

COMPORTAMENTO ELASTOPLASTICO DI ANCORAGGI COMPOSITI

Alberto Bisson

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, ICEA, Università degli Studi di Padova
alberto.bisson@dicea.unipd.it

Simonetta Cola

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, ICEA, Università degli Studi di Padova
simonetta.cola@unipd.it

Gaetano Dalla Gassa

Dalla Gassa s.r.l., Cornedo Vicentino (VI)
contatti@dallagassa.com

Sommario

Gli ancoraggi con barre autoperforanti sono una buona alternativa alle tradizionali tecniche di ancoraggio passivo. Per ampliare il loro campo di applicazione e migliorarne le caratteristiche meccaniche è allo studio lo sviluppo di un nuovo tipo di barre autoperforanti dette barre composite, che nascono dall'accoppiamento di una barra tradizionale e di uno o più trefoli di acciaio armonico. Il presente intervento propone un semplice modello matematico per la descrizione del comportamento meccanico delle barre composite e lo mette a confronto con i risultati di una serie di prove sperimentali preliminari.

1. L'ancoraggio autoperforante

Nel campo dell'ingegneria geotecnica gli ancoraggi con barra autoperforante si configurano come una buona alternativa ai tradizionali ancoraggi di tipo passivo, quali le barre cementate, infisse o getto-iniettate. Essi trovano ormai frequente impiego nel sostegno temporaneo o permanente di pareti di scavo con Soil Nailing o nella stabilizzazione di pendii.

Le autoperforanti sono barre cave in acciaio filettate per tutta la lunghezza mediante rullatura a freddo di tubi lisci. Sono generalmente poste in opera con l'utilizzo di una perforatrice a roto-percussione, utilizzando la barra stessa, munita in testa di punta a perdere, come asta di perforazione e una boiaccia cementizia molto fluida (rapporto a/c prossimo a 1) come fluido di spurgo. Una volta raggiunta la profondità di progetto, per poter cementare e solidarizzare correttamente la barra al terreno circostante, la miscela cementizia viene addensata fino ad un rapporto a/c pari a 0.4.

Un intervento con barre autoperforanti presenta diversi vantaggi, quali una maggior semplicità e velocità di esecuzione, un incremento del diametro reso del bulbo cementato e un minor costo.

Per questo l'uso delle barre autoperforanti è in forte crescita. Nell'ottica di sfruttare i vantaggi offerti dalle barre autoperforanti e, allo stesso tempo, ampliare il loro campo di applicazione, recentemente è stata proposta una nuova tipologia di barre, dette barre composite. Esse mirano a soddisfare una duplice esigenza: da una parte, migliorare il comportamento in stato limite di esercizio sviluppando elementi in grado di lavorare con carichi di rottura più elevati a parità di allungamento in dominio elastico; d'altra parte, realizzare un rinforzo che offra un miglior comportamento in condizioni di stato limite ultimo, in grado cioè di sviluppare minori deformazioni plastiche a parità di allungamento rispetto a una barra tradizionale.

2. L'ancoraggio composito

Una barra autoperforante tradizionale è ricavata per rullatura da una barra liscia in acciaio dolce. L'acciaio di colata della barra vergine presenta solitamente una percentuale di carbonio pari a 0.18-0.20%, comunque mai superiore a 0.23%: nella lega sono presenti in percentuali ridotte anche altri elementi chimici, quali manganese (1.3-1.4%), silicio (0.3-0.4%), fosforo (0.01%), zolfo (0.002%) e alluminio (0.03-0.04%). Le barre lisce presentano elevata duttilità e allungamento medio a rottura molto grande (25-30%, in ogni caso non inferiore al 15%). La riserva di resistenza plastica è molto alta: infatti, il rapporto tra tensione di rottura e tensione di snervamento, quest'ultimo assunto come limite elastico convenzionale in quanto non vi è snervamento localizzato, è pari a circa 1.4-1.6.

Durante il processo di rullatura a freddo l'acciaio incrudisce: si osserva un incremento sia della resistenza a rottura che della tensione di snervamento e della rigidità, a scapito però di una contrazione del campo plastico e una riduzione della duttilità. La riserva di resistenza plastica si riduce a circa 1.2 e l'allungamento omogeneo a carico massimo A_{gt} si attesta tra 5% e 8%.

Le barre composite nascono dall'idea di accoppiare le prestazioni offerte da una barra autoperforante tradizionale con quelle dei trefoli d'acciaio usualmente utilizzati per i tiranti e più economici. I trefoli sono realizzati in acciaio armonico, cioè un acciaio al silicio ad alto tenore di carbonio (0.8-0.9%) ricotto e successivamente temprato. Il processo di lavorazione produce un acciaio altamente resistente e deformabile in campo elastico, con una soglia di snervamento elevata, ma con un rapporto tra tensioni di rottura e di snervamento più basso rispetto all'acciaio dolce, generalmente compreso tra 1.05 e 1.25. Gli acciai armonici presentano inoltre basso rilassamento, garantendo quindi l'assenza di sostanziali perdite di tensione nel tempo.

Nell'ancoraggio composito l'accoppiamento tra barra e trefoli è realizzato attraverso il semplice inserimento di uno o più trefoli nella cavità della barra tradizionale e la successiva cementazione mediante una speciale iniezione cementizia. L'installazione di una particolare testata di bloccaggio per i trefoli completa lo sviluppo, consentendo il raggiungimento di elevati carichi di rottura senza sfilamento della barra da dado e manicotto di giunzione.

3. Caratteristiche meccaniche della barra composita

La risposta tensio-deformativa del sistema composito formato da barra, trefoli e malta cementizia si basa sulle seguenti ipotesi:

- 1) congruenza del sistema accoppiato: assumendo una perfetta aderenza tra barra, trefoli ed eventuale miscela di cementazione interna, le deformazioni dei singoli elementi del sistema devono essere tra loro uguali;
- 2) equilibrio del sistema accoppiato: la forza complessiva applicata al sistema composito è pari alla somma delle forze agenti nei singoli elementi del sistema;
- 3) variazioni termiche trascurabili.

In prima analisi si considera una barra composita costituita dai soli elementi barra e trefoli senza cementazione interna, con l'obiettivo di studiare l'effetto dell'accoppiamento dei due acciai sul comportamento del sistema in campo elastico e plastico, nonché sull'allungamento della barra.

A partire dalle ipotesi di congruenza (1) e di equilibrio (2), è possibile descrivere la rigidità equivalente teorica del sistema di base così ottenuto tramite lo sviluppo della legge di Hooke e dei teoremi di Kirkhoff per le resistenze in parallelo:

$$\frac{F_b(\sigma)}{E_b(\sigma) \cdot A_b} = \frac{F_t(\sigma)}{E_t(\sigma) \cdot A_t} = \frac{F(\sigma)}{(EA)_{eq}(\sigma)} \quad \text{dove: } A = A_b + A_t \quad (1)$$

$$F_b(\sigma) + F_t(\sigma) = F(\sigma) = (EA)_{eq}(\sigma) \cdot \frac{\Delta l(\sigma)}{l_0} \quad (2)$$

definendo come rigidità assiale equivalente $(EA)_{eq}(\sigma)$ il rapporto tra forza complessiva e deformazione del sistema. Nelle precedenti espressioni si assume che i moduli elastici siano dipendenti dallo stato tensionale σ .

Attraverso alcuni elementari passaggi matematici si perviene all'espressione:

$$(EA)_{eq}(\sigma) = [E_b(\sigma) \cdot A_b + E_t(\sigma) \cdot A_t] \quad (3)$$

dalla quale è possibile ricavare il modulo elastico equivalente della barra composita:

$$E_{eq}(\sigma) = \frac{[E_b(\sigma) \cdot A_b + E_t(\sigma) \cdot A_t]}{A_b + A_t} \quad (4)$$

Si può notare che la rigidità assiale equivalente del sistema è pari alla somma delle rigidità assiali dei componenti singoli, mentre il modulo di elasticità equivalente è la media pesata dei singoli moduli. In presenza della miscela di cementazione la forza assorbita dalla barra viene trasmessa ai trefoli interni grazie all'aderenza tra trefolo e boiaccia cementizia. A tal riguardo per definire la lunghezza minima di ancoraggio dei trefoli, in analogia con il calcestruzzo armato precompresso, si assume valido un modello a bielle compresse con alcune opportune considerazioni su effetto cuneo e splitting (Leonhardt, 1977). E' possibile inoltre ipotizzare un'influenza della nervatura interna delle barre sul legame di aderenza, con lo sviluppo di una componente radiale di compressione ortogonale alla nervatura (Tepfers, 1982).

4. Prove sperimentali

Per studiare il comportamento reale della barra composita e raffrontarlo con il comportamento teorico esposto nel paragrafo precedente, è stata programmata una campagna di prove sperimentali di trazione e in particolare:

- su barra Sirive® R32L singola;
- su barra Sirive® R32L singola cementata all'interno con cemento tipo 32.5;
- su barra composita costruita da una barra Sirive® R32L e un trefolo di diametro pari a 0.6" non cementato all'interno;
- su barra composita costruita da una barra Sirive® R32L e un trefolo di diametro pari a 0.6" cementato all'interno con cemento tipo 32.5. Questa prova è stata ripetuta eseguendo anche un ciclo di carico-scarico una volta oltrepassata la soglia di plasticizzazione.

Per le prove si è utilizzato un martinetto idraulico con foro passante, opportunamente calibrato tramite cella di carico e certificato da ente abilitato (Figura 1a). Inoltre al fine di poter effettuare anche prove senza cementazione, è stata utilizzata una speciale testata per l'aggancio barra+trefolo: tale testata, brevettata da Dalla Gassa s.r.l. di Cornedo Vicentino (Figura 1b), permette il trasferimento del carico di trazione del trefolo direttamente sui dadi di serraggio, di modo che il carico assorbito dai trefoli non gravi sulla barra e si riduca al contempo la possibilità di scorrimento barra-dado. Gli allungamenti

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche.

Descrizione	Barra Sirive®	Trefolo 0.6"	Barra Sirive®	Barra composita
	R32L		R38	(teorica)
Diametro nominale [mm]	32	15.2	38	32
Area acciaio [mm ²]	420	140	800	560
Modulo elastico [MPa]	73810	194445	45170	104230
Carico di rottura [kN]	287	270	500	557
Limite elastico 1% [kN]	240	236	430	467

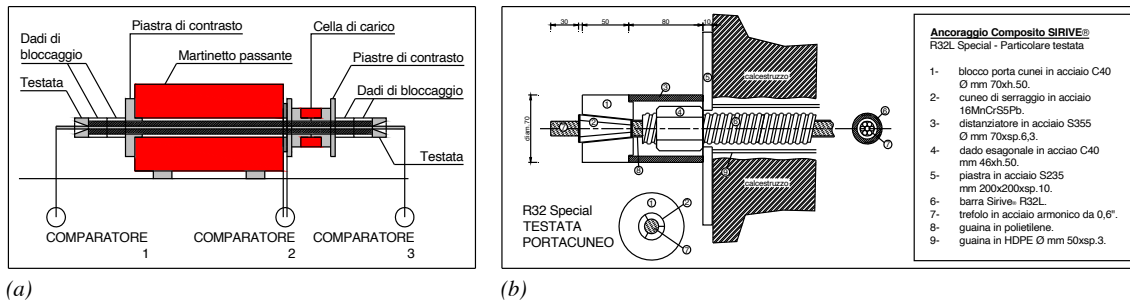


Figura 1. Prova di trazione su barre composite: schema di prova (a) e particolare della testata di bloccaggio dei trefoli (b).

della barra sono misurati secondo lo schema di Figura 1a. Le caratteristiche meccaniche di barre e trefoli utilizzati nelle prove sperimentali sono riassunte in Tabella 1.

Le curve Forza-Allungamento così ottenute sono riportate in Figura 2. Nello stesso grafico è riportata anche la curva teorica ricavata con le Eqq.(2-4) per una barra composta formata da una barra Sirive® R32L e un trefolo da 0.6". I moduli elastici sperimentali utilizzati sono stati assunti variabili in funzione della sollecitazione agente.

Dai risultati si può osservare che:

- La resistenza a rottura sperimentale è prossima a quella teorica, seppur di poco minore. Si deve comunque sottolineare che la forza misurata a rottura di 485 kN è paragonabile a quella di una barra Sirive® R38 (Tabella 1), avente una sezione d'acciaio di 800 mm², maggiore di quella della barra composta di circa il 42%.
- Rispetto alla barra singola, la barra composta presenta un aumento della forza sviluppata a parità di allungamento, sia in dominio elastico che plastico. L'allungamento sperimentale della barra composta è però maggiore di quello previsto dal modello teorico. Questo fatto può essere dovuto in parte alla non perfetta aderenza tra trefolo e barra, la quale non permette una perfetta ripartizione della sollecitazione agente tra barra e trefolo, ma soprattutto al leggero scorrimento dei dadi di bloccaggio e all'assettamento dei cunei blocca-trefoli, che causano uno scostamento tra il comportamento del sistema e l'ipotesi di perfetta congruenza assunta

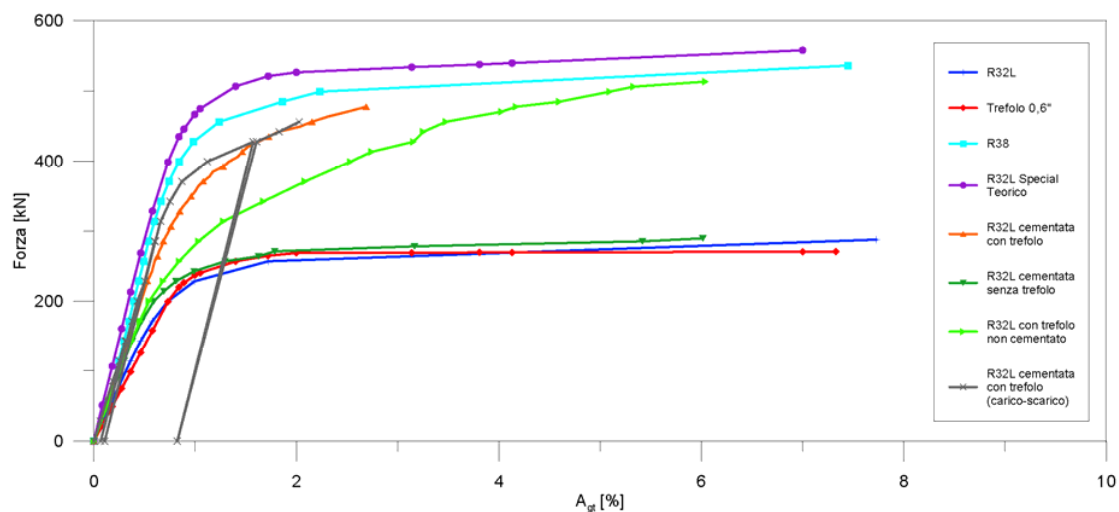


Figura 2. Confronto tra curve Forza-Allungamento ottenute mediante modello analitico e prove sperimentali per barre semplici e composite.

nel modello. A tal riguardo, sono in programma ulteriori test per meglio individuare le cause dello scostamento tra comportamento sperimentale e modello, oltre che per valutare come gli sforzi si trasmettano dalla barra al trefolo. Si deve sottolineare, inoltre, che questo è un difetto del sistema di prova, che utilizza un campione di barra composita di lunghezza modesta. Tale difetto non dovrebbe osservarsi in barre lunghe, per le quali cioè la trasmissione della forza al trefolo avviene per aderenza tra barra e miscela cementizia e poi tra miscela e trefolo. E' possibile ipotizzare infine un miglioramento del legame d'aderenza dovuto al confinamento della boiaccia cementizia interna causato dalla strizione della barra.

- Il limite elastico del sistema composito è maggiore dei corrispondenti limiti degli elementi singoli; l'accoppiamento con il trefolo amplia quindi il limite superiore dei carichi ammissibili in campo elastico della barra semplice.
- Dalla prova di carico-scarico si evidenzia come in campo plastico, a parità di allungamento, le deformazioni plastiche del sistema composito siano inferiori a quelle della sola barra.

5. Vantaggi geotecnici e tecnologici del sistema composito

La barra composita ottenuta per accoppiamento di una barra tradizionale e di uno o più trefoli presenta numerosi vantaggi.

Il principale vantaggio della barra composita è certamente il minor costo a parità di caratteristiche meccaniche del sistema, che deriva principalmente dal minor impiego di materiale e dai minori costi di esecuzione e di posa in opera. Per comprovare tale affermazione la Tabella 2 pone a confronto il costo a metro lineare, comprensivo di accessori, lavorazioni e utili di impresa di tre diverse tipologie di rinforzo, ottenuto con riferimento ad un sistema con resistenza a rottura di progetto pari a 3000 kN. Dall'analisi si evince come il sistema composito sia il più conveniente con un risparmio del 45% rispetto alla barra semplice e dell'11% rispetto ai trefoli usati singolarmente.

Il sistema offre inoltre la possibilità di realizzare ancoraggi con alti carichi di rottura contenendo le deformazioni della barra. Il minor allungamento in fase di esercizio è di notevole impatto sulla durabilità dell'opera: lo sviluppo di minori deformazioni, limita le fessurazioni che si instaurano nella boiaccia cementizia esterna, garantendo una maggior protezione della barra alla corrosione.

La barra composita presenta una maggiore inerzia flessionale, data dalla sezione cava in acciaio ma anche dalla presenza del riempimento. A parità di resistenza a trazione, l'inerzia flessionale è

Tabella 2. Analisi dei costi per i tre sistemi di ancoraggio (barra composita, barra semplice e ancoraggio con trefoli) per una resistenza a rottura 3000 kN.

Descrizione	Costo [€/metro]		
	Barra composita	Barra semplice	Trefoli
Barra acciaio Fe55, sezione 1800 mm ²	21.06		
Nr. 8 trefoli, diametro 0.6"	8.00		
Barra acciaio Fe55, sezione 5455 mm ²		63.83	
Nr. 12 trefoli, diametro 0.6"			12.00
Accessori e confezionamento	42.85	67.00	69.00
Subtotale costi di produzione	71.91	130.83	81.00
Costi generali 8%	5.75	10.47	6.48
Subtotale	77.66	141.30	87.48
Utile impresa 30%	23.30	42.39	26.24
COSTO TOTALE	100.96	183.69	113.72
Risparmio %	-	-45.04	-11.22

certamente maggiore di quella che caratterizza la sola barra o un tirante realizzato con soli trefoli. Ulteriori punti di forza dell'ancoraggio composito, non facilmente quantizzabili, sono la maggiore semplicità di trasporto dei materiali, la velocità di esecuzione dell'intervento, l'adattabilità della lunghezza di ancoraggio alle diverse condizioni geologico-geotecniche presenti in loco e la continuità data dal trefolo al rinforzo completo. Circa quest'ultimo punto è importante sottolineare come il trefolo che si estende per tutta la lunghezza dell'ancoraggio, soprattutto nei casi di rinforzi molto lunghi ottenuti per giunzione con manicotto di numerose barre, migliori l'accoppiamento tra barre successive rispetto a quello dato dai soli manicotti.

6. Conclusioni

I risultati fino ad ora ottenuti indicano come la barra composita sia una soluzione certamente migliorativa in termini economici e tecnologici, anche se il comportamento ottenuto in laboratorio in prove preliminari dimostra un certo scostamento rispetto al modello previsionale e risultati inferiori alle aspettative.

E' in programma l'esecuzione di ulteriori prove sperimentali per esaminare in dettaglio il comportamento in aderenza trefolo-boiacca cementizia e valutare l'influenza del tipo di boiacca sui meccanismi di trasferimento e ripartizione dei carichi nel sistema composito. Questo soprattutto perché prove preliminari eseguite con boiacche espansive (qui non mostrati per brevità) sembrano indicare una maggiore rigidità complessiva della barra e un miglioramento dell'aderenza dovuto ad un maggior confinamento del trefolo.

7. Ringraziamenti

L'accoppiamento di barra autoperforante e trefoli è un brevetto dell'impresa Dalla Gassa s.r.l. (brevetto italiano VI2012A000051, 2 Marzo 2012). E' inoltre in corso la domanda di brevetto europeo (Barra Autoperforante Composita SIRIVE® Special, deposito EP 13157515.1, 1 Marzo 2013). La sua caratterizzazione meccanica è in fase di studio all'interno di programma di Dottorato di Ricerca dell'Università degli Studi di Padova, finanziato dall'impresa stessa.

Si ringraziano coloro che hanno contribuito allo studio e alla realizzazione dell'ancoraggio composito; in particolare la ditta Dalla Gassa s.r.l., il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, gli studi professionali Geosoluzioni Engineering s.r.l. e Giara Engineering s.r.l. e l'Ufficio Difesa del Suolo della Provincia di Vicenza.

Bibliografia

- Cola et al. (2012). "Reinforcement works for the slope stabilization: standard and new approaches for the use of micropiles and anchors", ISM 2012: 11th International Workshop on Micropiles, Milano.
- Tepfers R. (1982). "Lapped tensile reinforcement splices", American Society of Civil Engineers, Journal of the Structural Division, January 1982, 283-301, New York.
- Tepfers R. (1982). "Tensile lap splices with confining reinforcement", Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete, Paisley, Scotland, June 1982, 318-330. Edited by P. Bartos, Applied Science Publishers, London.
- Leonhardt F., Moennig E. (1977). "Casi speciali di dimensionamento nelle costruzioni in c.a. e c.a.p.", Edizioni tecniche, Milano.