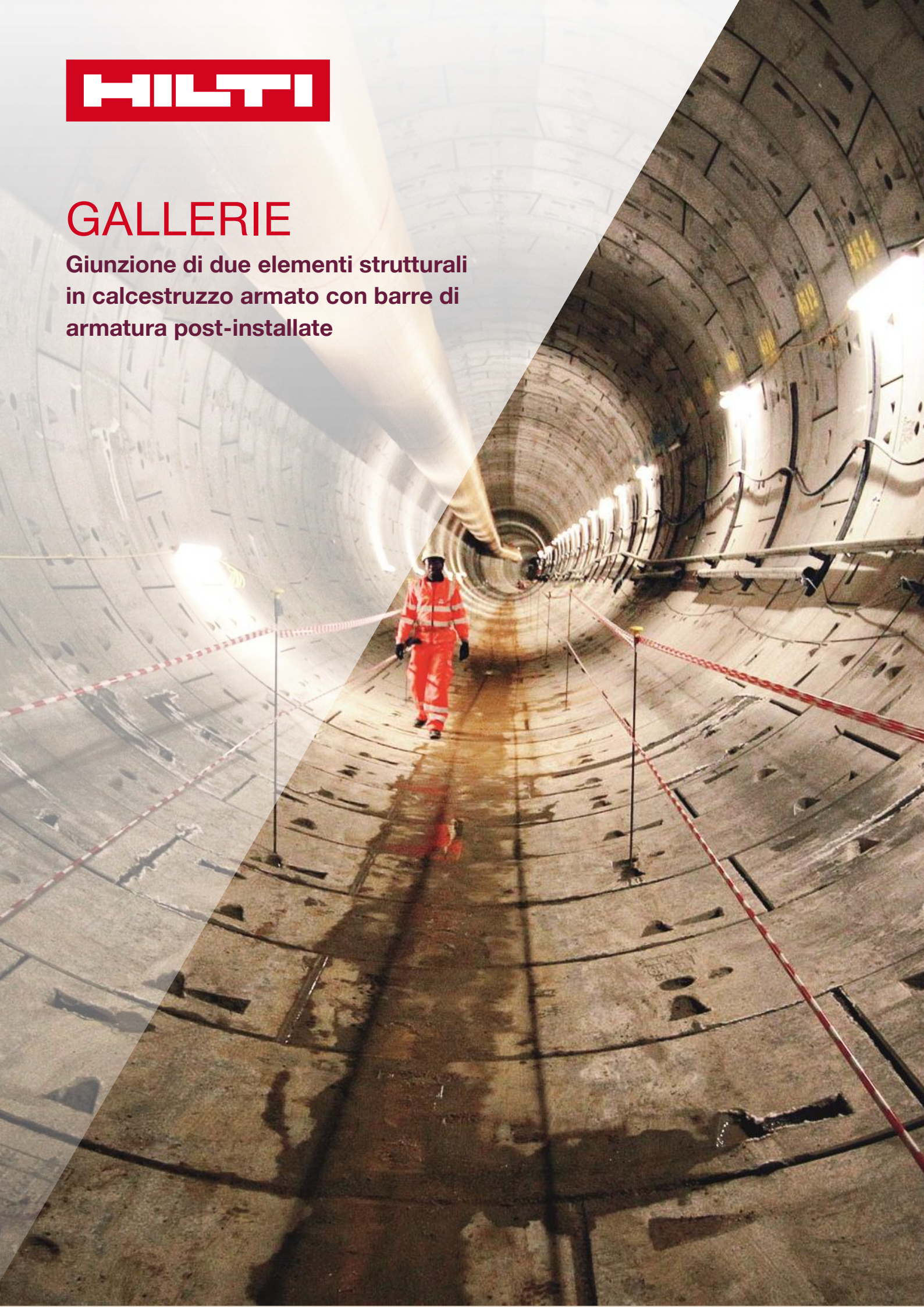




GALLERIE

**Giunzione di due elementi strutturali
in calcestruzzo armato con barre di
armatura post-installate**



SOMMARIO

1. Premessa	2
2. Introduzione	2
3. Osservazioni generali	3
4. Barre di armature post-installate – Definizione	3
5. Progettazione statica di connessioni con armatura post-installata	5
6. Progettazione sismica di connessioni con armatura post-installata	8
7. Sollecitazione a fatica nelle connessioni con armatura post-installata	9
8. Requisito di Vita Utile di 100 anni	9
9. Fuoco	10
10. Corrosione	11
11. Prodotti Hilti	12
12. Prove IN SITU	13
13. Riferimenti	15

1. PREMESSA

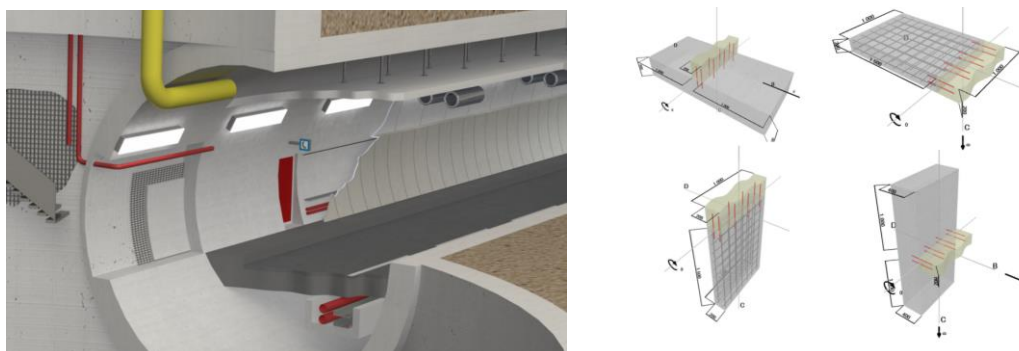
Le giunzioni tra due elementi in calcestruzzo con ferri di armatura post-installati sono importanti nella costruzione e manutenzione di gallerie (ad esempio le mensole per dividere lo spazio di ventilazione longitudinale in calotta oppure connessioni all'arco rovescio). La conoscenza delle diverse condizioni tecniche di applicazione, ma anche la scelta del giusto prodotto, sono fondamentali. L'intento di questo articolo è quello di fornire informazioni di base sui collegamenti con ferri di armatura post-installati nelle gallerie e di fornire una guida per la selezione e la progettazione del sistema di armatura post-installato.

2. INTRODUZIONE

I lavori nelle strutture sotterranee sono spesso difficili a causa delle limitazioni di spazio e/o della geometria della sezione trasversale. Ad esempio, in molte gallerie vengono installati soffitti sospesi per creare camere separate per la ventilazione longitudinale. È quasi impossibile creare questo spazio in un'unica fase di costruzione con il rivestimento interno. Alla fine, tutti gli elementi in calcestruzzo che devono essere collegati al rivestimento, dando vita a una connessione monolitica, come banchine, controsoffitti, divisori verticali e mensole, devono essere realizzati in un processo successivo e possono eventualmente essere collegati con dei ferri di armatura post-installati. La Figura 1 fornisce una panoramica schematica delle possibili connessioni tra elementi strutturali in calcestruzzo nelle gallerie. Queste giunzioni avvengono tra le strutture in calcestruzzo gettato in opera, unità prefabbricate o UHPFRC e il rivestimento in calcestruzzo della galleria oppure tra gli elementi stessi che possono eventualmente essere allungati, estesi o aggiunti.

Figura 1

Esempio di possibili connessioni calcestruzzo - calcestruzzo utilizzando i ferri di armatura post-installati nelle gallerie; connessione soletta-parete, estensione della soletta, estensione parete e connessione parete soletta.



Per la realizzazione delle connessioni tra elementi in calcestruzzo con ferri di armatura post-installati nelle gallerie sono preferiti gli ancoranti chimici a iniezione rispetto alla boiacca di cemento in sacchi. Questo perché gli ancoranti chimici a iniezione garantiscono una facilità d'uso e un'ottima qualità della applicazione. In questo modo si ha un sistema completo di installazione e pulizia che riduce al minimo gli errori durante la fase di installazione. Esistono numerosi sistemi facilmente reperibili sul mercato con caratteristiche di prodotto e di performance diverse o simili, oggetto delle Valutazioni Tecniche Europee (ETA) rilasciate da laboratori accreditati EOTA. Tuttavia, se non si ha a che fare quotidianamente con sistemi di ferri armatura post-installati, può essere difficile capire che tipo di condizioni al contorno si considerano nel caso di queste diverse ETA e che tipo di prodotto si dovrebbe utilizzare per la progettazione di questi collegamenti con ferri di armatura post-installati.

Questo articolo vuole fornire una panoramica sull'uso dei ferri di armatura post-installati nelle connessioni tra elementi in calcestruzzo nelle gallerie. Occorre notare che il presente documento non fa una

distinzione dettagliata tra i diversi tipi di tunnel (tunnel ferroviari, tunnel stradali, tunnel di servizio, ecc.), ma si concentra sui requisiti tecnici dei collegamenti con ferri di armatura post-installati in generale.

3. OSSERVAZIONI GENERALI

I sistemi con ferri di armatura post-installati per i collegamenti tra calcestruzzo e calcestruzzo nelle gallerie sono in genere scelti in base a considerazioni strutturali e sono tipicamente progettati e dettagliati da un ingegnere strutturale. È necessario un progetto tecnico dettagliato perché la rottura dei ferri di armatura post-installati può comportare rischi per la sicurezza e perdite economiche significative.

Il progetto verifica che i requisiti di stato limite ultimo (SLU) e dello stato limite di esercizio (SLE) siano soddisfatti. Allo stato limite ultimo, è necessario verificare che i valori di progetto delle azioni non superino il valore di progetto della resistenza del fissaggio. Lo stato limite di esercizio comprende i requisiti per limitare la deformazione o i requisiti di durabilità come la corrosione, l'attacco chimico, la temperatura e altri fattori che possono verificarsi nelle gallerie. Nell'analisi dello stato limite ultimo e dello stato limite di esercizio per i collegamenti dei ferri di armatura post-installati è necessario considerare i seguenti aspetti:

1. Tipo di azione (statica [a breve termine o a lungo termine], fatica, sisma, urto e fuoco)
2. Corrosione
3. Durata del progetto
4. Normativa o linea guida di progettazione applicabile

Ulteriori aspetti economici o qualitativi possono essere presi in considerazione già nella progettazione o nelle specifiche, ad esempio specificando carichi per prove di *pull-out*.

4. BARRE DI ARMATURE POST-INSTALLATE – DEFINIZIONE

Una giunzione con ferri di armatura post-installati consiste in una barra d'armatura installata con ancoranti chimici in fori praticati nel calcestruzzo esistente. Il calcestruzzo nuovo è collegato a quello esistente tramite le barre di armatura che sono annegate nel nuovo getto di calcestruzzo da un lato e, sull'altro lato dell'interfaccia, sono collegate al calcestruzzo esistente tramite l'adesivo chimico (Figura 2). Un collegamento con ferri di armatura post-installati può essere approssiato nello stesso modo in cui si approssiano i ferri gettati in opera solo se l'ancorante chimico è idoneo per questo tipo di utilizzo.

Le barre di armatura post-installate sono utilizzate sia per il retrofitting delle gallerie che per le nuove costruzioni e sono adatte a un'ampia gamma di applicazioni. Vengono spesso utilizzate per creare una connessione monolitica sia tra i nuovi elementi in calcestruzzo e il rivestimento esistente della galleria sia nella connessione di vari elementi secondari, per esempio, all'interno dei tunnel secondari di sicurezza, bypass.

Esempi di applicazioni comuni delle barre post-installate nella costruzione di gallerie sono:

- Apertura bypass (o in generale apertura del rivestimento del tunnel) e parziale chiusura del telaio di raccordo
- Giunzione di un diaframma in calcestruzzo
- Fissaggio e posizionamento delle reti in acciaio
- Sostituzione di manicotti (dispositivi meccanici di giunzione) gettati in opera in modo errato

- Giunzione a momento (nodo rigido) tra cordolo e del rivestimento del tunnel per poggiare la soletta di separazione della ventilazione longitudinale
- Getto di completamento sull'arco rovescio specialmente nelle gallerie scavate con TBM (spesso progettate come connettori a taglio secondo il *Technical Report* (TR) 066 dell'EOTA [5])

Le applicazioni sopra citate richiedono di solito il posizionamento di un gran numero di barre, spesso a distanza ravvicinata. Per evitare di perforare o danneggiare le barre di armatura esistenti nel rivestimento del tunnel, è possibile utilizzare apparecchiature di rilevamento delle armature, come i sistemi di scansione Hilti PS 250 o Hilti PS 1000.

In Figura 3 è mostrato un esempio di applicazione per il collegamento di un cordolo al rivestimento del tunnel. In generale, un'applicazione di giunzione con ferro di armatura post-installato può essere caratterizzata come segue:

(a) Le barre di armatura possono essere dritte, piegate o dotate di teste all'estremità gettata, ma sono necessariamente diritte all'estremità post-installata (Figura 2 e Figura 3).

(b) Le barre di armatura post-installate, a differenza degli ancoranti per piastre di base post-installate, possono essere spesso installate con un piccolo copriferro ($3\phi > c > 2\phi$), dove ϕ è il diametro della barra di armatura e c è il copriferro. Nelle gallerie scavate con TBM, questa condizione geometrica al contorno può essere per esempio dovuta alla geometria dei segmenti in calcestruzzo prefabbricato del rivestimento, detti conci. In questi casi, con condizioni geometriche del bordo sfavorevoli, la resistenza sotto carico di trazione della connessione di barre di armatura post-installate è tipicamente limitata dalla resistenza a fessurazione tipo splitting del calcestruzzo (caratterizzata dalla formazione di fessure per rottura da frattura lungo la lunghezza della barra).

(c) Le barre di armatura post-installate non sono tipicamente progettate per resistere al carico di taglio diretto come un tassello in applicazioni di piastre di base o nel caso di sovrapposizione di strati di calcestruzzo (connettori taglio). Nel caso di ferri di armatura post-installati, il taglio è tipicamente trasferito dalla superficie irruvidita tra il calcestruzzo esistente e quello nuovo (Figura 2).

(d) Le barre di armatura post-installate sono generalmente inghisate alla profondità richiesta per "sviluppare" la loro sollecitazione di progetto σ_{sd} tenendo conto delle disposizioni dell'EN 1992-1 [1] per la lunghezza di ancoraggio di base richiesta, la lunghezza di ancoraggio di progetto o la lunghezza di sovrapposizione. Per ottenere la duttilità della connessione la sollecitazione di progetto sarà spesso imposta vicino allo snervamento.

(e) Per la lunghezza di ancoraggio delle barre post-installate si possono applicare anche le disposizioni riportate nel TR 069 [2] In questo caso, eventuale rottura può essere dovuta all'acciaio in trazione oppure a rotture lato calcestruzzo. Il TR 069 [2] combina i principi di progettazione del calcestruzzo armato secondo EN 1992-1-1 [1] con i principi della teoria di ancoraggio al calcestruzzo secondo EN 1992-4. Il metodo di dimensionamento sfrutta in modo ottimale le prestazioni del sistema di resina e barra di armatura. Per maggiori dettagli sull'applicazione e sul *design concept* del TR 069, vedere [3].

Figura 2
Armatura post-installata dritta o piegata a L, vedere [4].

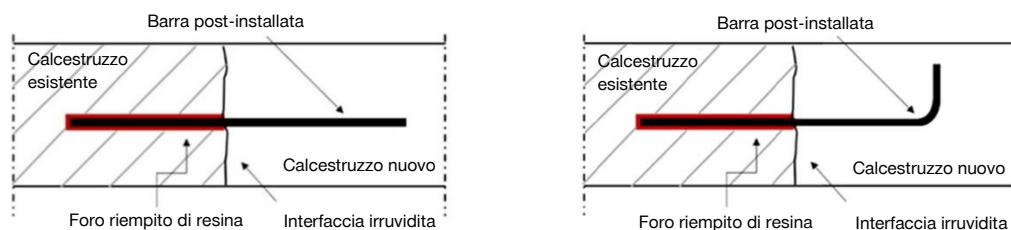
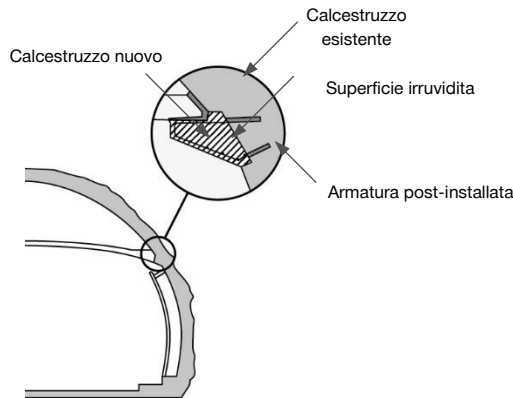
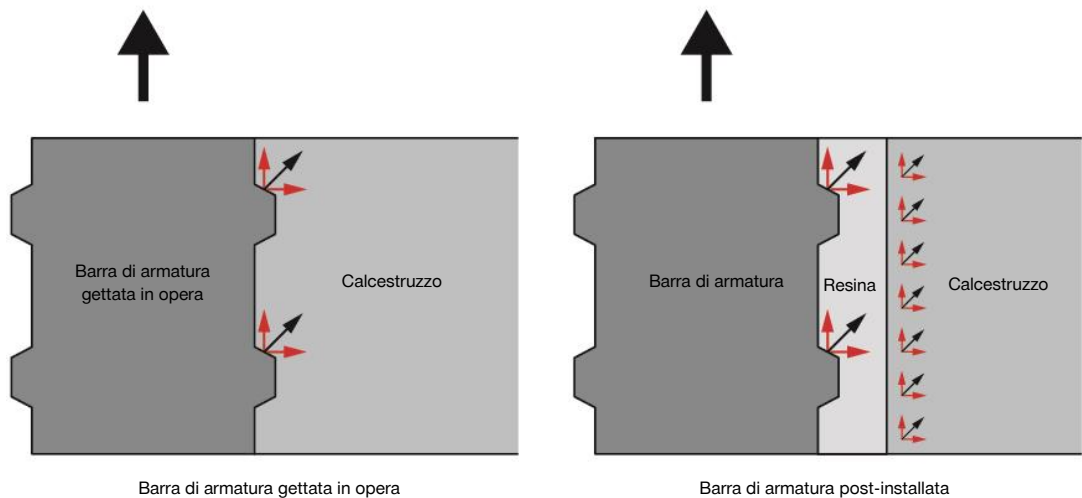


Figura 3
Barra armatura post-installata (ancoraggio del cordolo sul rivestimento finale della galleria)



5. PROGETTAZIONE STATICA DI CONNESSIONI CON ARMATURA POST-INSTALLATA

Figura 4
Meccanismo di trasferimento del carico dei ferri di armatura



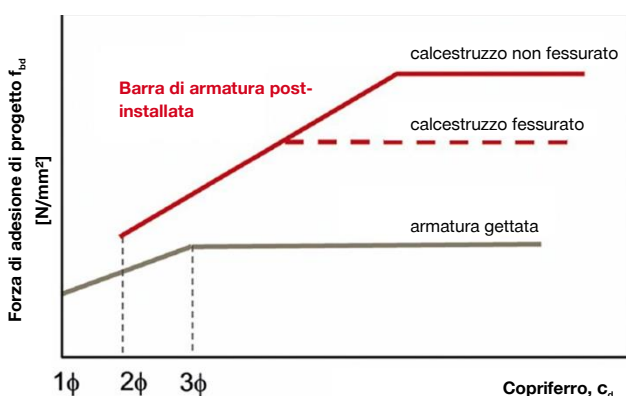
Sebbene il comportamento delle armature gettate in opera non sia identico a quello delle armature post-installate, il trasferimento della forza di trazione nel calcestruzzo è simile. Sia i ferri di armatura gettati in opera che quelli post-installati generano un *pattern* tensionale con simmetria rotazionale intorno alla barra (Fig. 4). L'equilibrio è dato da tensioni di trazione anulari nel calcestruzzo circostante, le quali, se diventano abbastanza elevate, provocano la formazione di fessure da *splitting*, che possono essere accompagnate da micro-fessure trasversali. Si possono osservare le stesse modalità di rottura sia nei ferri di armatura gettati in opera sia in quelli post-installati. Le armature possono cedere per rottura dell'acciaio, sfilamento della barra (*pull-out* per limite dell'aderenza) e rottura per *splitting*. L'unica differenza è che per le barre di armatura post-installate, le forze di trazione vengono trasferite tramite un incastro meccanico (*interlock*) dalle nervature della barra alla resina chimica e tramite un legame adesivo (combinazione di tensione di aderenza e *micro-keying*) dalla resina all'elemento in calcestruzzo, mentre per le barre di armatura gettate in opera, i carichi di trazione vengono trasferiti direttamente dalla barra al materiale di base (Figura 4).

Fino al 2018 il TR 023 [6] forniva indicazioni per determinare se le connessioni con barre di armatura post-installate, realizzate con ancorante chimico, presentassero un comportamento comparabile a quello delle connessioni con barre di armatura gettate in opera in termini di carico e spostamento. A partire dal 2018 il TR 023 [6] è stato sostituito dall'EAD 330087-01-0601 (*European Assessment Document* rilasciato dall'EOTA) [7] che ne rispecchia le idee di base. Di conseguenza, un determinato ancorante chimico per barre d'armatura post-installate valutato dall'EAD 330087-01-0601 risulta avere una tensione di aderenza e un comportamento allo spostamento simili a ciò che si evidenzia per una armatura gettata in opera (prendendo in considerazione i fattori d'influenza indicati nella relativa ETA/EAD). Grazie a questa filosofia di base, la progettazione delle connessioni con barre d'armatura post-installate che impiegano tale sistema può seguire le disposizioni per le barre d'armatura gettate in opera secondo la norma EN 1992-1-1 [1]. Tuttavia, il campo di applicazione dei ferri di armatura post-installati è limitato dall'EAD 330087-00-061 a:

- (a) Configurazioni ove sia possibile realizzare una sovrapposizione tra le armature esistenti e le nuove armature post-installate (non direttamente in contatto). In questo caso i carichi di trazione sono trasferiti tra le barre adiacenti tramite puntoni di compressione. Le forze di trazione generate dalle sollecitazioni circolari sono assorbite dalle staffe o dall'armatura trasversale nell'area della giunzione;
- (b) Giunzione di elementi strutturali con semplice appoggio (non sollecitati a momento flettente al vincolo).

Per superare questa limitazione e fornire una soluzione progettuale supplementare, nel 2019 è stato pubblicato il TR 069 [2].

Figura 5
Aderenza in funzione del copriferro relativo, rappresentato in modo schematico



Questa linea guida di livello europeo consente di progettare le connessioni di armature post-installate resistenti a momento flettente senza la necessità di eseguire una sovrapposizione di armature nella giunzione. Il TR 069 utilizza il comportamento *bond-splitting* reale dei sistemi di armature post-installate tenendo conto del copriferro nelle equazioni di progetto. Secondo la Figura 5, quando il valore del copriferro minimo è maggiore di 2ϕ (dove ϕ è il diametro della barra), i sistemi di armatura post-installati presentano un comportamento di *bond-splitting* significativamente migliore rispetto alle barre gettate in opera di diametro e lunghezza di ancoraggio equivalente. Questo comportamento è qualificato secondo l'EAD 332402-00-0601 [8]. Occorre notare che i test sono più approfonditi e coprono uno spettro più ampio rispetto ai collegamenti dei ferri di armatura post-installati che sono limitati alla progettazione secondo la norma EN 1992-1-1. In questa infatti viene verificata solo la comparabilità dei ferri di armatura post-installati con i ferri di armatura gettati in opera. Tuttavia, sia l'EAD 330087-00-0601 [7] sia l'EAD 332402-00-0601 [8] prevedono delle misure di salvaguardia per limitare l'utilizzo di sistemi di barre armatura post-installate con ancoranti chimici che presentano una rigidità molto bassa o comportamento fragile rispetto alle barre gettate in opera. È per questo motivo che l'approvazione ETA in base alla relativa EAD, diventa fondamentale sia per la progettazione sia per l'accettazione in cantiere.

Nella Figura 6 vengono elencate le applicazioni di giunzione di due elementi in calcestruzzo (estensione e aggiunta di un nuovo elemento). Per ciascuna applicazione vengono anche riassunte le forze e i momenti che è possibile applicare, il tipo di procedura di qualifica (EAD) che deve avere l'ancorante chimico e il relativo metodo di progettazione e le condizioni di carico ammissibili.

Figura 6

Elenco delle applicazioni di estensione (ottenibili con sovrapposizione di armature) e di aggiunta di nuovi elementi (senza sovrapposizione), con associazione di attributi progettuali rilevanti

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Estensione di un elemento	Ancoraggio d'estremità di un nuovo elemento	Ancoraggio d'estremità di un nuovo elemento	Ancoraggio d'estremità di un nuovo elemento (nodi rigidi)				
Forze e momenti	Sì	Solo forze	Solo compressione	Sì (nodi rigidi)				
Esempi	Tutte le configurazioni collegate tramite sovrapposizione di armature	Trave/solaio semplicemente appoggiato	Muro/pilastro alla fondazione	Pilastro su fondazione	Muro su fondazione	Soletta a muro	Trave a parete	Trave a pilastro
Metodo di progettazione applicabile	Eurocodice 2/Eurocodice 8			EOTA TR 069				
ETA valutata secondo:	EAD 330087-01-0601			EAD 332402-00-0601 v01/v02				
Casi di carico	Carico statico e sostenuto, incendio, 50 anni, 100 anni, sismico			Carico statico e sostenuto, 50 anni, 100 anni, sismico				

Quanto sopra, viene riportato in modo più schematico nella Figura 7 e Figura 8 raggruppando le applicazioni in tre cluster. Per completezza, anche se non viene approfondito in questo documento, viene riportato anche il ringrosso delle sezioni di elementi in calcestruzzo sovrapponendo due strati attraverso i connettori a taglio, *Overlay*.

Figura 6

Tre cluster per applicazioni di connessione di elementi o strati di calcestruzzo

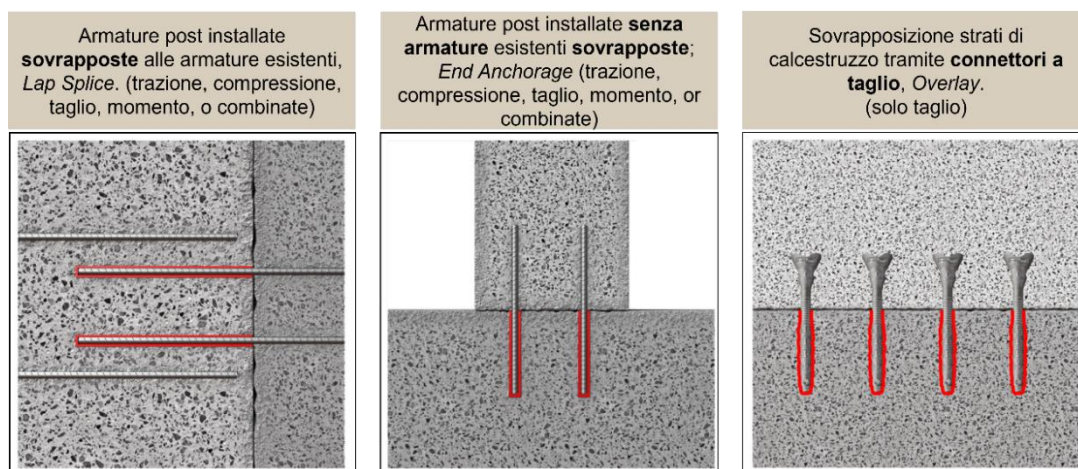


Figura 8
Tre cluster per applicazioni di connessione di elementi o stratti di calcestruzzo

Applicazione / Azione	Con sovrapposizione*	Senza sovrapposizione*	Connettori a taglio (overlay)
 Statica/ quasi-statica	EN 1992-1-1 Section 8.7	EOTA TR 069 EN 1992-1-1 Section 8.4 Metodo Tirante puntone	EOTA TR 066
 Sismica	EN 1998-1	EOTA TR 069 EN 1998-1	
 Fatica	N/A		N/A
 Fuoco	EN 1992-1-2		

* Il trasferimento del taglio nell'interfaccia è disciplinato da EN 1992-1-1 Sezione 6.2.5 (taglio & compressione predominante) or Sez. 6.2.2/6.2.3 (taglio & momento predominante)

6. PROGETTAZIONE SISMICA DI CONNESSIONI CON ARMATURA POST-INSTALLATA

Storicamente, per le opere sotterranee è stato riscontrato un basso tasso di danni durante i terremoti rispetto alle strutture di superficie a parità di intensità del terremoto perché le sollecitazioni imposte dal movimento del terreno sono inferiori nel sottosuolo. Tuttavia, le gallerie possono subire danni dovuti al sisma, rotture a taglio e comparsa di fessure nel rivestimento, collassi dovuti alla perdita di stabilità dei pendii, fessurazioni del portale d'ingresso e uscita, infiltrazioni e deformazioni dei piedritti e dell'arco rovescio [14], [15], [16], [17]. È stato osservato che per accelerazioni di picco al suolo (PGA) uguali o inferiori a circa 0,2g, le scosse del terreno causano danni minori. Per i PGA di circa 0,2-0,5 g sono stati osservati alcuni casi di danni da lievi a pesanti, mentre per i PGA di dimensioni superiori a 0,5 g si sono verificati molti casi di danni da lievi a pesanti. Questo può portare alla necessità, in base alle specifiche del progetto, di ideare le connessioni post installate tra elementi in calcestruzzo tenendo conto delle condizioni sismiche. Occorre notare che, prima di una progettazione sismica di questo tipo, è necessario valutare gli effetti del movimento del terreno sulla struttura sotterranea, determinare il carico aggiuntivo imposto dal movimento e dalla deformazione del terreno e possono essere richiesti requisiti speciali per dettagliare l'armatura post-installata.

Oltre la valutazione statica, con l'aggiornamento dell'EAD 330087-01-0601 [7] è possibile anche una qualifica sismica per i ferri di armatura post-installati con ancorante chimico che consente di progettare secondo la norma EN 1998-1[18]. Le ETA emesse secondo questa EAD garantiscono che:

- le prestazioni del prodotto siano testate e valutate sotto carico ciclico simulando un terremoto;
- il prodotto sia conforme alla normativa europea CPR;
- la progettazione delle lunghezze di ancoraggio e delle sovrapposizioni di armature post-installate può essere eseguita in conformità al eurocodice di riferimento.

Come risultato del processo di qualifica, l'ETA sismica di un prodotto include i valori di tensione di aderenza (viene utilizzata $f_{bd,seis}$ anziché f_{bd} come da ETA) e di copriferro in calcestruzzo ($c_{min,seis}$ come da ETA deve essere rispettato). Questi valori possono essere utilizzati per la progettazione di connessioni con barre di armatura post-installate sotto carico sismico in conformità alle prescrizioni EN 1998-1.

Tuttavia, così come per le azioni statiche, il campo di applicazione delle armature post-installate in campo sismico è limitato dall'EAD 33087-01-0601 alle configurazioni ove sia possibile realizzare una sovrapposizione tra le armature esistenti e le nuove armature post-installate oppure per elementi strutturali con semplice appoggio (non vincolati a momento flettente).

Per superare queste limitazioni e fornire una soluzione progettuale più ampia e anche in condizioni simiche, è stato aggiornato, a fine 2021, il rapporto tecnico TR 069 [2]. Questa linea guida di livello europeo consente di progettare le connessioni di armature post-installate resistenti al momento flettente senza la necessità di eseguire una sovrapposizione di armature nella giunzione anche in condizioni simiche. Per progettare sistemi di armatura post-installati in conformità al TR 069 sismico, i prodotti adottati devono essere dotati di ETA sismica in conformità all'EAD 332402-00-0601-v02 [19].

7. SOLLECITAZIONE A FATICA NELLE CONNESSIONI CON ARMATURA POST-INSTALLATA

Quando un treno ad alta velocità entra o attraversa una galleria, un complicato sistema di onde di pressione si sviluppa e si propaga e di conseguenza le strutture in calcestruzzo possono essere esposte a carichi ripetuti. Questi carichi possono giocare un ruolo importante nella progettazione strutturale delle connessioni calcestruzzo-calcestruzzo con armatura post-installata. La fatica dei materiali è importante non solo per le gallerie ferroviarie ad alta velocità, ma anche per le gallerie stradali progettate per un carico d'esercizio aggiuntivo dovuto alla pressione e depressione del vento causata dai veicoli in transito, soprattutto in entrata e uscita dalla galleria.

Gli autori vedono una crescente richiesta di soluzioni conformi a fatica nelle gallerie per la post-installazione di barre d'armatura, soprattutto in quelle ferroviarie, con cicli di carico da elevati a molto elevati nel corso della vita utile. Purtroppo, mentre negli ultimi decenni la ricerca sugli ancoraggi con tasselli delle piastre di base sollecitate a fatica ha acquisito importanza, la ricerca sulla fatica dei ferri di armatura post-installati è piuttosto limitata. Di conseguenza, l'attuale quadro normativo prevede la progettazione [10] e valutazione per la qualifica [11] degli ancoraggi post-installati per piastre base sollecitate a fatica, mentre non esistono disposizioni per la qualifica e progettazione per le giunzioni di due elementi in calcestruzzo con barre di armatura post-installate.

Esiste comunque la possibilità di approcciare questo tema con metodi ingegneristici semplificati che avremmo modo di approfondire nelle prossime revisioni di questo documento.

8. REQUISITO DI VITA UTILE DI 100 ANNI

Al giorno d'oggi ci sono sempre più richieste da parte dei proprietari o dei gestori di gallerie per un'estensione della vita utile da 50 anni a 80, 100 o addirittura 200 anni. Gli autori ritengono che si tratti di una domanda internazionale in rapida crescita anche per le applicazioni di ferri di armatura post-installati. La richiesta di una vita utile di 100 anni si basa sull'obiettivo di ridurre al minimo i requisiti di manutenzione e di garantire che l'investimento sia razionale.

La variante dell'EAD 332402-00-0601-v01 [9] fornisce la risposta a tale richiesta, in quanto è stata sviluppata partendo dal presupposto che la vita utile dei sistemi di armatura post-installati sia di 50 anni o di 100 anni. Le maggiori differenze durante il processo di valutazione di un prodotto tra i due diversi intervalli di vita utile è che, nello specifico, i test a lungo termine (100 anni) che portano a una stima della tensione di aderenza dell'ancoraggio chimico sono eseguiti a partire dalle procedure di valutazione eseguite per vita utile di 50 anni modificandoli di conseguenza. Oltre ciò, è importante sottolineare che Hilti può anche fornire un giudizio ingegneristico che può portare la vita utile a 120 anni.

Tuttavia, è importante notare che la valutazione della vita utile si riferisce al solo legame adesivo tra resina e calcestruzzo (tensione di aderenza), fornendo valori di aderenza per 50 anni e 100 anni. Infatti, l'acciaio dell'armatura e il calcestruzzo non sono considerati nell'ambito dell'EAD. Di conseguenza, l'EAD presuppone che la qualità del calcestruzzo non si alteri durante la vita utile. Pertanto, per adottare la logica dell'EAD diventano fondamentali la definizione delle classi di esposizione in galleria, rapporto massimo acqua cemento, quantità minima di cemento e di conseguenza anche i requisiti del copriferro.

In conclusione, valore di progetto della tensione di aderenza a 100 anni $f_{bd,PIR,100y}$ di una barra armatura post-installata è fornita nella relativa ETA del ancorante chimico. Il processo di progettazione è uguale alla progettazione per 50 anni, sostituendo la tensione di aderenza di 50 anni $f_{bd,PIR,50y}$ con la tensione di aderenza di 100 anni $f_{bd,PIR,100y}$.

9. FUOCO

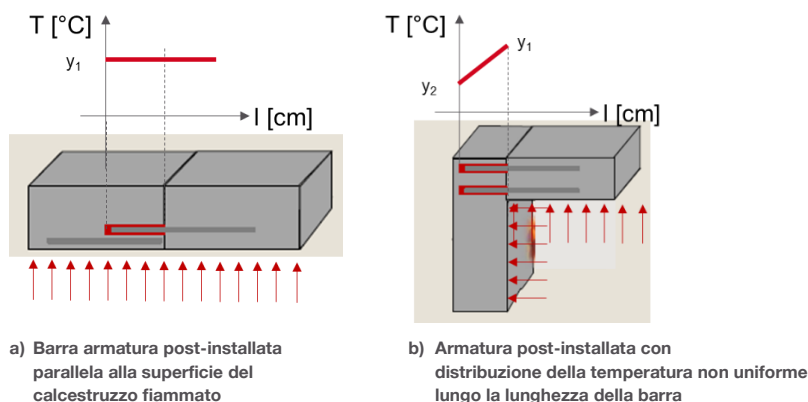
Quando le connessioni con armature post-installate fanno parte dei giunti di una compartimentazione antincendio (pavimento, soletta, ecc.), è importante valutarne la resistenza al fuoco. Questa è valutata considerando la riduzione della tensione di aderenza in funzione del tempo, della geometria dell'elemento e la sua esposizione al fuoco rappresenta convenzionalmente dalle curve d'incendio. Questi elementi sono progettati e costruiti per garantire un periodo specifico di resistenza al fuoco (R), in genere per 30, 60, 90, 120, 180 o 240 minuti.

In generale, la capacità portante delle barre di armatura post-installate si riduce se esposte al fuoco. La riduzione della resistenza dipende fortemente dal prodotto. Il motivo principale è la composizione della resina chimica utilizzata (inorganica oppure organica come, ad esempio, nel caso delle resine epossidiche e vinilestere). Di conseguenza, è importante conoscere la riduzione della tensione di aderenza in funzione del tempo di esposizione e in funzione della temperatura per progettare correttamente le barre di armatura post-installate, per esempio, un giunto di una compartimentazione antincendio,

La tensione di aderenza dei ferri di armatura post-installati sottoposti al fuoco è valutata a livello europeo sulla base di test conformi alla EAD 330087-00-0601 [7]. Di conseguenza, la relativa ETÀ fornisce un'equazione per calcolare il valore di progetto della tensione di aderenza in caso di incendio $f_{bd,fi}$. In pratica, si applica un fattore riduttivo alla tensione di aderenza "a freddo". Quest'ultima dipende da una serie di fattori come la classe di calcestruzzo, diametro dell'armatura, metodo di perforazione etc. Una volta che la temperatura (dovuta all'esposizione al fuoco) lungo i ferri di armatura post-installati è nota, la lunghezza di ancoraggio può essere calcolata secondo la norma EN 1992-1-1 [1] utilizzando la tensione di aderenza $f_{bd,fi}$ ridotta proprio in funzione della temperatura.

Quando la barra è parallela alla superficie esposta al fuoco, la determinazione della temperatura nello strato di ancorante chimico (che avvolge la barra) è più facile. Infatti, la distanza tra la barra post-installata e la superficie esposta al fuoco è uguale per tutta la lunghezza d'inghisaggio (Figura 9a). Pertanto, si può ipotizzare una distribuzione costante della temperatura che dipende dal tempo di esposizione e dal copriferro. Se invece la distanza tra superficie esposta e la barra varia lungo l'asse della stessa, la determinazione della temperatura lungo l'armatura post-installata è ottenibile solo con l'aiuto di analisi numeriche (Figura 9b). La tensione di aderenza non è impattata nello stesso modo dalla temperatura per tutta la lunghezza dell'ancoraggio. Il carico viene trasferito nelle regioni a temperatura più bassa, dove la riduzione è minore o assente.

Figura 9
Distribuzione semplificata della temperatura nello strato di resina a seconda della posizione dell'armatura rispetto alla superficie esposta

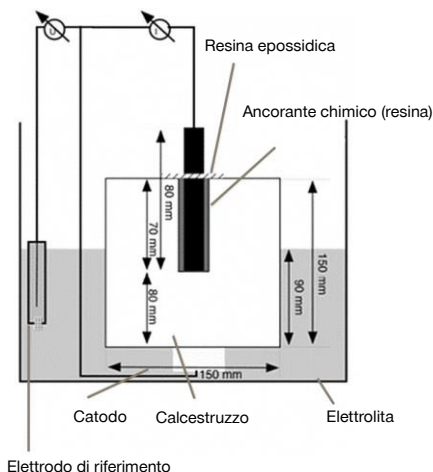


I requisiti per la progettazione contro l'incendio in una galleria possono essere diversi a seconda dell'applicazione e del tipo di galleria. Per ridurre al minimo i danni in caso di incendio, la temperatura sulla superficie del calcestruzzo e la temperatura nell'armatura devono essere limitate. Sia la temperatura sulla superficie di calcestruzzo sia quella dell'acciaio dipendono da diversi parametri (ad esempio il tempo di esposizione, il copriferro, eventuale protezione dell'elemento in calcestruzzo). In base all'esperienza degli autori e a titolo di semplificazione, è opportuno utilizzare i seguenti limiti massimi di temperatura: per la superficie del calcestruzzo da 200°C a 380°C e per l'armatura da 250°C a 300°C. In caso di temperature più elevate sulla superficie del calcestruzzo, è necessario incorporare nel calcestruzzo fibre di polipropilene o acciaio. Tuttavia, si nota che a temperature così elevate l'ancorante chimico (organico) mostra una forza di adesione $f_{bd,fi}$ che è solo il 10-20% della tensione di aderenza in condizioni "a freddo" f_{bd} . Soprattutto nelle applicazioni in cui l'armatura è parallela alla superficie del calcestruzzo esposto al fuoco, l'impatto è più pronunciato e di conseguenza è necessaria una verifica attenta.

10. CORROSIONE

Il calcestruzzo è un materiale alcalino e, in condizioni normali, la corrosione delle barre armate gettate in opera viene prevenuta dalla passivazione della superficie delle barre. Tuttavia, quando il calcestruzzo subisce la carbonatazione, la diminuzione del valore del pH può rompere il film passivo e consentire la corrosione. Inoltre, si osservano tassi di corrosione accelerati (corrosione puntiforme, *pitting*) se il calcestruzzo è contaminato da cloruri. Di conseguenza, la valutazione e qualifica di ancoranti chimici idonei per la giunzione di elementi in calcestruzzo con ferri di armatura post-installati include un test specifico per la suscettibilità del sistema alla corrosione a lungo termine delle barre.

Figura 11
Configurazione del test per valutare la corrosione del ferro di armatura a lungo termine [6]



Dopo l'indurimento dell'ancorante chimico, l'elemento in calcestruzzo con ferri di armatura post-installati viene immerso in un contenitore riempito con una soluzione acquosa creata artificialmente (solfato di sodio e bicarbonato di sodio) mentre ogni ferro di armatura è collegato a un catodo, vedere Figura 11. La corrente tra il ferro di armatura e il catodo viene determinata misurando la caduta di potenziale, mentre il potenziale di corrosione di ogni ferro di armatura viene misurato con un voltmetro. Il flusso di corrente e il potenziale sono tracciati in funzione del tempo (durata del test per almeno 3 mesi). Il flusso di corrente e il potenziale misurati devono essere inferiori a un certo valore limite. Inoltre, dopo il test, viene effettuata un'ispezione visiva dell'armatura per identificare eventuali segni di corrosione. Se i requisiti sono soddisfatti, il collegamento dei ferri di armatura post-installati è considerato paragonabile alla resistenza alla corrosione delle armature gettate in opera. Di conseguenza, si può affermare che i ferri di armatura post-installati con un sistema qualificato ETA con l'idoneità per giunzione di elementi in calcestruzzo dovrebbero presentare tassi di corrosione simili a quelli dei ferri gettati in opera installati nello stesso calcestruzzo.

L'Associazione Svizzera per la Protezione contro la Corrosione (SGK) ha ricevuto l'incarico di valutare il comportamento alla corrosione dei fissaggi post-installati nel calcestruzzo utilizzando i sistemi di iniezione Hilti HIT-HY 200-R V3 e Hilti HIT-RE 500 (V4) per fornire ulteriori informazioni sul comportamento alla corrosione oltre ai criteri "pass/fail" secondo la relativa EAD.

I risultati possono essere riassunti come segue:

Hilti HIT-HY 200-R V3

- Il sistema Hilti HIT-HY 200-R V3, in combinazione con le barre armatura, può essere considerato resistente alla corrosione quando viene utilizzato in un calcestruzzo alcalino purché quest'ultimo sia in buone condizioni. L'alcalinità della resina aiuta a garantire la passivazione iniziale dell'acciaio.
- Supposta un'armatura post-installata nel calcestruzzo privo di cloruri utilizzando Hilti HIT-HY 200-R V3, in caso di successiva esposizione al cloruro i tassi di corrosione sono circa la metà di quelli dell'armatura gettata nel calcestruzzo.
- Nel calcestruzzo contenente cloruri, il comportamento alla corrosione delle barre inghisate utilizzando la Hilti HIT-HY 200-R V3 corrisponde a quello dell'armatura gettata. Di conseguenza, l'uso di acciaio non protetto nel calcestruzzo esposto ai cloruri è sconsigliato perché si può prevedere la corrosione dopo brevi tempi di esposizione.

Hilti HIT-RE 500 V4

- Se il sistema Hilti HIT-RE 500 V4 viene utilizzato in ambienti corrosivi, uno strato sufficientemente spesso di resina aumenta notevolmente il tempo per cui la corrosione inizi ad attaccare l'acciaio.
- Il sistema Hilti HIT-RE 500 V4 può essere utilizzato nel calcestruzzo carbonato contenente cloruri se è possibile garantire uno spessore di almeno 1 mm di resina. In questo caso, solo l'acciaio non protetto nella parte nuova del giunto in calcestruzzo (quindi la parte annegata della barra) è critico.
- In nessuno dei casi analizzati l'acciaio precedentemente ossidato (senza cloruri) ha mostrato segni di corrosione, anche nel calcestruzzo contenente cloruri.

Nel corso di questo studio non è stata riscontrata un'accelerazione della corrosione nei punti difettosi della dell'inghisaggio né esistono riferimenti a questo in letteratura.



11. PRODOTTI HILTI

Hilti offre diversi prodotti a seconda dei requisiti richiesti come ad esempio il tipo di azione (statica, sismica, o esposizione al fuoco), la corrosione, la vita utile, il tipo di applicazione (con o senza sovrapposizione di armature) oppure tipo d'installazione,. Ogni prodotto ha i suoi punti di forza e anche i suoi limiti. La Figura 12 mostra gli ancoranti chimici bicomponenti a iniezione che Hilti offre per l'ancoraggio dei ferri di armatura post-installati. La panoramica fornisce una guida rapida sulla scelta del

prodotto. Hilti fornisce anche un software per la progettazione di ferri di armatura post-installati, Hilti **PROFIS Engineering**, che consente una progettazione conforme alle norme, più rapida e che permette di ottimizzare i risultati.

Figura 12

Panoramica dei prodotti Hilti utilizzati per i collegamenti dei ferri di armatura post-installati Panoramica semplificata, i dettagli sono riportati nelle relative ETA

		
Nome prodotto	HIT-RE 500 V4	HIT- HY 200-R V3
ETA per ferri di armatura design Statico secondo EN-1992-1-1 (vita utile 50 o 100 anni)	Φ 8-40	Φ 8-40
ETA per ferri di armatura design Sismico secondo EN-1992-1-1 (vita utile 50 o 100 anni)	Φ 10-40	Φ 10-32
ETA per ferri di armatura design Statico secondo EOTA TR069 (vita utile 50 o 100 anni)	Φ 8-40	Φ 8-40
ETA per ferri di armatura design Sismico secondo EOTA TR069 (vita utile 50 o 100 anni)	Φ 8-40	-
ETA per ferri di armatura con dati per la resistenza al fuoco	Si	Si
Tempo di lavorazione a 21°C	30 minuti	9 minuti
Tempo di indurimento a 21°C	7 ore	60 minuti
Temperatura di installazione [°C]	Da -5 a +40	Da -10 a +40

12. PROVE IN SITU

Se un ancorante chimico utilizzato per connessione di elementi in calcestruzzo con ferri di armatura post-installati ha una ETA ed è installato secondo le istruzioni per l'uso del produttore (IFU) in un materiale di base che rientra nell'ambito della valutazione e con tutte le altre condizioni al contorno (incluso il tipo di carico) come specificato in ETA, non è necessario verificare le prestazioni con test in situ. Ci sono solo due motivi per cui vengono eseguiti i test in loco nella costruzione di gallerie:

1. Nei casi in cui il materiale di base non è contemplato nell'ETA. In questo caso è possibile eseguire test non distruttivi (*proof loading*) o distruttivi per determinare la resistenza di progetto. Un esempio è l'utilizzo di calcestruzzo con una composizione della miscela che non rientra nell'ambito di applicazione della qualifica secondo la relativa EAD;
2. Per consentire al cliente di controllare e potenzialmente convalidare la qualità dell'installazione dei ferri di armatura post-installati. In tal caso è possibile eseguire test non distruttivi in cantiere (*proof test*).

In caso di **carico non distruttivo** (*proof loading*) il cliente deve selezionare il livello di carico di trazione appropriato da applicare all'armatura in base alle esigenze. In ogni caso, il carico sul sistema non deve provocare danni (ad esempio, snervamento deformazioni permanenti). I carichi di prova devono essere definiti dall'ingegnere responsabile e il livello di carico desiderato deve essere mantenuto costante come definito dal progettista. Per i test non distruttivi di solito si tratta di un minimo di 60 secondi che sono

necessari a garantire l'assenza di movimenti dell'armatura. I carichi di prova sono stabiliti come valore parziale della capacità portante dell'armatura post-installata, non come carico massimo di progetto.

Si noti che, a seconda del rapporto tra profondità e diametro della barra e della qualità dell'acciaio, il carico di prova potrebbe portare allo snervamento della barra di armatura. Pertanto, è necessario limitare il carico di prova in modo che non si superi l'80% della tensione di snervamento dell'armatura.

L'attrezzatura per eseguire una prova di carico che valuta la qualità d'installazione è disposta con una distanza sufficiente dai ferri di armatura post-installati in modo da poter osservare i movimenti dovuti a un'eventuale installazione non corretta. Nel caso in cui il carico di prova viene utilizzato per determinare la resistenza di progetto a sfilamento, l'attrezzatura di carico deve essere disposta a distanza ravvicinata ai ferri di armatura post-installati per evitare il cedimento del materiale di base (il cilindro di carico assume la funzione di contrasto per la prova).

In caso di **carico distruttivo**, viene applicato un carico di trazione nell'armatura fino alla rottura. Il cedimento è tipicamente caratterizzato dallo snervamento dell'acciaio o sfilamento dell'armatura.

Hilti fornisce un servizio completo di ingegneria di prove in situ con attrezzature di prova adeguate e la valutazione dei risultati con documentazione completa.

Tuttavia, si noti che per tutti test in situ (sia quelli di carico non distruttivi sia in quelli di carico distruttivo) non possono sostituire i test di omologazione per valutare l'idoneità del prodotto. Inoltre, i test in loco non servono a stabilire le prestazioni dei diversi prodotti (il prodotto A è migliore del prodotto B).

13. RIFERIMENTI

- [1] Eurocode 2 (EN 1992-1-1): *Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, Brussel (2004)
- [2] EOTA TR 069: *Design method for anchorage of post-installed reinforcing bars (rebars) with improved bond-splitting behavior as compared to EN 1992-1-1*.
- [3] P. Woerle, J. Appl, G. Genesio: *Bewehrungsanschlüsse für momententragfähige Verbindungen nach EOTA TR 069*, Beton- und Stahlbetonbau 2020
- [4] *Seismic Assessment of Post-Installed Reinforcing Bars with Mortar Based on the European Organization of Technical Assessment*. Available from (PDF):
https://www.researchgate.net/publication/346923346_Seismic_Assessment_of_Post-Installed_Reinforcing_Bars_with_Mortar_Based_on_the_European_Organization_of_Technical_Assessment
- [5] EOTA TR 066: *Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers*.
- [6] EOTA TR 023: *Assessment of post-installed rebar connections*
- [7] EOTA EAD 330087-01-0601: *Systems for post-installed rebar connections with mortar*.
- [8] EOTA EAD 332402-00-0601: *Post-installed reinforcing bar (rebar) connections with improved bond-splitting behavior under static loading*
- [9] EOTA EAD 332402-00-0601-v01: *Variant: Post-installed reinforcing bar (rebar) connections with improved bond-splitting behavior under static loading: 100 years working life*
- [10] EOTA TR 061: *Design method for fasteners in concrete under cyclic loading*
- [11] EOTA EAD 330250-00-0601: *Post installed fasteners in concrete under fatigue cyclic loading*
- [12] R. Eligehausen, R. Malle, J.F. Silva: *Anchorage in Concrete Construction*, Ernst & Sohn Verlag 2006
- [13] Kunz, J.: *Chemical fastenings for fatigue loads. Joining techniques in the building construction industry*, internationals Klebetechnik-Symposium, Munich 2003
- [14] Y. Hashash, J. Hook, B. Schmidt, J. Yao: *Seismic design and analysis of underground structures*, J Tunnelling Underground Space Technol., 16 (2001), pp. 247-293
- [15] S. Okamoto: *Introduction to Earthquake Engineering*, John Wiley, New York (1973)
- [16] K. Uenishi, S. Sakurai: *Characteristics of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake estimated from the failure of the Daikai underground station*, J Earthquake Eng. Struct. Dyn., 29 (6) (2000), pp. 813-821
- [17] Z. Chen, C. Shi, T. Li, Y. Yuan: *Damage characteristics and influence factors of mountain tunnels under strong earthquakes*, J Nat. Hazards, 61 (2012), pp. 387-401
- [18] Eurocode 8 (EN 1998-1): *design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, Brussel (2004)
- [19] EOTA EAD 332402-00-0601-v02: *Variant: Post-installed reinforcing bar (rebar) connections with improved bond-splitting behavior under static loading and under seismic action*



Hilti Italia S.p.A.
Piazza Indro Montanelli, 2020099
Sesto San Giovanni (MI)

www.facebook.com/HiltiItalia
www.hilti.it