesh, S. Tao, Design recommendations for bond of GFRP rebars to concrete. *J. Struct. Eng.* **122**(3), 247–254 (1996). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1996\)122:3\(247\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1996)122:3(247)) - Article [Google Scholar](#)
51. S. Sirimontree, S. Keawsawasvong, C. Thongchom, Flexural behavior of concrete beam reinforced with gfrp bars compared to concrete beam reinforced with conventional steel reinforcements. *J Appl Sci Eng* **24**(6), 883–890 (2021). [https://doi.org/10.6180/jase.202112\\_24\(6\).0009](https://doi.org/10.6180/jase.202112_24(6).0009) - Article [Google Scholar](#)

52. V.C. Li, S. Wang, Flexural behaviors of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Mater. J.* **99**(1), 11–21 (2002). <https://doi.org/10.14359/11311> - [Article Google Scholar](#)
53. C. Barris, L. Torres, A. Turon, M. Baena, A. Catalan, An experimental study of the flexural behaviour of GFRP RC beams and comparison with prediction models. *Compos. Struct.* **91**(3), 286–295 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.05.005> - [Article Google Scholar](#)
54. A. Rolland, M. Quiertant, A. Khadour, S. Chataigner, K. Benzarti, P. Argoul, Experimental investigations on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars. *Constr. Build. Mater.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.169> - [Article Google Scholar](#)
55. J.M. Yang, K.H. Min, H.O. Shin, Y.S. Yoon, Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. *Compos. Part B Eng.* **43**(3), 1077–1086 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.044> - [Article Google Scholar](#)
56. H. Wang, A. Belarbi, Caratteristiche di duttilità di travi in calcestruzzo fibrorinforzato con armature in FRP. *Cost. Costruire. Mamma.* **25**(5), 2391–2401 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.040> - [Articolo Google Scholar](#)
57. W. Rui Yang, X. Jun He, L. Dai, Comportamento al danno delle travi in calcestruzzo rinforzate con barre in vetroresina. *Compos. Struct.* **161**, 173–186 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.041> - [Articolo Google Scholar](#)
58. M.A. El, M.E. El, Effetto dei tondini in fibra di vetro sul comportamento duttile delle travi in cemento armato. *Alessandria Eng. J.* **57**(4), 4071–4079 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.012> - [Articolo MathSciNet Google Scholar](#)
59. J. Tu, K. Gao, L. He, X. Li, Studio sperimentale sulle prestazioni di compressione assiale di pilastri quadrati in calcestruzzo armato con GFRP. *Avv. Struct. Eng.* **22**(7), 1554–1565 (2019). <https://doi.org/10.1177/1369433218817988> - [Articolo Google Scholar](#)
60. S. Spagnuolo, A. Meda, Z. Rinaldi, A. Nanni, Comportamento residuo di barre di vetro FRP sottoposte ad alte temperature. *Compos. Struct.* **203**, 886–893 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.077> - [Articolo Google Scholar](#)
61. M.A. Ali, E. El-Salakawy, Prestazioni sismiche di pilastri rettangolari in calcestruzzo armato con vetroresina. *J. Compos.* **20**(3), 1–12 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000637](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000637) - [Articolo Google Scholar](#)
62. O.S. AlAjarmeh, A.C. Manalo, B. Benmokrane, P.V. Vijay, W. Ferdous, P. Mendis, Nuovi test e caratterizzazione delle barre in GFRP in compressione. *Cost. Costruire. Mamma.* **225**, 1112–1126 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.280> - [Articolo Google Scholar](#)
63. H.Y. Leung, R.V. Balendran, Comportamento flessionale di travi in calcestruzzo rinforzate internamente con barre in GFRP e armature in acciaio. *Struct. Surv.* **21**(4), 146–157 (2003). <https://doi.org/10.1108/02630800310507159> - [Articolo Google Scholar](#)
64. B. Saikia, P. Kumar, J. Thomas, K.N. Rao, A. Ramaswamy, Prestazioni di resistenza e funzionalità di travi rinforzate con barre in GFRP in flessione. *Cost. Costruire. Mamma.* **21**(8), 1709–1719 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.021> - [Articolo Google Scholar](#)

65. V.G. Kalpana, K. Subramanian, Comportamento delle travi in calcestruzzo armato con barre in vetroresina. *J. Reinf. Plast. Compos.* (2011). <https://doi.org/10.1177/0731684411431119> - [Articolo Google Scholar](#)
66. I.F. Kara, A.F. Ashour, M.A. Köroğlu, Comportamento flessionale di travi ibride in calcestruzzo armato FRP/acciaio. *Compos. Struct.* **129**, 111-121 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.073> - [Articolo Google Scholar](#)
67. M. Bazli, M. Heitzmann, BV Hernandez, Strutture ibride in calcestruzzo con polimeri rinforzati con fibre e sabbia marina di acqua di mare: una revisione sistematica sulle prestazioni strutturali a breve e lungo termine. *Cost. Costruire. Mamma.* **301**, 124335 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124335> - [Articolo Google Scholar](#)
68. H. Jafarzadeh, M. Nematzadeh, Rafforzamento flessionale di travi in calcestruzzo armato con vetroresina danneggiate dal fuoco utilizzando fogli CFRP: studio sperimentale e analitico. *Compos. Struct.* **288**, 115378 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115378> - [Articolo Google Scholar](#)
69. P.P. Lochan, M.A. Polak, Determinazione della resistenza alla trazione delle barre in GFRP utilizzando prove di flessione. *Cost. Costruire. Mamma.* **314**, 125630 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125630> - [Articolo Google Scholar](#)
70. R. Liu, C.P. Pantelides, Resistenza al taglio dei pannelli prefabbricati in calcestruzzo leggero armato con vetroresina. *Cost. Costruire. Mamma.* **48**, 51–58 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.057> - [Articolo Google Scholar](#)
71. N. A. A. Hamid et al., Previsione della resistenza al taglio per travi in calcestruzzo rinforzate con barre in vetroresina. 02013 (2017).
72. D. Lau, H.J. Pam, Studio sperimentale di travi ibride in cemento armato FRP. *Ing. Struct.* **32(12)**, 3857–3865 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.028> - [Articolo Google Scholar](#)
73. F.R. de Sá, F.D.A. Silva, D.C. Cardoso, Prestazioni di trazione e flessione di elementi in calcestruzzo rinforzati con fibre di polipropilene e barre in vetroresina. *Compos. Struct.* **253**, 112784 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112784> - [Articolo Google Scholar](#)
74. V. Gribniak, A. Rimkus, L. Torres, D. Hui, Uno studio sperimentale su fessurazioni e deformazioni di elementi in calcestruzzo a trazione rinforzati con più barre in vetroresina. *Compos. Struct.* **201**, 477–485 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.059> - [Articolo Google Scholar](#)
75. L. Pang, W. Qu, P. Zhu, J. Xu, Proposte progettuali per travi ibride in cemento armato FRP-acciaio. *J. Compos.* **20(4)**, 04015086 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000654](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000654) - [Articolo Google Scholar](#)
76. X. Ruan, C. Lu, K. Xu, G. Xuan, M. Ni, Comportamento flessionale e funzionalità di travi in calcestruzzo ibride-rinforzate con barre in PRFV e barre d'acciaio. *Compos. Struct.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111772> - [Articolo Google Scholar](#)
77. M. Kaszubska, R. Kotynia, J.A.O. Barros, Influenza del rapporto di armatura longitudinale del GFRP sulla capacità di taglio delle travi in calcestruzzo senza staffe. *Procedia Eng.* **193**, 361–368 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.225> - [Articolo Google Scholar](#)

78. F. Yuan, Y. Xiong, P. Li, Y. Wu, Comportamento flessionale delle travi in calcestruzzo aggregato di corallo di sabbia marina di acqua di mare rinforzato con barre FRP. *J. Compos.* 26(6), 1–16 (2022). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001264](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001264) - Articolo Google Scholar
79. O. Gouda, A. Asadian, K. Galal, Comportamento a flessione e a manutenzione di travi in calcestruzzo rinforzate con barre nervate in GFRP. *J. Compos.* 26(5), 1–19 (2022). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001253](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001253) - Articolo Google Scholar
80. O. Gouda, A. Hassanein, K. Galal, Equazioni di lunghezza di sviluppo proposte per barre in GFRP in elementi in calcestruzzo armato a flessione. *J. Compos. Costruzione* (2023). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001272](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001272) - Articolo Google Scholar
81. M. Robert, B. Benmokrane, Effetto dell'invecchiamento sull'incollaggio di barre in GFRP incorporate nel calcestruzzo. *Cem. Concr. Compos.* 32(6), 461–467 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.010> - Articolo Google Scholar
82. A. Lapko, M. Urbański, Analisi sperimentale e teorica delle deflessioni di travi in calcestruzzo armato con armatura di basalto. *Arch. Civ. Mech. Ing.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.03.008> - Articolo Google Scholar
83. H. El-Hassan, T. El-Maaddawy, A. Al-Sallamin, A. Al-Saidy, Valutazione delle prestazioni e caratterizzazione microstrutturale di barre in PRFV in calcestruzzo contaminato da acqua di mare. *Cost. Costruire. Mamma.* 147, 66–78 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.135> - Articolo Google Scholar
84. J. Youssef, M.N.S. Hadi, Diagrammi assiali carico-momento flettente di colonne rinforzate in GFRP e colonne quadrate rivestite in GFRP. *Cost. Costruire. Mamma.* 135, 550–564 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.125> - Articolo Google Scholar
85. A. Raza, Q.U.Z. Khan, A. Ahmad, Indagine numerica della capacità di carico di elementi rettangolari in calcestruzzo rinforzato con GFRP utilizzando il modello CDP in abaqus. *Avv. Civ. Ing.* (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/1745341> - Articolo Google Scholar
86. R. Hassanli et al., An experimental study of the behavior of GFRP-reinforced precast concrete culverts. *J. Compos. Constr.* 26(5), 1–15 (2022). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001224](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001224) - Article Google Scholar
87. R. Qin, A. Zhou, D. Lau, Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Compos. Part B Eng.* 108, 200–209 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.054> - Article Google Scholar
88. ACI440.3R, Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers ( FRPs ) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. *Test* , 1–40 (2004).
89. ASTM D7913/D7913M, Standard test method for bond strength of fiber-reinforced polymer matrix composite bars to concrete by pullout testing. *Am. Soc. Test. Mater.* 14, 1–9 (2020). <https://doi.org/10.1520/D7913> - Article Google Scholar
90. Y. Yao, H. Zou, Experimental study on bonding property between FRP and concrete. *ICADME* (2015). <https://doi.org/10.2991/icadme-15.2015.220> - Article Google Scholar
91. F. Yan, Z. Lin, M. Yang, Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: a review. *Compos. Part B Eng.* 98, 56–69 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.068> - Article Google Scholar

92. D.M. Hashim Mohammed, A review of bond behavior of glass fiber reinforced polymer bars with concrete. *J. Eng. Sustain. Dev.* 23(3), 142–157 (2019). <https://doi.org/10.31272/jeasd.23.3.11> - Article Google Scholar
93. Can.csa.s806-02, Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (CAN/CSA S806-02). *Csa S806-02 (Reaffirmed)*, 177 (2009).
94. K.M.A. Hossain, D. Ametrano, M. Lachemi, Bond strength of GFRP bars in ultra-high strength concrete using RILEM beam tests. *J. Build. Eng.* 10, 69–79 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.02.005> - Article Google Scholar
95. M. Harajli, M. Abouniaj, Bond performance of GFRP bars in tension: experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines. *J. Compos. Constr.* 14(6), 659–668 (2010). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000139](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000139) - Article Google Scholar
96. A.G. Bediwy, E.F. El-Salakawy, Assessment of bond strength of GFRP bars embedded in fiber-reinforced cementitious composites. *J. Compos. Constr.* (2022). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001198](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001198) - Article Google Scholar
97. B. Basaran, I. Kalkan, E. Bergil, E. Erdal, Estimation of the FRP-concrete bond strength with code formulations and machine learning algorithms. *Compos. Struct.* 268, 113972 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113972> - Article Google Scholar
98. A. Doost Mohamadi, A. Vatani Oskouei, A. Kheyroddin, An experimental study on effect of concrete type on bond strength of GFRP bars. *J. Rehabil. Civil Eng.* 9(1), 52–70 (2021). <https://doi.org/10.22075/JRCE.2020.19922.1392> - Article Google Scholar
99. A. Ahmed, S. Guo, Z. Zhang, C. Shi, D. Zhu, A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete. *Constr. Build. Mater.* 256, 119484 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119484> - Article Google Scholar

## Riconoscimenti

---

Vorremmo ringraziare la Manipal Academy of Higher Education, Manipal, Karnataka, India.

## Finanziamento

---

Finanziamento ad accesso aperto fornito dalla Manipal Academy of Higher Education, Manipal. Gli autori dichiarano che non sono stati ricevuti fondi, sovvenzioni o altri sostegni durante la preparazione di questo manoscritto.

## Informazioni sull'autore

---

### Autori e affiliazioni

- Scuola di Architettura e Pianificazione di Manipal, Accademia di Istruzione Superiore di Manipal, Manipal, Karnataka, 576104, India
- Trupti Amit Kinjawadekar e Shantharam Patil
- Dipartimento di Ingegneria Civile, Manipal Institute of Technology, Manipal Academy of Higher Education, Manipal, Karnataka, 576104, India

- Gopinatha Nayak

## Autore corrispondente

Corrispondenza con [Shantharam Patil](#).

# Dichiarazioni etiche

---

## Conflitto di interessi

A nome di tutti gli autori, l'autore corrispondente dichiara che non vi è alcun conflitto di interessi per quanto riguarda la pubblicazione di questo manoscritto.

## Approvazione etica

A nome di tutti gli autori, l'autore corrispondente dichiara di aver seguito i principi etici accettati nello studio e che non ci sono conflitti di interesse finanziari o personali che potrebbero aver avuto un impatto sulla ricerca riportata in questa pubblicazione.

## Diritti umani e animali

In questo lavoro non sono stati utilizzati soggetti animali o umani. Questo manoscritto è un articolo originale e non è stato pubblicato su altre riviste. Confermiamo inoltre che non c'è modo che il nostro manoscritto sia in possibile conflitto con gli standard etici richiesti dalla rivista.

# Informazioni aggiuntive

---

## Nota dell'editore

Springer Nature rimane neutrale per quanto riguarda le rivendicazioni giurisdizionali nelle mappe pubblicate e le affiliazioni istituzionali.

## Diritti e autorizzazioni

**Accesso aperto** Questo articolo è distribuito con Licenza Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale, che consente l'uso, la condivisione, l'adattamento, la distribuzione e la riproduzione su qualsiasi supporto o formato, a condizione che si dia il giusto credito all'autore originale e alla fonte, si fornisca un link alla licenza Creative Commons e si indichi se sono state apportate modifiche. Le immagini o altro materiale di terze parti in questo articolo sono inclusi nella licenza Creative Commons dell'articolo, se non diversamente indicato in una riga di credito del materiale. Se il materiale non è incluso nella licenza Creative Commons dell'articolo e l'uso previsto non è consentito dalla normativa di legge o supera l'uso consentito, sarà necessario ottenere l'autorizzazione direttamente dal detentore del copyright. Per visualizzare una copia di questa licenza, visitare <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

[Ristampe e permessi](#)

# A proposito di questo articolo

---

Cita questo articolo



Kinjawadekar, T.A., Patil, S. & Nayak, G. Una revisione critica sulle barre polimeriche rinforzate con fibra di vetro come rinforzo negli elementi flessionali. *J. Inst. Ing. India Ser. A* **104**, 501–516 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40030-023-00729-6>

- Ricevuto 08 Ottobre 2022
- Accettato 23 Marzo 2023
- Editato 17 Aprile 2023
- Data di emissione Giugno 2023
- DOI <https://doi.org/10.1007/s40030-023-00729-6>