

GFRP reinforcement application for precast tunnel segments

Applicazione di armature in fibra di vetro per conci prefabbricati da tunnel

A. Meda¹, Z. Rinaldi¹, S. Spagnuolo¹

¹ *Civil Engineering and Computer Science Department, University of Rome Tor Vergata, Rome, Italy*

ABSTRACT: The possibility of replacing the traditional steel reinforcement with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) rebars in precast concrete tunnel segmental lining is investigated herein. The use of GFRP rebars as structural reinforcement in precast tunnel segments, shows several advantages in terms of structural durability or in cases of temporary lining that will have to be demolished later. Furthermore, this reinforcement type can be a suitable solution to create dielectric joints, ensuring the interruption of possible stray currents which often lead to corrosion problems. In the present work, the experimental test results on full-scale precast segments are shown. In particular, the structural performance of two reinforced concrete solutions will be analysed and compared. / La possibilità di sostituire la tradizionale armatura in acciaio con barre in fibra di vetro nel rivestimento prefabbricato di tunnel realizzati con scavo meccanizzato è analizzata nel presente lavoro. L'uso di barre in fibra di vetro come rinforzo strutturale di conci prefabbricati per Tunnel, presenta diversi vantaggi in termini di durabilità strutturale o nei casi di rivestimento provvisorio, che in un secondo momento dovrà essere demolito. Inoltre, tale tipologia di rinforzo può essere una valida soluzione per creare giunti dielettrici, garantendo l'interruzione di possibili correnti vaganti e l'insorgere di problemi di corrosione che da esse si generano. Nel presente lavoro sono illustrati i risultati sperimentali di prove eseguite su conci prefabbricati in scala reale. In particolare saranno analizzate e poste a confronto le prestazioni strutturali delle due soluzioni di elementi in calcestruzzo armato rinforzati con acciaio tradizionale (CA-A) e con rinforzo in vetroresina (CA-VTR).

KEYWORDS: GFRP rebars, reinforced concrete; tunnel applications, full scale tests; / barre in GFRP; calcestruzzo armato; applicazioni per gallerie, prove sperimentali in scala reale.

1 INTRODUZIONE

Nel campo delle strutture in calcestruzzo armato, una soluzione innovativa che può essere proposta in alternativa alle armature tradizionali in acciaio, soprattutto quando è richiesta una elevata resistenza all'attacco ambientale, è rappresentata dalle armature in fibra di vetro (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer). Rispetto all'acciaio, le armature in GFRP non sono soggette a problemi di corrosione, presentano un'elevata resistenza a trazione ed un peso specifico inferiore (Nanni 1993, Benmokrane et al. 1995, Alsayed et al. 2000). Inoltre, un'altra loro importante proprietà è la trasparenza elettromagnetica. Dal punto di vista strutturale, devono essere considerati alcuni aspetti quali: il basso modulo elastico e la scarsa aderenza con il calcestruzzo (Cosenza et al. 1997, Yoo et al. 2015), la sensibilità nei riguardi della fatica statica (Almussalam et al. 2006). Infine, la durabilità della barra in vetroresina è funzione delle fasi che la

compongono (Micelli & Nanni 2004, Chen et al. 2007)

Nel presente lavoro, è stata studiata la possibilità di utilizzare armature in fibra di vetro in qualità di rinforzo interno di conci prefabbricati in calcestruzzo per il rivestimento di gallerie. Nelle gallerie scavate meccanicamente, generalmente mediante fresa meccanica a piena sezione (TBM - Tunnel Boring Machine), il rivestimento è composto da elementi prefabbricati che vengono posizionati ed installati durante il processo di scavo. Gli stessi conci del rivestimento vengono al contempo utilizzati come elementi di contrasto durante la fase di avanzamento della TBM.

Nel campo delle gallerie, possono essere individuate due diverse classi di applicazione strutturale: strutture temporanee e strutture permanenti. Per quanto riguarda le strutture temporanee, l'uso di conci prefabbricati rinforzati con barre in GFRP è adatto in tutte le porzioni di galleria che devono essere successivamente demolite e portate a smaltimento. Esempi tipici si possono ritrovare nelle

linee metropolitane o ferroviarie nelle quali, una volta realizzata l'intera canna alcune porzioni devono essere demolite per la realizzazione delle stazioni. Un altro esempio si può trovare nelle gallerie stradali nelle quali alcune sue porzioni devono essere demolite per la realizzazione di nicchie di sicurezza o bypass tra canne adiacenti. In tutti questi casi, il vantaggio di utilizzare un rinforzo in GFRP è legato alla rapidità delle procedure per la demolizione e smaltimento.

Per quanto riguarda le strutture permanenti, i vantaggi nell'utilizzo di GFRP sono più rilevanti. Tale rinforzo può rappresentare una buona soluzione laddove problemi di durabilità potrebbero compromettere l'integrità della galleria (ad esempio, gallerie realizzate in terreni aggressivi o in gallerie con funzione di trasporto delle acque reflue). Inoltre, la possibilità di usare un rinforzo non soggetto a corrosione consente una riduzione del copriferro, andando quindi a ridurre possibili danni durante le fasi di movimentazione, trasporto ed installazione dei conci prefabbricati. Infine, data la trasparenza elettromagnetica di queste armature, è possibile realizzare giunti dielettrici nelle gallerie. Infatti, grazie all'installazione di una serie di anelli in calcestruzzo armato rinforzato con barre in GFRP, è possibile interrompere l'insorgere di correnti vaganti e il problema della corrosione che da esse si genera. In definitiva, l'adozione di questa tipologia di armatura, in sostituzione all'acciaio da carpenteria può essere proposta in strutture come le gallerie. Infatti, sebbene il loro costo è superiore rispetto a quello delle tradizionali armature, risulta bilanciato sia da un punto di vista dei "costi per la manutenzione dell'opera" durante la sua vita utile richiesta (100÷120 anni) sia dai vantaggi precedentemente descritti. Inoltre, il rivestimento in condizioni di servizio risulta essere principalmente soggetto a compressione, di conseguenza la domanda sul rinforzo viene notevolmente diminuita. Dal punto di vista strutturale, è importante dimostrare che il comportamento di conci prefabbricati per gallerie rinforzati con barre in GFRP è paragonabile a quello rinforzato in acciaio. A tal fine, sono state eseguite prove di flessione in scala reale su entrambi i sistemi.

Vengono inoltre presentate alcune considerazioni in merito alla progettazione di conci prefabbricati rinforzati con questa nuova tipologia di armatura.

2 PROGETTO DEL RIVESTIMENTO DELLA GALLERIA

La progettazione e le verifiche di sicurezza di conci prefabbricati in cemento armato per galleria, siano essi rinforzati con acciaio (da ora denominato CA-A) che con GFRP (da ora denominato CA-VTR), possono essere eseguite utilizzando domini resistenti

M-N (Momenti- sforzo Normale), ottenuti attraverso equilibri di traslazione e rotazione. Le sollecitazioni agenti sul concio durante le diverse fasi, che vanno dalla produzione alla messa in opera dello stesso, possono essere valutate con riferimento agli schemi statici descritti nei paragrafi che seguono e in (ACI 5447R-16 2016, Caratelli et al. 2012, Caratelli et al. 2016, Di Carlo et al. 2016, Spagnuolo et al. 2016) La condizione di progetto è verificata se tutte le coppie agenti (M-N) risultano essere interne al dominio resistente.

Le verifiche devono essere condotte sia per le fasi transitorie (scasseratura, stoccaggio, trasporto e movimentazione) che per la fase finale (pressione del terreno esercitata sul rivestimento installato). Al fine di valutare le prestazioni del concio CA-VTR, è stato realizzato un concio di riferimento con armatura tradizionale CA-A.

I domini resistenti (M-N) allo stato limite ultimo sono stati tracciati secondo quanto prescritto da NTC'08, EC2 e CNR-DT 203/2006. Planarità delle sezioni e perfetta aderenza tra armature in GFRP e calcestruzzo sono le ipotesi adottate alla base delle analisi effettuate. Inoltre, per il legame costitutivo del calcestruzzo in compressione è stato usato un modello parabola-rettangolo così come illustrato in (EN 1992-1 2008) con massima deformazione a compressione (ϵ_{cu}) pari a 0.0035 mm/mm. La resistenza del calcestruzzo a trazione viene trascurata.

Le barre in GFRP presentano un comportamento elastico-lineare fino a rottura secondo quanto espresso dall'equazione 1, e con limiti imposti dalle equazioni 2 e 3:

$$f_f = E_f \epsilon \quad (1)$$

$$f_{fd} = \eta_a \eta_l \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad (2)$$

$$\epsilon_{fd} = 0.9 \eta_a \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (3)$$

Dove f_{fd} e ϵ_{fd} sono la resistenza a trazione e la deformazione ultima delle barre in GFRP, E_f è il modulo elastico, η_a , η_l e γ_f sono rispettivamente il fattore di riduzione ambientale, il fattore di riduzione che tiene conto degli effetti a lungo termine (nel caso in esame, considerando la struttura a carattere provvisoria, $\eta_l=1$) e il coefficiente di sicurezza, secondo quanto prescritto dal CNR-DT 203/2006. La resistenza a compressione delle barre in GFRP viene trascurata.

Nel caso del concio di riferimento, le analisi sono state condotte assumendo un comportamento elastico-plastico per l'acciaio.

2.1 Domini resistenti (M-N) allo SLU per le verifiche del conchio di galleria

Al fine di illustrare la procedura di verifica della sicurezza mediante la definizione di domini resistenti (M-N), di seguito viene proposto un esempio di pratica applicazione.

Per il caso studio è stata considerata una tipica geometria di un conchio prefabbricato per gallerie. L'elemento è caratterizzato da uno spessore di 400 mm, una lunghezza media lungo lo sviluppo radiale di 4.5 m e una larghezza di 1.485 m (Fig. 1). Il conchio di riferimento (CA-A) è rinforzato con una gabbia in acciaio da carpenteria costituita da 12 barre longitudinali $\varnothing 12$ mm, poste sia nella zona di intradosso che di estradosso del conchio con interferro variabile tra i 100÷200 mm; l'armatura trasversale è costituita da 32 staffe $\varnothing 10$ mm con passo variabile tra 125÷175 mm. L'acciaio usato è classificato, secondo le NTC'08, B450C con tensione caratteristica allo snervamento (f_{yk}) pari a 450 MPa. Il rinforzo in GFRP, invece, è stato progettato secondo quanto prescritto dal CNR-DT 203/2006 e considerando una classe di applicazione per il conchio di tipo "provvisoriale", in modo tale da avere la stessa capacità flessionale, in flessione pura, del conchio di riferimento. Alla luce di tali considerazioni, il conchio è stato rinforzato con 12 $\varnothing 12$ mm nella zona di estradosso e con 12 $\varnothing 14$ mm nella zona di intradosso. L'armatura trasversale si avvale di 32 staffe $\varnothing 12$ mm. Gli interferri ed i passi delle staffe sono gli stessi del conchio di riferimento.

Entrambi i conchi sono stati realizzati considerando un calcestruzzo di classe C40/50. Le proprietà di caratteristiche e di progetto dei materiali considerati sono riportate nella Tabella 1. In Figura 2 sono messi a confronto i domini resistenti (M-N) di entrambi i conchi armati con le due tipologie di rinforzo. Da tale confronto è possibile osservare la sovrapposizione in flessione pura, adottata come ipotesi progettuale dell'armatura in GFRP nei confronti dell'armatura di riferimento in acciaio.

Tabella 1. Characteristic/Design values of the material properties for the Design (M-N) Interaction diagram definition / Valori caratteristici e di progetto delle proprietà dei materiali per la definizione del dominio resistente (M-N).

Materiale	Valori caratteristici	Valori di progetto
Calcestruzzo	$R_{ck} = 50$ MPa	$f_{cd} = 27.6$ MPa
Acciaio	$f_{yk} = 450$ MPa	$f_{yd} = 391$ MPa
Vetroresina	$f_{fk} = 755$ MPa $E_f = 40$ GPa $\varepsilon_{fk} = 0.019$	$f_{fd} = 352.3$ MPa $\varepsilon_{fd} = 0.008$

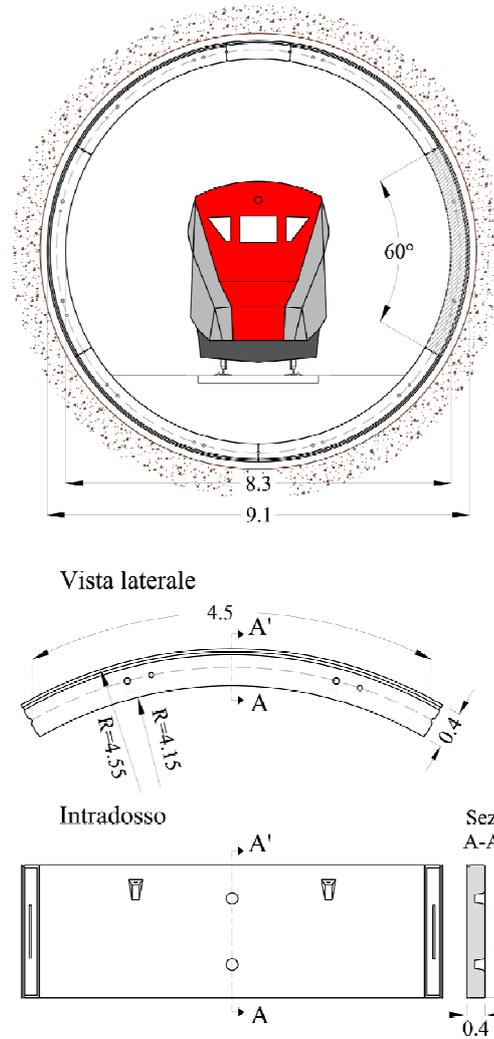


Figura 1. Segment geometry / Geometria del conchio.

3 CAMPAGNA SPERIMENTALE

La procedura proposta per le verifiche di sicurezza delle gallerie realizzate in scavo meccanizzato, basata sulla costruzione di domini resistenti (Caratelli et al. 2016, Spagnuolo et al. 2016), viene validata attraverso il confronto con i risultati delle prove sperimentali effettuate presso il Laboratorio dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" (Meda et al. 2014, Caratelli et al. 2016).

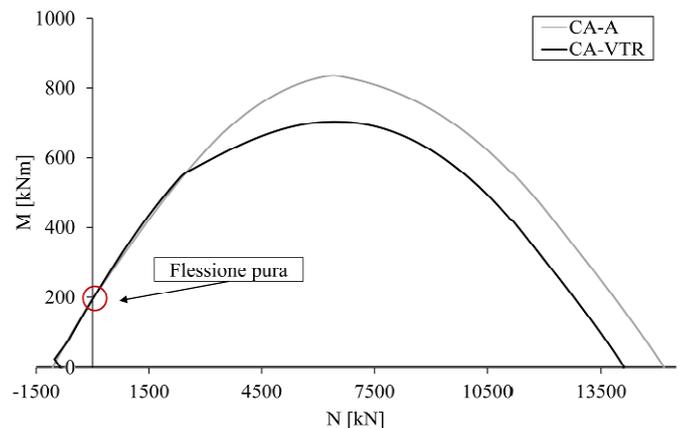


Figura 2. Design (M-N) interaction diagrams / Domini resistenti (M-N) di progetto.

Per le prove sono stati realizzati due conci in scala reale (Fig. 3), uno rinforzato con armatura ordinaria in acciaio e uno con armatura in GFRP, le cui geometrie (Fig. 4) e rinforzi sono stati descritti precedentemente. La resistenza cubica media del calcestruzzo (R_{cm}), misurata su cubi di lato 150 mm, è risultata pari a 61 MPa.



Figura 3. Casting of the segments / Getto dei conci.

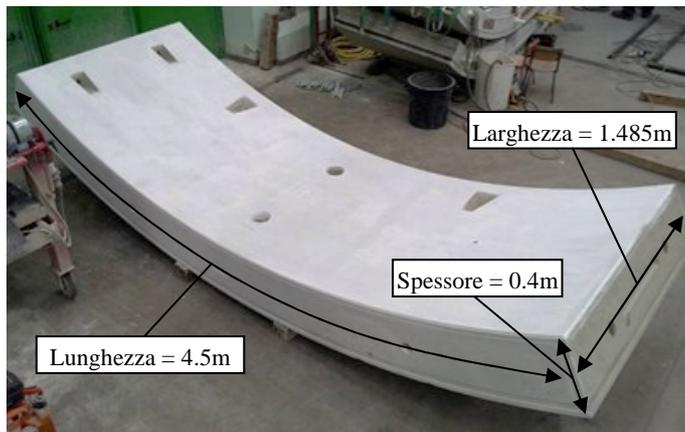


Figura 4. Experimental test: specimens' geometry / Prova sperimentale: geometria del conico.

I conci sono stati sottoposti a flessione al fine di evidenziare la risposta del rinforzo. Le prove a flessione, eseguite in controllo di spostamento, sono state condotte caricando i conci con il set-up di prova illustrato in Figura 5. Il sistema è costituito da una traversa di contrasto con capacità pari a 4000 kN. I conci sono stati alloggiati su un supporto cilindrico con interasse pari a 3 m ed il carico, applicato nella mezzeria è stato distribuito trasversalmente adottando una trave in acciaio come mostrato in Figura 4. Il carico è stato misurato con una cella di carico di capacità pari a 1000 kN. Durante la prova sono stati continuamente registrati sia lo spostamento in mezzeria (misurato grazie all'ausilio di tre potenziometri a filo installati lungo la linea trasversale in intradosso) sia le aperture delle fessure (misurate tramite due LVDT). Inoltre, durante la prova, grazie al tracciamento di una griglia (100x100 mm) sulla superficie di intradosso, è stata rilevata l'evoluzione del quadro fessurativo associato ai differenti livelli di carico.

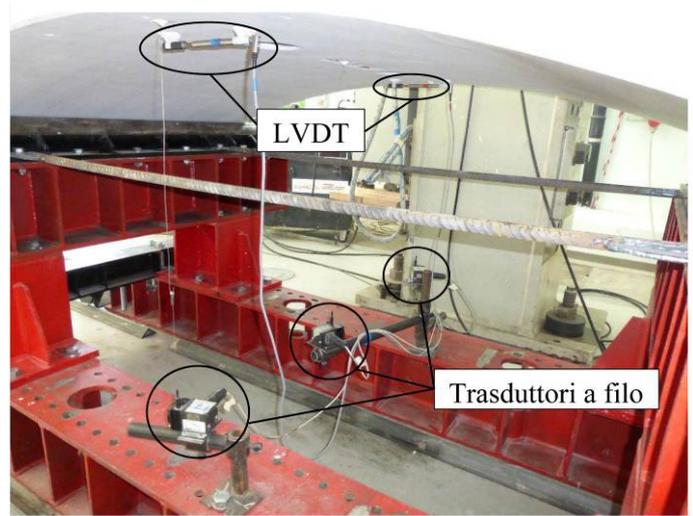
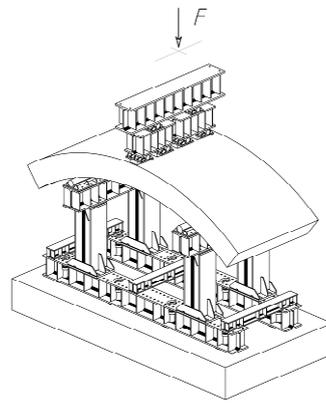


Figura 5. Test set-up / Schema di prova.

In Figura 6 sono riportati i risultati, espressi in termini di curve carico-spostamento, delle prove di flessione effettuate su entrambi i conci (CA-A; CA-VTR). In tabella 2 vengono riportati i valori di carico massimo raggiunto (P_{max}), il massimo spostamento in mezzeria (δ_{max}), lo spostamento di mezzeria allo snervamento (δ_y) e lo spostamento al cambio drastico di rigidità dell'elemento (δ_1). Inoltre viene data un'indicazione di duttilità (μ) in termini di spostamenti registrati sui due conci con le due diverse tipologie di rinforzo adottato, definito dal rapporto (δ_{max}) su ($\delta_{1/y}$). La prima fessurazione si è verificata per un livello di carico pari a 175 kN sul conico di riferimento (CA-A) e 130 kN sul conico CA-VTR. Il carico massimo raggiunto è stato di 395 kN per il conico CA-A e 640 kN per il conico CA-VTR. Dal confronto tra le curve si può osservare inoltre come il conico CA-A ha mostrato un comportamento più rigido del conico CA-VTR. Ciò è dovuto principalmente al più alto modulo elastico dell'acciaio rispetto al modulo elastico delle barre in GFRP (confrontabile con il modulo elastico del calcestruzzo). In entrambi i casi, la capacità ultima dell'elemento strutturale è stata raggiunta per il conseguimento della resistenza ultima a trazione del rinforzo in zona tesa. La Figura 7 mostra il rilievo

dei quadri fessurativi che si sono sviluppati durante la prova di carico. La fessurazione risulta essere più diffusa nel concio rinforzato con GFRP.

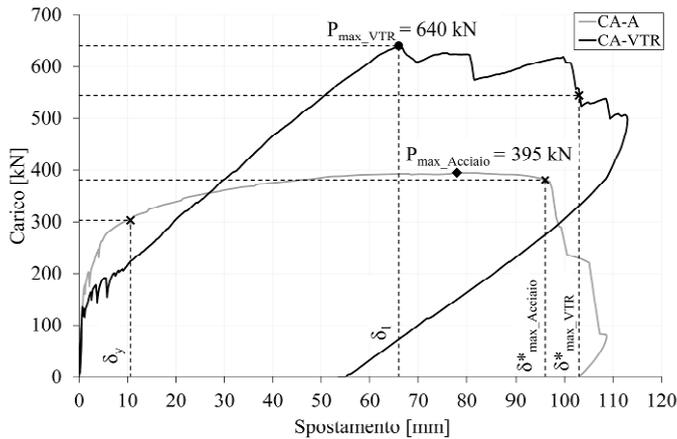


Figura 6. Load versus midspan displacement curves: comparisons between steel and GFRP segments / Curve carico-spostamento: confront tra i conchi CA-A e CA-VTR.

Tabella 2. Bending test results / Risultati della prova a flessione.

Rinforzo	Tipo rottura	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	δ_y (mm)	δ_l (mm)	μ (-)
Acciaio	barre	395	96	10.6	-	9.1
GFRP	barre	640	103*	-	65.2	1.6

* δ_{max} calcolato a $0.85P_{max}$. Nessun collasso a questo livello di carico.

Osservando la massima capacità flessionale, si può notare come quest'ultima sia molto più grande nel concio CA-VTR che in CA-A. Questo è dovuto ai differenti coefficienti riduttivi di sicurezza adottati in fase di progettazione ed ai differenti valori resistenti caratteristici dei singoli materiali in gioco, rispetto ai loro valori medi sperimentali. Infine, per verificare l'efficacia della procedura di controllo adottata, e riprodurre il reale comportamento dei due casi analizzati, sono stati costruiti domini resistenti (M-N) considerando i valori medi delle resistenze dei materiali sperimentalmente misurati (Tab. 3) e tutti i coefficienti riduttivi pari ad 1.

Il confronto dei domini resistenti (M-N), costruiti sui valori sperimentali, è illustrato in Figura 8. Nella stessa figura sono stati sovrapposti i valori di momento flettente associati al carico di rottura raggiunto durante le due prove (X, ●). Poiché i punti giacciono sui relativi domini, la procedura di controllo semplificata attraverso l'uso di domini resistenti (M-N) e le ipotesi adottate sui legami costitutivi dei materiali, risultano adatti per una previsione della capacità portante effettiva. Inoltre, come già accennato, si può osservare chiaramente che l'adozione di valori medi di resistenza del materiale (senza coefficiente di sicurezza) porta ad una più elevata resistenza flessionale del concio rinforzato con barre in GFRP, come evidenziato nelle prove in scala reale.

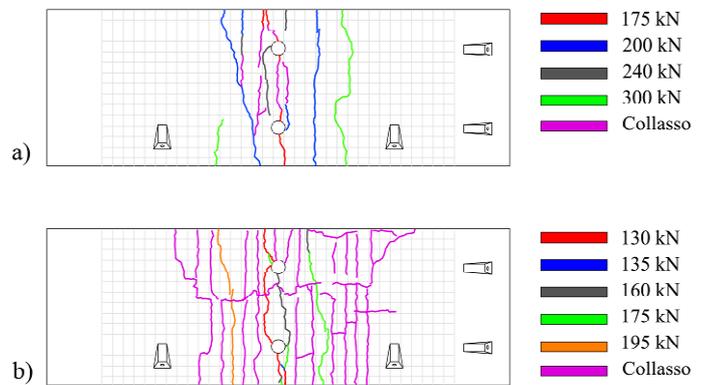


Figura 7. Final crack pattern: a) Steel; b) GFRP / Quadro fessurativo finale: a) CA-Acciaio; b) CA-VTR.

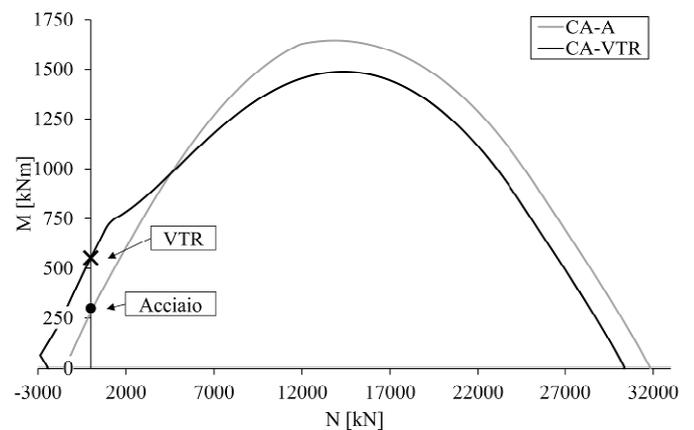


Figura 8. Experimental (M-N) interaction diagrams / Domini resistenti (M-N) sperimentali.

Tabella 3. Experimental values of the material properties for the Experimental (M-N) Interaction diagram definition / Valori sperimentali delle proprietà dei materiali per la definizione del dominio resistente (M-N) sperimentale.

Materiale	Valori caratteristici
Calcestruzzo	$R_{cm} = 61\text{MPa}$
Acciaio	$f_{ym} = 510\text{MPa}$
GFRP	$f_{fm} = 844\text{MPa}$

4 CASO STUDIO

Viene affrontato infine un caso studio relativo ad un concio rinforzato con barre in GFRP con lo scopo di mostrare praticamente la procedura per la definizione dei domini resistenti (M-N) per le principali fasi strutturali, a meno della condizione di spinta della TBM che non verrà trattata in questo studio richiedendo modellazioni differenti basate su analisi numeriche e/o sperimentali (Meda et al. 2016). Viene considerato lo stesso concio descritto nei paragrafi precedenti (sezione caratterizzata da uno spessore $s = 400$ mm, una larghezza $b = 1500$ mm e $L = 4500$ mm). Ogni singolo anello è composto da 5+1 (chiave) conchi prefabbricati in

calcestruzzo. Le proprietà dei materiali adottati sono riportati in Tabella 1.

4.1 Analisi delle azioni

La progettazione del rivestimento della galleria richiede diverse verifiche (Di Carlo et al. 2016, Spagnuolo et al. 2016) che vanno dalla fase di produzione e transitorie fino alla condizione di carico in esercizio (fase finale) dovuta alla pressione del terreno circostante la galleria. Di seguito vengono riassunte, per ogni fase strutturale, le forze agenti sul concio più sollecitato. Vale la pena notare che, oltre ai carichi agenti, anche le proprietà dei materiali costituenti il concio e gli schemi statici usati possono essere differenti per le diverse fasi, così come verrà mostrato di seguito.

4.1.1 Fasi di produzione e transitorie

Le fasi che vanno dalla produzione dei conci alla loro messa in esercizio sono rappresentate dalla scasseratura, lo stoccaggio, il trasporto e la movimentazione, così come descritto in (ACI 544.7R-16 2016).

Scasseratura e stoccaggio

I conci sono in genere scasserati attraverso l'uso di un dispositivo di sollevamento, che prevede, per esempio lo schema statico rappresentato in Figura 9a (due sbalzi caricati dal peso proprio) per la valutazione del momento flettente agente. Successivamente i conci sono posizionati sul pavimento. Per lo stoccaggio, ogni anello completo può essere impilato all'interno di un deposito: lo schema statico per la valutazione del momento flettente agente sul concio più sollecitato in tale fase è illustrato in Figura 9b. Per tener conto di possibili errori di posizionamento dei supporti durante lo stoccaggio, si considera un'eccentricità del carico (peso proprio) dei conci soprastanti il concio alla base, in entrambe le direzioni interna/esterna. Queste due fasi generalmente avvengono poche ore dopo il getto; quindi le verifiche devono essere effettuate con riferimento alla resistenza raggiunta dal calcestruzzo in tale fase.

Trasporto e movimentazione

Il trasporto su mezzi gommati o su rotaie avviene considerando pile di 3 conci ognuna (Fig. 9c). In questa fase si considerano, oltre che l'eventuale eccentricità del carico dovuta ad un possibile errato posizionamento dei conci, un coefficiente di urto dinamico pari a 2 da applicare alle azioni agenti (ACI 544.7R-16 2016). La movimentazione dei conci all'interno della galleria è effettuata con un erettore (Fig. 9d). Analogamente alla fase di trasporto, si considera un coefficiente di urto dinamico per le azioni di progetto. Queste due ultime fasi vengono generalmente esplicitate dopo

28 giorni dal getto dei conci, quindi la resistenza del calcestruzzo che si considera per le verifiche di sicurezza è quella di progetto.

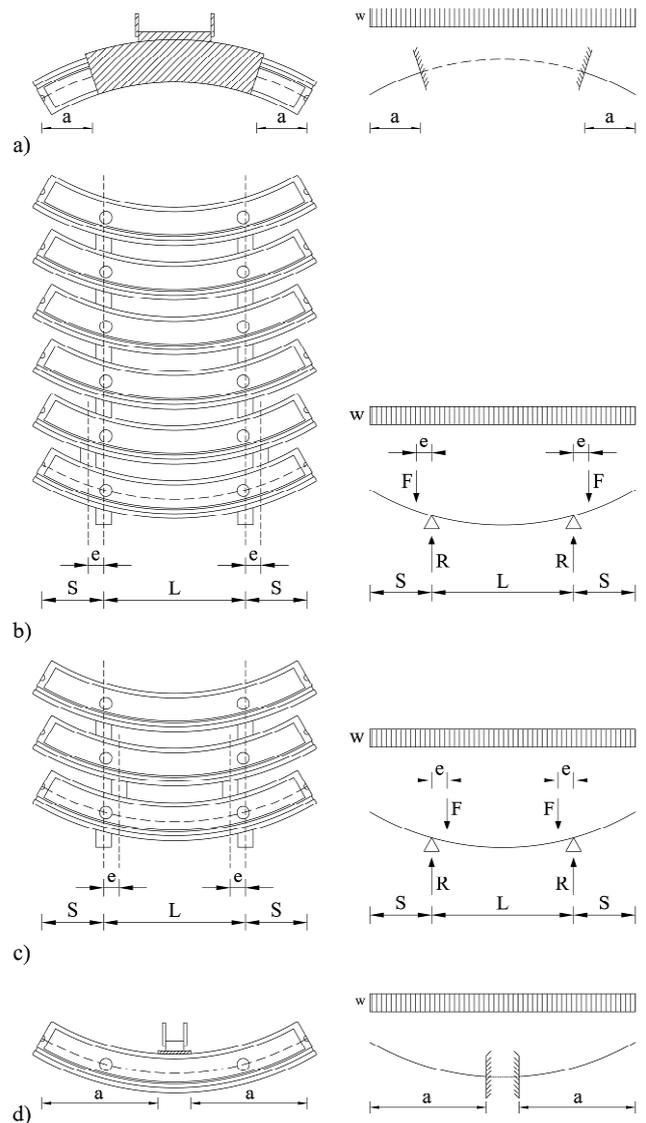


Figura 9. Product and transient phases: a) stripping; b) storage; d) transportation and d) handling / Produzione e fasi transitorie: a) scasseratura; b) stoccaggio; c) trasporto a d) movimentazione.

4.1.2 Fase finale: pressione del terreno

Lo stato tensionale generato dalla pressione del terreno sul rivestimento ad anelli della galleria e, se presente, presenza di acqua o/e condizioni eccezionali come il terremoto sono fornite dalla progettazione geotecnica in termini di sollecitazioni assiali e flettenti agenti.

Nel caso studio proposto, per motivi di semplicità, si è fatto riferimento alla sola pressione esercitata dal terreno, valutata tramite il programma FLAC 7.0 (ICG 2011). In particolare è stato considerato un terreno argilloso caratterizzato da una coesione $c=0.01 \text{ N/mm}^2$ ed un angolo di attrito interno $\phi=27^\circ$. Come criterio di rottura è stato adottato il criterio di Mohr-Coulomb. I risultati ottenuti, in termini di sforzo assiale e momento flettente, sono riportati in Figura 10.

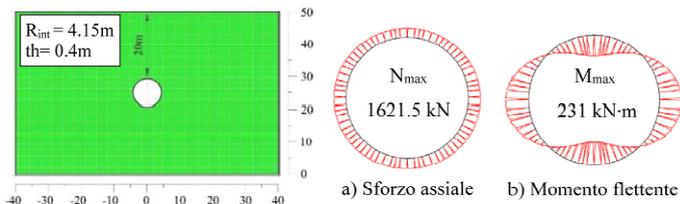


Figura 10. Soil action on the ring / Azione del terreno sull'anello.

4.2 Verifiche di sicurezza

Il controllo di sicurezza viene effettuato definendo domini resistenti (M-N) e verificando che i valori massimi di sollecitazione, valutati come precedentemente descritto e riassunti in Tabella 4, rientrino tutti all'interno del dominio ad essi associato (Spagnuolo et al. 2016). Le verifiche così descritte, sono riportate in Figura 11 con riferimento alle fasi transitorie (scasseratura, stoccaggio, trasporto e movimentazione) e alla fase finale, associata alla pressione esercitata dal terreno circostante il rivestimento della galleria. Le verifiche risultano tutte soddisfatte.

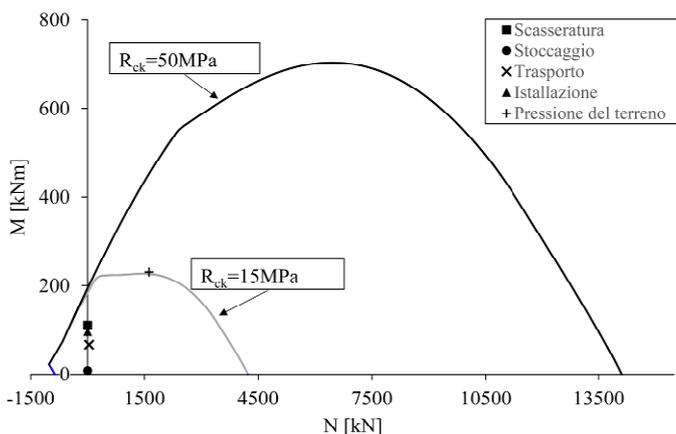


Figura 11. (M-N) Interaction diagrams: transient and final stage checks / Domini resistenti (M-N): verifiche delle fasi transitoria e finale.

Tabella 4. Summary of required checks for the different design stages / Riassunto delle verifiche richieste per le diverse fasi di progetto.

Condizione di carico: (fase)	Coeff. dinamico	R_{ck} (MPa)	M (kN·m)	N (kN)
Scasseratura	-	15	111	-
Stoccaggio	-	15	8.3	-
Trasporto	2.0	50	67	42
Movimentazione	2.0	50	96	-
Pres. terreno	-	50	231	1622

5 CONCLUSIONI

In the paper, the flexural behaviour of fiber reinforced tunnel segments with GFRP bars is analysed and compared with a traditional one,

reinforced with steel rebars. On the basis of the obtained results and comparison with experimental full-scale tests developed by the authors, the following aspects can be remarked:

- On the point of view of the flexural structural behavior, there are not significant differences when the steel reinforcement is substituted with a fiberglass reinforcement. In fact, although the steel-reinforced concrete sections are commonly under-reinforced to ensure yielding of the steel before the crushing of concrete, providing ductility and a warning of failure of the segments, the low/lack ductility of the segment reinforced with GFRP bars is compensated increasing the reserve of strength. In add, the warning of failure of the segment is guaranteed in the form of extensive cracking due to the significant elongation that GFRP bars show before the rupture.
- The simplified check procedure with (M-N) Interaction diagrams, and the adopted hypotheses on the constitutive relationship of the materials, appear suitable for foreseeing the actual bearing capacity of the segment.

Finally, the use of GFRP reinforcement in precast tunnel segment appears a very interesting and promising solution that can be proposed in some critical situations that often are present in tunnel construction. It is anyway to note that for obtaining successful results in this application an adequate conceptual design has to be performed with the aim of highlighting the advantages of GFRP use and at the same time maintaining a sustainable cost level.

Nel presente articolo, è stato analizzato e messo a confronto il comportamento flessionale di conci prefabbricati per GFRP con un concio tradizionale rinforzato con barre in acciaio. Sulla base dei risultati ottenuti e sulla comparazione delle prove sperimentali condotte alla scala reale sviluppate dagli autori, si possono sottolineare le seguenti aspetti:

- Dal punto di vista del comportamento strutturale a flessione, non ci sono differenze significative quando il tradizionale rinforzo in acciaio è sostituito con il rinforzo in GFRP. Infatti, sebbene il rinforzo in acciaio sia progettato in modo tale da favorire il suo snervamento prima di raggiungere la rottura del calcestruzzo per schiacciamento, garantendo duttilità e un preavviso al collasso del concio, la scarsa/mancanza di duttilità del concio rinforzato con barre in GFRP è compensata dall'aumento di riserva di resistenza offerta dall'elemento strutturale. Inoltre, il preavviso al collasso del concio è garantito nella forma di una più ampia fessurazione dovuta ad un significativo allungamento che le barre in GFRP subiscono prima della rottura.
- La procedura semplificata con i domini resistenti (M-N) e le ipotesi adottate sui legami costitutivi, sembrano adatti per la previsione della capacità flessionale dei conci.

Per concludere, l'uso di un rinforzo in GFRP per conci prefabbricati per gallerie sembra essere una soluzione interessante e promettente da poter proporre in alcune situazioni critiche che spesso si presentano nella realizzazione di una galleria. In ogni modo si deve notare che per ottenere risultati soddisfacenti in questa applicazione, deve essere eseguita una progettazione adeguata con lo scopo di sottolineare i vantaggi dell'uso dell'uso di armature in GFRP rispetto all'acciaio mantenendo, allo stesso tempo, il livello dei costi sostenibile.

CITAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- ACI (2006) ACI 440.1R-06 – Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute.
- ACI (2016) ACI 544.7R-16 – Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments.
- Almusallam, T., H., Al-Salloum, Y., A. (2006). Durability of GFRP Rebars in Concrete Beams under Sustained Loads at Severe Environments. *Journal of Composite Materials*, 40(7): 623-637.
- Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y.A., Almusallam, T.H. (2000). Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures. *Composite: Part B*, 31: 555-567.
- Benmokrane, B., Chaallal, O., Masmoudi, R. (1995). Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structure. *Construction and Building Materials*, 9(6): 353-364.
- Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z. (2012). Design according to MC2010 of a fibre-reinforced concrete tunnel in Monte Lirio, Panama. *Structural Concrete*, 13(3): 166-173.
- Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z., Spagnuolo, S. (2016). Precast tunnel segments with GFRP reinforcement. *Tunneling and Underground Space Technology*, 60:10-20.
- Chen, Y., Davalos, J. F., Kim, H-Y. (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composite Structures*, 78: 101-111.
- CNR DT 203-2006 (2007), Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. CNR Italian National Research Council.
- Cosenza, E., Manfredi, G., Realfonzo, R. (1997). Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete. *Journal of Composites for Constructions*.
- Di Carlo, F., Meda, A., Rinaldi, Z. (2016). Design procedure of precast fiber reinforced segments for tunnel lining construction. *Structural Concrete*. DOI: 10.1002/suco.201500194.
- EN 1992-1. Eurocode 2 (2008). Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- Meda A., Nerilli F., Rinaldi Z., Cignitti F., Sorge R. (2011). Numerical analysis of precast tunnel segmental lining supported by full-scale experimental tests. *TC28 – 7th Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground construction in soft ground*. 16-18 May, Rome.
- Meda, A., Rinaldi, Z., Spagnuolo S. (2014). Precast tunnel segments reinforced with fiber glass bars. *International Fib Congress (fib 2014), Mumbai, February*
- Meda, A., Rinaldi, Z., Caratelli, A., Cignitti, F. (2016). Experimental investigation on precast tunnel segments

- under TBM thrust action. *Engineering Structures*. 119: 257-265.
- Micelli, F., Nanni, A. (2004). Durability of FRP rods for concrete structures. *Construction and Building Materials*, 18: 491-503.
- Nanni, A. (ed.) (1993). Fiber-Reinforced-Plastic (GFRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and applications. *Elsevier Science. Developments in Civil Engineering*, 42:450.
- Spagnuolo, S., Meda, A., Rinaldi, Z., Nanni, A. (2016). Precast concrete tunnel segments with GFRP reinforcement. Submitted to *Journal of Composites for Construction*.
- Yoo, D-Y., Kwon K-Y., Park J-J., Yoon Y-S. (2015). Local bond-slip response of GFRP rebar in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*, 120: 53-64.