

HILTI

GUIDA ALLA
PROGETTAZIONE
DI ARMATURE
POST-INSTALLATE.



Sommario

1. Cosa sono i ferri di ripresa post-installati

I ferri di ripresa post-installati e la loro applicazione in edilizia
Campo di applicazione
Compatibilità dei *ferri di ripresa post-installati* con ferri gettati in opera

2. Caratteristiche progettuali

Requisiti di progetto
Limitazioni date dal sito di installazione
Lunghezza di ancoraggio richiesta
Specifiche relative alle connessioni
Specifiche del sistema
Calcoli relativi allo sviluppo e lunghezza di sovrapposizione sulla base dell'Eurocodice 2

3. Installazione

Individuazione dei ferri d'armatura esistenti e di altri elementi immersi nel calcestruzzo
Irruvidimento della superficie in calcestruzzo esistente
Installazione di *ferri di armatura post-installati* con copriferro ridotto
Metodo di perforazione
Pulizia del foro
Scelta del sistema adesivo
Iniezione della resina
Installazione del ferro

4. Scelta del sistema

Considerazioni relative alla scelta del sistema

5. Sviluppo dei dati di progetto

Premessa
Definizione delle prestazioni del sistema richieste (qualifica)

6. Principi di calcolo

Determinazione della lunghezza del ferro di ancoraggio richiesta
Panoramica delle disposizioni dell'Eurocodice 2 sulla lunghezza di ancoraggio per ferri di ripresa diritti
Approcci alternativi per determinare la profondità di posa: il metodo di calcolo Hilti Rebar
Esempi di progetto
Modelli tirante-puntone
Modello tirante-puntone per nodi di telai (concetto dei nodi di telai Hilti)
Progettazione di connessioni momento resistenti (concetto dei nodi di telai Hilti)

7. Cos'altro serve sapere?

Calcestruzzo fessurato e non fessurato
Ulteriori fattori che influenzano la resistenza di adesione
Fatica/dinamica
Fuoco
Calcolo Sismico
Corrosione
Programma di calcolo PROFIS Rebar

8. Informazioni di riferimento utili

1. Cosa sono i ferri di ripresa post-installati

1.1 I ferri di ripresa post-installati e la loro applicazione in edilizia

Le resine di ancoraggio trovano ampio impiego da tempo nell'installazione di ferri di armatura deformati in fori praticati nel calcestruzzo per simulare il comportamento dei ferri di armatura gettati in opera (Figura 2). Per tale motivo vengono generalmente definiti *ferri di ripresa post-installati*. Tale applicazione presenta le seguenti caratteristiche:

- a. I *ferri di ripresa post-installati* vengono inseriti nella resina in un foro praticato nel calcestruzzo esistente su un lato dell'interfaccia e solitamente ricoperti da un getto di calcestruzzo nuovo sull'altro lato dell'interfaccia (Figura 1). I ferri possono essere dotati di uncini o teste all'estremità ricoperta di calcestruzzo, mentre per necessità l'estremità di un ancorante post-installato è diritta.
- b. I *ferri di ripresa post-installati*, a differenza di applicazioni con piastre di ancoraggio, sono spesso installati con copriferro di spessore ridotto ($3\Phi > c > 2\Phi$, dove Φ è il diametro del ferro di ripresa e c è lo spessore del copriferro). In questi casi, la resistenza sotto carico di trazione della connessione creata tramite i *ferri di ripresa post-installati* è tipicamente limitata dalla resistenza alla frattura del calcestruzzo (che si caratterizza per fratture lungo la lunghezza del ferro stesso).
- c. I *ferri di ripresa post-installati* non sono tipicamente progettati per resistere a carichi di taglio diretti, come nel caso di applicazioni di piastre di ancoraggio.
- d. I *ferri di ripresa post-installati* sono generalmente posati come richiesto per "sviluppare" la sollecitazione di progetto σ_{sd} con riferimento alla lunghezza di ancoraggio richiesta, alla lunghezza di ancoraggio di progetto e alla lunghezza della giunzione così come definite nell'Eurocodice 2 [5]. Per conferire duttilità alla struttura, la sollecitazione di progetto sarà spesso vicina alla resistenza a snervamento di progetto.

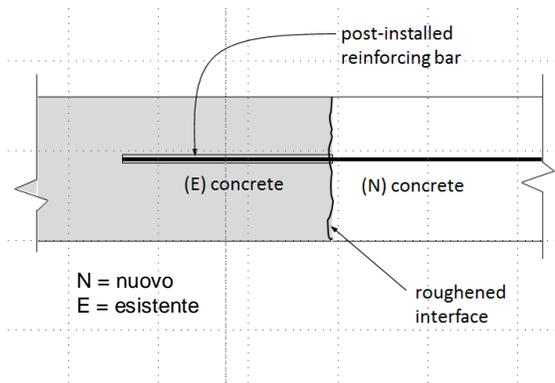


Figura 1– Ferro di ripresa post-installato.

In alcuni casi specifici, la sollecitazione di trazione nei ferri di ripresa post-installati deve essere trasferita direttamente al calcestruzzo. In questi casi, i ferri sono progettati come se fossero ancoraggi, tenendo in considerazione il metodo CCD. I due principi teorici, relativi al calcolo di ferri di ripresa e ancoraggi, presentano differenze specifiche, riassunte nella Tabella 1 [16].

La presente guida fornisce informazioni riguardo al calcolo, alle specifiche e all'installazione di *ferri di ripresa post-installati*. Non verte sulla determinazione degli *ancoranti chimici per applicazioni di piastre di ancoraggio*, oggetto delle disposizioni

per il calcolo e la qualifica degli ancoraggi ETAG 001, sezione 5 [1], CEN/TS 1992-4 [2] e TR 029 [6].

Tabella 1 – Differenze principali tra i principi teorici degli ancoraggi e dei ferri di ripresa

<u>Differenze principali</u>	<u>Principi teorici sugli ancoraggi</u>	<u>Principi teorici sui ferri di ripresa</u>
Norma di riferimento	EN 1992-4	EN 1992-1
Direzione del carico	Trazione, taglio o combinazione dei due	Trazione
Meccanismo di trasferimento del carico	Utilizzo della resistenza del calcestruzzo alla trazione	Equilibrio con puntoni in calcestruzzo locali o globali
Modi di cedimento	Cedimento lato acciaio, sfilamento, frattura, cono di calcestruzzo	Cedimento lato acciaio, sfilamento, frattura
Risultati di progetto	Capacità	Lunghezza di ancoraggio
Spessore minimo copriferro	Secondo ETA	Secondo Eurocodice 2
Lunghezza di ancoraggio ammissibile	$20\phi \geq l_b \geq 4\phi$	$60\phi \geq l_b \geq \max(0,3 l_{brqd}; 10\phi; 100 \text{ mm})$

1.2 Campo di applicazione

Come osservato in precedenza, i ferri di ripresa post-installati sono utilizzati in genere per creare una connessione monolitica tra elementi o strutture in calcestruzzo nuovi ed esistenti. I ferri di ripresa post-installati sono impiegati sia in opere di riqualificazione che in nuove costruzioni e sono adatti in numerose tipologie di applicazione.



Figura 2– Iniezione di resina adesiva Hilti HIT in un foro praticato con dispenser ED 3500-Ato per semplificare l'installazione di ferri di ripresa post-installati.

Una delle tipologie di impiego più comuni per i ferri di ripresa post-installati è **l'ampliamento di elementi strutturali in cemento armato esistenti**, come solette, pareti e pilastri (Figura 3), per consentire l'estensione del piano calpestabile o eseguire altre modifiche d'uso della struttura. Tali applicazioni comportano generalmente l'inserimento di numerosi ferri, con interasse ridotto. In alcuni casi, i ferri di ripresa post-installati sono installati in prossimità della superficie del calcestruzzo (ovvero con spessore del copriferro minimo previsto dall'Eurocodice 2), ragione per cui si deve tenere in considerazione la presenza dell'armatura esistente. Ove possibile, ad esempio nell'estensione di un pilastro, una soletta o una parete, è generalmente

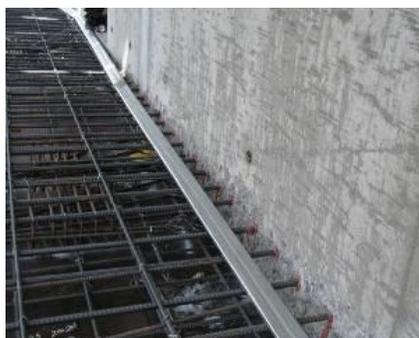
preferibile posare i ferri di ripresa post-installati all'interno della gabbia di armatura già esistente, per evitare la formazione di schegge durante la perforazione e garantire un copriferro adeguato. Per evitare di danneggiare i ferri già esistenti, è possibile utilizzare degli apparecchi di rilevamento dei ferri d'armatura, come il sistema di rilevamento Hilti PS 250 o Hilti PS 1000 (Figura 4).



a. Estensione di pilastro



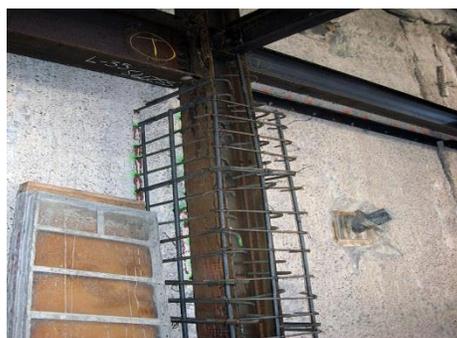
b. Connessione tra solette



c. Connessione tra soletta e parete



2. Estensione di parete



e. Gabbia in acciaio per pilastro post-installato ancorata a una parete



f. Ampliamento di soletta

Figura 3– Applicazioni relative a estensione di elementi esistenti mediante elementi nuovi, usando Hilti HIT-RE 500 e Hilti HIT-HY 200-R

Poiché la profondità di posa richiesta per soddisfare le disposizioni della normativa edilizia relative alla lunghezza di ancoraggio (generalmente da 40 a 60 volte il diametro del ferro d'armatura) spesso supera ampiamente la profondità di ancoraggio tipica (generalmente limitata a 20 volte il diametro del ferro), si dovranno adottare precauzioni specifiche per far sì che i fori praticati nel calcestruzzo siano dritti, che la perforazione non generi fessurazioni o danni in altro modo il calcestruzzo o i ferri già esistenti o altri spessori di posa. Per fare ciò può essere utile impiegare attrezzi specifici come il sistema di allineamento della perforazione Hilti e i sistemi di rilevamento Hilti basati su GPR (Ground Penetrating Radar) o rilevamento del ferro.

Un'altra tipologia di applicazione consiste nel **rafforzamento delle strutture in calcestruzzo esistenti**, spesso per migliorarne le prestazioni, ad es. in caso di ristrutturazioni (Figura 5).



Figura 4– Scansione per la ricerca di ferri di armatura e altri elementi immersi nel calcestruzzo mediante scanner GPR Hilti.



a. Connessione tra soletta e parete



b. Connessione tra parete e parete



c. Parete rivestita con strato di calcestruzzo proiettato



d. Rafforzamento di connessione soletta/pilastro

Figura 5– Applicazioni di rafforzamento mediante resina Hilti HIT-RE 500

Una terza tipologia di applicazione, con requisiti unici, riguarda l'**estensione, il recupero e il rafforzamento di ponti in calcestruzzo esistenti** e altre strutture di ingegneria civile (Figura 6). Queste applicazioni si distinguono spesso per la necessità di maggiore resistenza alla corrosione e alle temperature estreme. Hilti ha sviluppato soluzioni uniche basate sull'attrito a taglio in impalcati di ponte¹ e offre resine ibride (come ad es. la resina Hilti HIT-HY 200-R) con resistenza superiore alle temperature elevate [16].

¹ Per ulteriori informazioni, contattare Hilti.



a. Ampliamento della larghezza di un ponte



b. Recupero di un impalcato di ponte



c. Incremento dello spessore di un impalcato di ponte



Figura 6– Applicazioni in progetti di recupero di ponti mediante *ferri di ripresa post-installati*

1.3 Compatibilità dei ferri di ripresa post-installati con armature gettate in opera

I ferri di ripresa post-installati sono concepiti per trasferire solo i carichi di trazione. Sono stati condotti numerosi programmi di ricerca [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14] presso laboratori in Europa e negli Stati Uniti per verificare se i *ferri di ripresa post-installati* mediante sistemi adesivi Hilti (HIT-HY, HIT-RE) presentino un comportamento comparabile con quello delle armature gettate in opera per quanto attiene al trasferimento del carico e al rapporto tra carico e spostamento (vedere la sezione 5).

Quando il valore minimo del copriferro è maggiore di 3ϕ (dove ϕ è il diametro della barra), ovvero la formazione di fratture non interferisce con la resistenza di adesione, i ferri di ripresa post-installati mostrano generalmente una resistenza allo sfilamento

superiore rispetto ai ferri di armatura gettati in opera di diametro e lunghezza di ancoraggio equivalenti. Infatti, i sistemi adesivi Hilti sono in grado di generare nei ferri di ripresa post-installati una resistenza di adesione uniforme ed equivalente, pari anche a 2,5 volte i valori osservati in prove eseguite con ferri gettati in opera (vedere la sezione 5).

Si deve osservare che il metodo di trasferimento del carico tra i ferri di ripresa post-installati e il calcestruzzo in cui sono ancorati è a carico delle nervature di aggrappaggio del ferro, che sollecitano lo strato circostante di adesivo. Queste sollecitazioni a loro volta sono trasferite dalla resina al calcestruzzo circostante mediante adesione e micro-atriti, mentre la dilatazione laterale dello strato di resina in risposta alla sollecitazione incrementa l'azione di attrito. Il calcestruzzo a sua volta sviluppa una tensione circolare attorno alle barre che può dare luogo, a determinati livelli di carico, a fratture. Questa risposta è identica a quella osservata in ferri di armatura gettati in opera sottoposti a trazione.

Per quanto riguarda i ferri in prossimità del bordo soggetti a carichi di trazione, il comportamento allo stato limite ultimo è caratterizzato dalla frattura del calcestruzzo lungo il ferro o la giunzione, in risposta alla tensione circolare sviluppata attorno al ferro. Considerando che la resina impiegata può svolgere il compito di ridistribuire le sollecitazioni sulla lunghezza del ferro in modo simile a quanto avviene nei ferri di armatura in opera, i ferri di ripresa post-installati presentano resistenze di picco simili a quelle dei ferri gettati in opera (per copriferro ridotti).

Nel 2006, l'Organizzazione europea per la valutazione tecnica (EOTA) ha emesso il Rapporto tecnico TR0 23 *Valutazione dei ferri di ripresa post-installati* [15]. Questo documento fornisce indicazioni per verificare che le connessioni eseguite con ferri di ripresa post-installati impiegando uno specifico sistema di resine mostrino comportamenti paragonabili a quelli delle connessioni con ferri gettati in opera, in termini di carico e spostamento, in diverse condizioni ambientali (vedere sezione 5).

NOTA. Ove si sia verificato mediante prove di qualifica adeguate (in conformità al rapporto EOTA TR 023 [15] o procedure simili) che un dato sistema di ferri di ripresa post-installati presenta resistenza di adesione e comportamento di spostamento simile a quello dei ferri di armatura gettati in opera, la progettazione delle connessioni con ferri di ripresa post-installati impiegando tale sistema potrà seguire le stesse disposizioni dei ferri gettati in opera.

Inoltre l'uso previsto nel rapporto tecnico consiste in applicazioni in cui siano consentiti ferri di ripresa diritti, conformemente all'Eurocodice 2 [5], come illustrato nella Figura 8. Tale "limite" si basa sulla constatazione che le forze di trazione trasferite dal ferro di armatura al calcestruzzo mediante l'adesivo devono essere equilibrate tramite puntoni di compressione locali (giunzioni) o globali, per evitare il cedimento fragile del calcestruzzo. Un ferro di armatura sotto carico di trazione può causare il cedimento fragile del calcestruzzo (cedimento conico) a causa della capacità di trazione del calcestruzzo circostante, se tale carico non viene compensato da puntoni di compressione. Poiché questa modalità di cedimento è contrastata mediante puntoni di compressione globali o locali, non viene contemplata nelle norme nazionali sui calcoli del cemento armato.

1.4 Ambito di applicazione dei ferri di ripresa post-installati

Conseguentemente a quanto definito nella sezione precedente, l'ambito di applicazione dei ferri di ripresa post-installati è limitato dal rapporto EOTA TR 023 [15] alle seguenti applicazioni:

- (a) Giunzione a sovrapposizione per connessioni con armatura di solette e travi e giunzione a sovrapposizione a una fondazione di un pilastro o parete per mezzo di giunzione senza contatto. In questo caso i carichi di trazione sono trasferiti tra i ferri adiacenti attraverso puntoni di compressione. Le forze di trazione generate dalle sollecitazioni circolari sono assorbite dai rinforzi a staffa o trasversali, rispettivamente, nell'area della giunzione.
- (b) Travi semplicemente appoggiate e ancoraggi di rinforzo per coprire la linea di azione della forza di trazione.

Sulla base del modello tirante-puntone (vedere sezione 6.5.3), all'estremità supportata di una trave semplicemente appoggiata il nodo è composto da un puntone diagonale, dalla forza esercitata dal tirante e dalla forza del supporto (Figura 7).

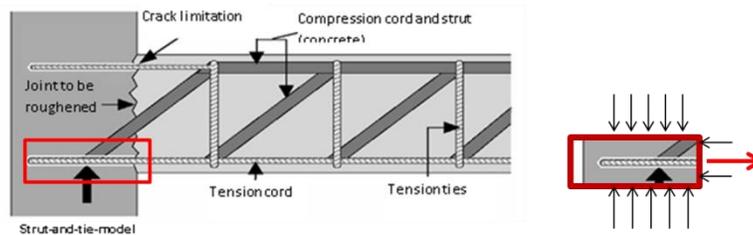


Figura 7 – Comportamento di sostegno del carico dell'estremità supportata di una trave semplicemente appoggiata, tale da evitare il verificarsi di cedimento da rottura conica del calcestruzzo dovuta ai puntoni di compressione.

- (c) Connessioni di sistemi sollecitati principalmente per compressione.

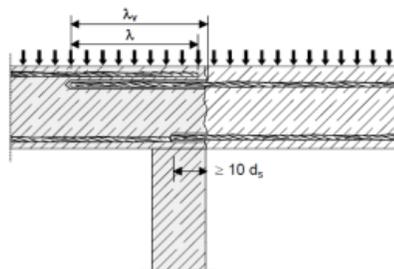


Figure 1.1: Overlap joint for rebar connections of slabs and beams

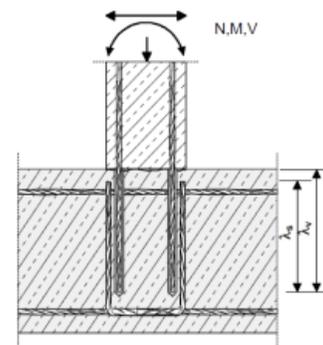


Figure 1.2: Overlap joint at a foundation of a column or wall where the rebars are stressed in tension

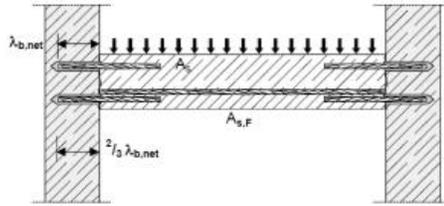


Figure 1.3: End anchoring of slabs or beams, designed as simply supported

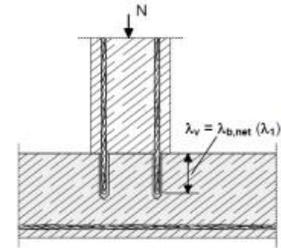


Figure 1.4: Rebar connection for components stressed primarily in compression. The rebars are stressed in compression

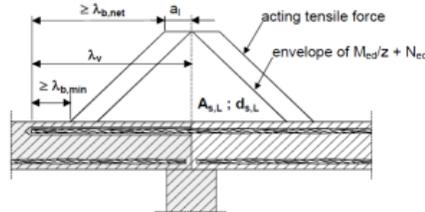
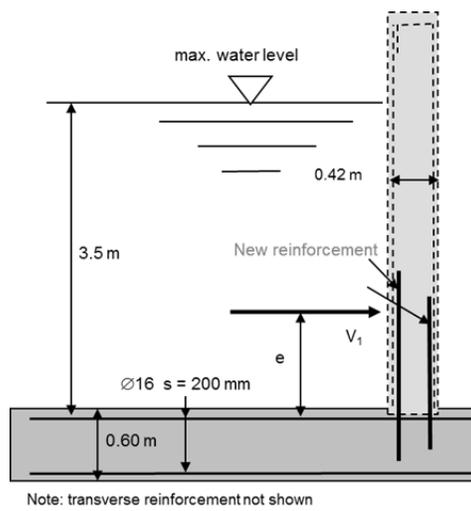


Figure 1.5: Anchoring of reinforcement to cover the line of acting tensile force

Figura 8 – Ambito di applicazione di ferri di ripresa post-installati secondo EOTA TR 023 [15]

L'equilibrio di questo nodo è dato dall'adesione tra il ferro, la resina e il calcestruzzo. Il modello a tirante e puntone secondo il percorso di carico è illustrato nella Figura 8. La condizione di ancoraggio del ferro di ripresa post-installato può essere valutata come un nodo CCT (compressione-compressione-trazione). Il ferro di ripresa post-installato è caricato contro la componente orizzontale del puntone diagonale, mentre la componente verticale del puntone diagonale è in equilibrio con la forza di sostegno. A causa della presenza di sollecitazioni di compressione orizzontale nella regione di ancoraggio, il ferro di ripresa post-installato potrebbe cedere per sfilamento o rottura dell'acciaio, ma non per cedimento da rottura conica del calcestruzzo. Condizioni simili sono prevedibili nell'ancoraggio di armatura per coprire la linea di azione di sforzi di trazione ove si utilizzino ferri di ripresa. Per tale motivo anche queste applicazioni sono oggetto del rapporto tecnico EOTA TR 023 [15].

La Figura 9 mostra un'altra applicazione tipica di *ferri di ripresa post-installati*, in cui le connessioni sono soggette a momento flettente, esplicitamente esclusa dalle applicazioni dei ferri di ripresa post-installati contemplate in EOTA TR 023 [15]. Questi casi devono essere valutati mediante modelli specifici che esulano dall'approccio basato su questa approvazione. Dopo un'approfondita analisi numerica e sperimentale, Hilti ha sviluppato un metodo di calcolo per le connessioni momento resistenti utilizzando ferri diritti. Al contrario, nei progetti con ferri gettati in opera, questi nodi sono realizzati con ferri a uncino, come previsto dall'Eurocodice 2.



Ulteriori dettagli sul modello sono reperibili nella sezione 6.

Figura 9– Esempi di specifiche strutturali di ferri di ripresa post-installati esplicitamente non contemplati nel rapporto EOTA TR 023 [15]

2. Caratteristiche progettuali

2.1 Requisiti di progetto

Il calcolo di connessioni con *ferri di ripresa post-installati* prevede di stabilire la tipologia, il diametro, l'interasse e la quantità e lunghezza della regione di ancoraggio/giunzione. Tali dati si basano generalmente sul calcolo diretto delle forze agenti sulla sezione, oppure di criteri di adattamento all'armatura esistente.

Altre considerazioni per il progetto potranno riguardare:

- tipo di carico (sostenuto, sismico, shock);
- requisiti antifuoco;
- resistenza alla corrosione;
- requisiti di specifiche dei componenti, sulla base del tipo di elemento (integrità dell'armatura, ecc.).

2.2 Limitazioni date dal sito di installazione

Prima di progettare una connessione con *ferri di ripresa post-installati*, è essenziale individuare le limitazioni determinate dal sito di installazione. I parametri principali di cui tenere conto nel progetto comprenderanno, ad esempio:

- disposizione dei ferri di armatura esistenti, come indicati nei disegni e confermati in loco con apparecchiature di rilevamento (vedere sezione 3.1);
- prossimità richiesta tra armatura nuova ed esistente al fine di soddisfare le condizioni di sicurezza per giunzioni a sovrapposizione senza contatto, ecc.;
- metodi di perforazione richiesti (trapano a percussione, corona diamantata, punta cava Hilti);
- orientamento della connessione (verso il basso, sospesa, ecc.);
- temperatura ambientale e del calcestruzzo al momento dell'installazione;
- condizioni e tipo di calcestruzzo (ad es. fessurato, carbonatato);
- limitazioni di accesso e geometriche.

2.3 Lunghezza di ancoraggio richiesta

In generale, la profondità di posa dei ferri richiesta dipende dalla lunghezza di ancoraggio di progetto prevista dalla norma. Laddove limitazioni geometriche o pratiche di altro genere siano vincolanti, si potranno prevedere procedure alternative per stabilire la lunghezza di adesione. Il diametro del ferro di armatura e la lunghezza di ancoraggio richiesta possono determinare anche il tipo di sistema adesivo da impiegare. Resine con durata di lavorabilità superiore (ad es. Hilti HIT-RE 500-V3) sono generalmente più indicate per ferri con diametro grande in abbinamento a fori profondi, mentre con ferri di diametro medio-piccolo e fori più corti, i sistemi con tempi di indurimento accelerati (ad es. resine sintetiche ibride Hilti HIT-HY 200-R) migliorano l'efficienza dell'installazione. Queste considerazioni possono essere influenzate dalle condizioni previste nel sito di installazione (ad es. accesso e temperatura ambientale e del calcestruzzo).

2.4 Specifiche relative alle connessioni

La posizione dei *ferri di ripresa post-installati* rispetto all'armatura esistente deve essere indicata chiaramente nei documenti del progetto. Inoltre, le specifiche e i dettagli dovranno includere:

- sistema adesivo da impiegare;
- tipo di ferro e diametro;
- lunghezza di ancoraggio di progetto/giunzione richiesta;
- diametri dei fori e metodi di perforazione;
- requisiti relativamente alla preparazione/irruvidimento superficiale del calcestruzzo esistente;

- istruzioni sulla inviolabilità dell'armatura esistente e degli elementi immersi, secondo necessità;
- requisiti di addestramento/certificazione degli installatori, secondo necessità;
- requisiti di ispezione/conferma dei carichi.

2.5 Specifiche del sistema

Le specifiche dovranno mettere in relazione i presupposti di progetto e i requisiti specifici del sito contemplati nella documentazione del progetto. Scelte alternative basate sulla semplice specifica della resistenza di adesione potrebbero non essere sufficienti a garantire una corretta esecuzione del lavoro.

2.6 Calcoli relativi allo viluppo e lunghezza di sovrapposizione sulla base dell'Eurocodice 2

Le considerazioni seguenti riflettono le sezioni relative ai calcoli del rapporto EOTA TR 023, sezione 4 "Presupposti in base ai quali valutare l'idoneità all'uso" e gli specifici Benestare tecnici europei.

Metodo di calcolo di connessioni con ferri di ripresa post-installati

- Le connessioni con ferri di ripresa post-installati valutate secondo questo rapporto tecnico saranno calcolate similmente a ferri di armatura gettati in opera, secondo l'Eurocodice 2, utilizzando i valori di progetto di resistenza di adesione f_{bd} per barre deformate, come indicato nella relativa approvazione.
- Giunzione a sovrapposizione per ferri di armatura: per il calcolo della lunghezza di sovrapposizione di giunzioni sovrapposte si dovrà considerare lo spessore del copriferro all'estremità c_1 del ferro di ripresa post-installato:

$$l_v \geq l_0 + c_1$$

dove: l_0 = lunghezza di sovrapposizione richiesta

c_1 = spessore del copriferro all'estremità terminale del ferro applicato con adesivo

- La definizione della regione in adesione dell'Eurocodice 2 si applica anche ai ferri di ripresa post-installati.
- Dovranno essere rispettate le disposizioni dell'Eurocodice 2 riguardanti le specifiche del materiale (ad es. spessore del copriferro in relazione con la resistenza di adesione e la resistenza alla corrosione, interasse tra i ferri, armatura trasversale).
- Il trasferimento delle forze di taglio tra l'elemento in calcestruzzo nuovo e vecchio dovrà essere conforme all'Eurocodice 2 [1].

Ulteriori disposizioni

- Per evitare di danneggiare il calcestruzzo durante la perforazione si dovranno rispettare i seguenti requisiti:

- Spessore minimo del copriferro:

$$c_{min} = 30 + 0,06 l_v \geq 2ds \text{ (mm) per fori eseguiti con trapano a percussione}$$

$$c_{min} = 50 + 0,08 l_v \geq 2ds \text{ (mm) per fori eseguiti con trapano ad aria compressa}$$

I coefficienti 0,06 e 0,08 dovranno tenere in considerazione le possibili deviazioni durante la perforazione. Tale valore potrà essere inferiore qualora si utilizzino specifiche guide di perforazione.

Inoltre si dovranno osservare gli spessori minimi del copriferro di cui al paragrafo 4.4.1.2 dell'EC2: EN 1992-1-1: 2004.

- L'interasse minimo tra due ferri di ripresa post-installati sia $= 40 \text{ mm} \geq 4d$

- Per tenere in considerazione il possibile diverso comportamento dei ferri post-installati e gettati in opera in calcestruzzo fessurato:

- In linea generale, le lunghezze minime $l_{b,min}$ e $l_{o,min}$ stabilite nell'Eurocodice 2 relativamente a lunghezza di ancoraggio e lunghezza di sovrapposizione dovranno essere incrementate di un coefficiente di 1,5. Tale incremento potrà essere evitato in condizioni specifiche. Le condizioni che consentono di trascurare tale fattore per uno specifico sistema adesivo sono contenute nella relativa approvazione.

3. Installazione

In fase di calcolo e installazione dei *ferri di ripresa post-installati* si dovrà tenere in considerazione le limitazioni date dal sito di installazione.

NOTA. Oltre a sistemi di ancoraggio adesivo allo stato dell'arte, Hilti offre le apparecchiature di rilevamento e perforazione più all'avanguardia per facilitare l'installazione di *ferri di ripresa post-installati* di diversi diametri e lunghezza.

3.1 Individuazione di ferri d'armatura esistenti e di altri elementi immersi nel calcestruzzo

Tale operazione è eseguita generalmente con metodi di scansione categorizzabili come segue:

- a) scanner che individuano i materiali ferrosi mediante campi magnetici (scanner ferrosi, vedere la Figura 10);
- b) scanner che utilizzano GPR (georadar);
- c) apparecchiature di scansione radiografica.

Per la ricerca di ferri di armatura posti 200-250 mm sotto la superficie del calcestruzzo, gli scanner ferrosi consentono di determinare posizione e diametro del ferro. Per individuare elementi ferrosi e non ferrosi annegati nel calcestruzzo (ad es. condutture in alluminio), sono utilizzati scanner GPR. Nelle aree di elevata concentrazione di elementi annegati, o in cui l'armatura esistente sia troppo profonda per essere rilevata da sistemi ferrosi o GPR, potrebbe essere necessario ricorrere a metodi radiografici. Ove possibile, è generalmente preferibile fornire i documenti di progetto originali o "come realizzato" a supplemento dei risultati delle scansioni.



Figura 10 – Uso di uno scanner Hilti PS 200 Ferroskan per individuare e mappare armature esistenti prima della perforazione

3.2 Irruvidimento della superficie in calcestruzzo esistente

L'irruvidimento superficiale prima della gettata del nuovo calcestruzzo adiacente a quello esistente, oltre a migliorare l'adesione incrementa la capacità della giunzione di trasferire la resistenza di taglio mediante attrito. Ove si debba applicare nuovo calcestruzzo a una superficie esistente, l'irruvidimento dovrà essere eseguito in funzione dell'uso previsto, come disposto dall'Eurocodice 2 [5], e la superficie dovrà presentare una ruvidità di almeno 3 mm e un interasse di circa 40 mm. Lo strato carbonatato eventualmente presente sul calcestruzzo dovrà essere rimosso nell'area destinata a ricevere i *ferri di ripresa post-installati*. Come regola pratica, la superficie

carbonatata da rimuovere corrisponderà a un'area circolare il cui diametro è dato dal diametro della barra più 60 mm ($d_{rough} = \Phi + 60 \text{ mm}$), come nella Figura 11.

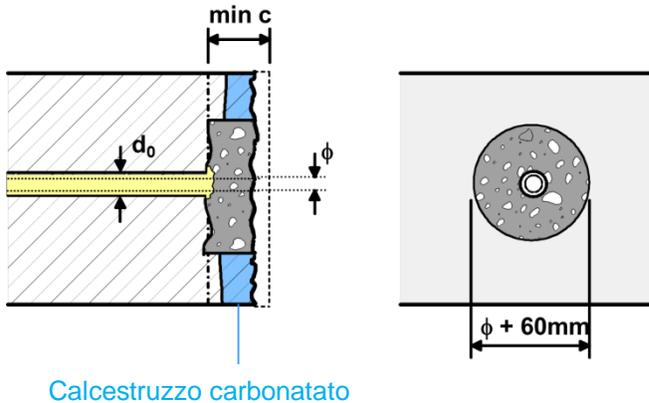


Figura 11 – Strato di calcestruzzo carbonatato da rimuovere su un'area circolare con $d_{rough} = \Phi + 60 \text{ mm}$)

L'irruvidimento richiesto può essere eseguito con mezzi meccanici (ad esempio perforatore Hilti TE 76 ATC con boccola, vedere Figura 12), granigliatura a sabbia o acqua ad altissima pressione. La superficie risultante non dovrà contenere materiale libero prima della gettata del nuovo calcestruzzo.



Figura 12 – Irruvidimento di una superficie di calcestruzzo con perforatore combinato Hilti TE 76

Qui di seguito sono riepilogate le disposizioni dell'Eurocodice 2 [5] riguardanti i ferri gettati in opera, relativamente a quanto pertiene anche il calcolo di *ferri di ripresa post-installati*.

$$V_{Edi} \leq V_{Rdi}$$

V_{Edi} è il valore di progetto della sollecitazione di taglio all'interfaccia, ovvero:

$$V_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i)$$

Dove:

B [-] è il rapporto tra la forza longitudinale nell'area del calcestruzzo nuovo e la forza longitudinale totale, nella regione di compressione o trazione, entrambe calcolate per la sezione considerata.

V_{Ed} [N] è la forza di taglio trasversale

z [mm] è il braccio di leva della sezione composita

b_i [mm] è la larghezza dell'interfaccia

V_{Rdi} è la resistenza a taglio di progetto all'interfaccia, data da:

$$V_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$$

Dove:

c [-] e μ [-] sono coefficienti che dipendono dalla ruvidità dell'interfaccia

f_{ctd} [N/mm²] è il valore della resistenza a trazione di progetto

σ_n [N/mm²] è la sollecitazione per unità di superficie generata dalla forza normale esterna minima attraverso l'interfaccia che può agire simultaneamente alla forza di taglio, ed è positiva per la forza di compressione e negativa per la forza di trazione. Quando σ_n è sottoposto a trazione, c è uguale a zero.

ρ [-] è il rapporto tra l'area dell'armatura (A_s) che attraversa l'interfaccia, inclusa l'armatura a taglio normale e l'area della giunzione (A_i).

α è compreso tra 45° e 90° ed è l'inclinazione del ferro di armatura rispetto all'asse parallelo all'interfaccia di contatto.

v [-] è il coefficiente di riduzione della resistenza.

Quando la superficie è stata irruvidita con attrezzi Hilti, si può presupporre cautelativamente che $c = 0,45$ e $\mu = 0,7$.

3.3 Installazione di ferri di ripresa post-installati con copriferro ridotto

Come nel caso dei ferri di ripresa gettati in opera, i *ferri di ripresa post-installati* con prodotti Hilti HY devono essere coperti con copriferro di spessore sufficiente a prevenirne la corrosione. Invece i prodotti Hilti RE consentono di non porre limiti allo spessore del copriferro, poiché la protezione dalla corrosione è fornita esclusivamente dalla densità dello strato di rivestimento.

Se il ferro è stato installato correttamente, e la resina lo avvolge per tutta la lunghezza, la protezione aggiuntiva dalla corrosione è fornita dalla resina stessa. La qualifica dei sistemi con ferri di ripresa post-installati ai sensi del rapporto EOTA TR 023 [15] comprende la verifica (mediante prove di invecchiamento accelerato) della protezione dalla corrosione data dalla resina adesiva.

Inoltre si deve prevedere una distanza sufficiente dal bordo del calcestruzzo esistente, per agevolare la perforazione senza causare fenomeni di frattura e/o fessurazione, in particolare quando si utilizzano apparecchiature di perforazione a percussione o trivellazione. Le guide di perforazione Hilti possono essere utilizzate con i trapani a percussione portatili Hilti per migliorarne la precisione (Figura 14) e di conseguenza ridurre la distanza dal bordo o dai ferri adiacenti. Nella valutazione tecnica europea di ogni prodotto sono contenute indicazioni dettagliate riguardo allo spessore minimo del copriferro con uso di guide di perforazione.

In assenza di altra indicazione, laddove non si utilizzino tali guide o altre tecniche per mantenere la precisione di perforazione, si potranno utilizzare le seguenti relazioni per contemplare eventuali deviazioni del foro rispetto al percorso previsto, per quanto concerne la distanza dal bordo e l'interasse:

$$\text{Fori eseguiti con trapano a percussione: } c_{\min, rqd} = 30 + 0,06 l_v \geq 2\Phi \quad (\text{mm})$$

$$\text{Fori eseguiti con trapano ad aria compressa: } c_{\min, rqd} = 50 + 0,08 l_v \geq 2\Phi \quad (\text{mm})$$

$$\text{Telaio per carotatrice (ad es. foro con corona diamantata): } c_{\min, rqd} = 30 + 0,02 l_v \geq 2\Phi \quad (\text{mm})$$

Dove:

l_v è la lunghezza di perforazione/ancoraggio del ferro nel calcestruzzo in mm;

Φ è il diametro del ferro in mm;

$c_{min,reqd}$ è lo spessore minimo del copriferro tale da impedire il danneggiamento del calcestruzzo durante la perforazione (Figura 13).

Esempio: $l_v = 255\text{ mm}$, $d_s = 12\text{ mm}$

Perforazione a percussione: $c_{min,reqd} \sim 45\text{ mm}$

Perforazione ad aria compressa: $c_{min,reqd} \sim 75\text{ mm}$

Perforazione con corona diamantata: $c_{min,reqd} \sim 35\text{ mm}$

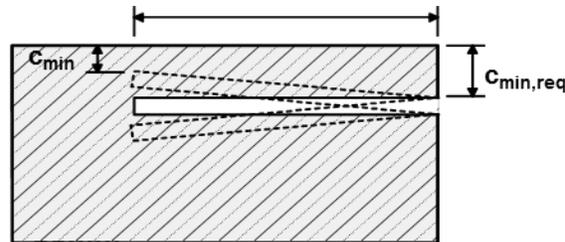


Figura 13 – Il valore di $c_{min,reqd}$ è calcolato per aumentare la possibilità che l'estremità del ferro installato rimanga coperta da copriferro avente lo spessore minimo richiesto c_{min}



Figura 14 – Perforazione con guida di perforazione

I requisiti di distanza per fori eseguiti con corona diamantata variano in funzione del tipo di corona, del suo diametro e lunghezza. Anche gli elementi annegati nel calcestruzzo possono causare una deviazione della punta rispetto al percorso previsto.

Per questioni di praticità, l'interasse tra ferri di ripresa post-installati adiacenti deve in genere essere pari ad almeno 4 volte il diametro del ferro. Ove applicabile, osservare le disposizioni dell'Eurocodice 2 [5] per quanto concerne spessore del copriferro e interasse dei ferri.

3.4 Metodo di perforazione

I ferri di ripresa post-installati generalmente richiedono una profondità di posa superiore per soddisfare i requisiti di lunghezza dell'ancoraggio. Per praticare i profondi fori necessari all'inserimento dei ferri di ripresa post-installati si ricorre a uno dei seguenti tre metodi:

- perforatori a impatto e rotazione (trapani a percussione) dotati di punta standard o in carburo a fioretto o punte cave Hilti (HDB)²;
- perforatori ad aria compressa;
- perforatori a corona diamantata con tecnologia di carotaggio a umido o a secco.

Ogni metodo presenta vantaggi e svantaggi: i perforatori a percussione (Figura 15) sono di facile reperibilità e sono la scelta di elezione nella maggior parte delle applicazioni, essendo portatili e di facile impiego. I trapani a percussione Hilti producono una superficie del foro non uniforme, particolarmente idonea a migliorare l'adesione (a condizione che si siano usate adeguate procedure di pulizia del foro). Per fori più lunghi, i trapani a percussione potrebbero non essere la soluzione più pratica; inoltre non sono sempre adatti ad attraversare armature esistenti, ove previsto.

Il sistema Hilti SafeSet™ consiste in punte cave (HDB) utilizzate in combinazione con aspiratori Hilti (VC 40-U o VC 20-U). Le punte Hilti HDB utilizzano la stessa avanzata tecnologia di perforazione al carburo delle punte Hilti TE-CX e TE-YX. Il sistema Hilti SafeSet offre risultati di buona qualità sia in calcestruzzo umido, sia secco ed elimina quella fase dell'installazione che più incide sulla capacità di carico e sui tempi: la pulizia del foro prima dell'iniezione della resina.



Figura 15 – Perforazione con un trapano Hilti a roto-percussione munito di tecnologia SafeSet™

La perforazione ad aria compressa offre velocità ed efficienza e produce una superficie di foratura ruvida idonea all'adesione; tuttavia, il maggiore impatto di energia associato all'aria compressa può incrementare la possibilità di danno a carico dell'elemento in calcestruzzo, in particolare se utilizzata in condizioni di distanza dal bordo o spessore posteriore ridotti. Per utilizzare i perforatori ad aria compressa è generalmente necessario disporre di valori di distanza dal bordo, interasse e spessore degli elementi maggiorati (vedere sezione 3.3). Per ulteriori informazioni contattare Hilti.

Per lunghezze di ancoraggio maggiori, l'opzione preferita è generalmente la perforazione a corona diamantata (Figura 16 e Figura 17).

² La punta cava Hilti rimuove automaticamente la polvere di calcestruzzo durante la perforazione, nell'ambito del sistema Hilti SafeSet™.



Figura 16 – Perforazione a corona diamantata in umido con un trapano portatile Hilti con tecnologia a cattura dell'acqua.



Figura 17 – Perforazione a corona diamantata inclinata con telaio Hilti.

Diversamente dai trapani a percussione, che causano fratture nel calcestruzzo a causa dell'energia di impatto, le corone diamantate utilizzano una superficie a consumo contenente frammenti di diamante per abrader il calcestruzzo. Le corone diamantate Hilti con segmenti saldati al laser offrono durata superiore ed eccezionale efficienza di perforazione. Grazie alle estensioni è inoltre possibile eseguire fori diritti di notevole lunghezza. Inoltre la rigidità del corpo della corona consente di eseguire fori con minore deviazione dal percorso previsto e attraverso armature esistenti senza sforzo eccessivo. D'altro canto, qualora si debba proteggere l'armatura esistente, questa caratteristica della corona diamantata può rappresentare un limite. L'aspetto più importante tuttavia è rappresentato dal tipo di foro prodotto tramite corona diamantata, con pareti molto lisce ricoperte da un sottile strato di polvere che ostacola la capacità di adesione della resina. Di conseguenza, i fori eseguiti con tale metodo devono essere puliti accuratamente prima di iniettare la resina. Si noti inoltre che alcuni sistemi adesivi non sono idonei all'uso con fori eseguiti con corona diamantata; infine, anche quando il prodotto è compatibile, a causa della superficie liscia del foro la resistenza di adesione per alcuni diametri del ferro è ridotta rispetto a fori eseguiti con perforatore a percussione. Per ottenere sistemi idonei sono state sviluppate procedure di pulizia del foro miranti a ottimizzare la forza di adesione, illustrate in dettaglio nelle *Istruzioni per l'uso* dei prodotti Hilti (denominate anche Istruzioni scritte del fabbricante, o MPII).

Il SafeSet™ Hilti consiste di un attrezzo di irruvidimento TE-YRT a forchetta flessibile che agisce sulle pareti del foro eseguito tramite carotaggio, migliorando così l'interblocco meccanico tra resina e calcestruzzo. Ciò migliora significativamente la resistenza di adesione, oltre a ridurre e semplificare le fasi di pulizia.



Figura 20 - Attrezzo di irruvidimento Hilti TE-YRT concepito specificamente per le difficili condizioni dei fori eseguiti con corona diamantata

Per ulteriori informazioni contattare Hilti.

NOTA. Prima di perforare le armature esistenti o altri oggetti immersi nel calcestruzzo, consultare il responsabile della progettazione e coordinazione lavori o altre autorità aventi giurisdizione.

NOTA. La corretta esecuzione del foro e la sua adeguata pulizia sono essenziali per le prestazioni dei *ferri di ripresa post-installati*. Tutti i prodotti di ancoraggio Hilti sono corredati da istruzioni dettagliate, denominate *Istruzioni per l'uso*. Per dubbi riguardanti la corretta installazione dei prodotti, Hilti offre la consulenza dei propri esperti i rappresentanti locali di Hilti, i centri Hilti nazionali, l'assistenza alla clientela Hilti, oppure online all'indirizzo www.hilti.com.

Figura 18 mostra gli effetti del metodo di perforazione sul comportamento in termini di spostamento del carico di un ferro di ripresa post-installato con profondità di posa ridotta. La resina impiegata nella prova non è approvata per l'uso in fori carotati, di conseguenza la resistenza di adesione è significativamente inferiore rispetto all'uso in fori con trapano a percussione o aria compressa, per cui il prodotto è approvato.

Ove non sia possibile predeterminare il metodo di perforazione, si consiglia di utilizzare una resina adatta a tutti i metodi di perforazione (ad es. Hilti HIT-RE 500 V3). In ogni caso, la resistenza di adesione ottenuta in fori con corona diamantata senza attrezzo di irruvidimento è molto inferiore rispetto ai fori eseguiti con trapano a percussione.

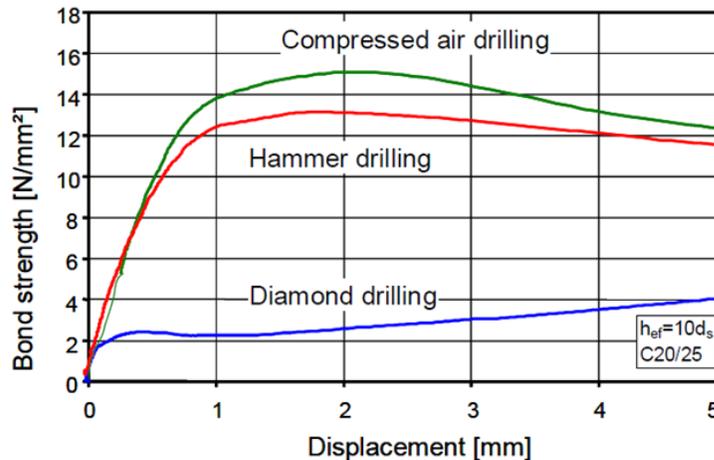


Figura 18 – Esempio dell'influenza del metodo di perforazione sul comportamento in termini di adesione e spostamento di un *ferro di ripresa post-installato* con profondità di posa pari a 10ϕ del ferro in calcestruzzo a bassa resistenza e foro pulito [14]

3.5 Pulizia del foro

L'adesione tra la resina e il calcestruzzo dipende direttamente dalle condizioni delle pareti del foro al momento dell'iniezione della resina stessa. Il calcestruzzo in cui viene inserito il *ferro di ripresa post-installato* può essere asciutto, saturo o persino parzialmente o completamente immerso in acqua al momento dell'installazione.

NOTA. Laddove sia necessario eseguire l'installazione in condizioni di calcestruzzo saturo d'acqua o immerso, verificare che il sistema adesivo da utilizzare sia qualificato per tali condizioni.

Il carotaggio a diamante a umido genera necessariamente un ambiente umido nel foro. La pulizia del foro carotato consiste in genere in risciacqui successivi finché

l'acqua che ne fuoriesce risulta trasparente, il soffiaggio del foro con aria compressa (Figura 19 e *Figura 21*) per rimuovere detriti e acqua, l'uso di una spazzola metallica (Figura 20) per pulire meccanicamente le pareti del foro. Tutte le procedure di pulizia terminano con soffiaggio ad aria compressa. (Importante: l'aria compressa solleva residui di perforazione nell'aria, quindi è necessario indossare sempre protezioni per gli occhi.)

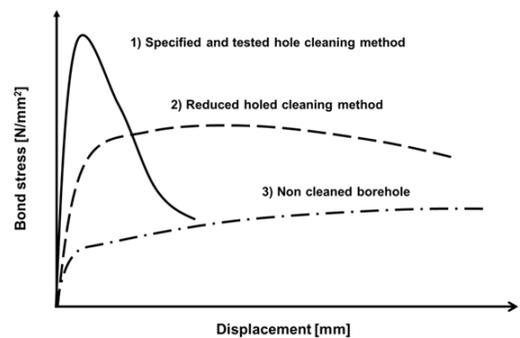


Figura 19 – Accessori Hilti per la pulizia dei fori con aria compressa (parziale) e set di accessori Hilti Profis Rebar



Figura 20 – Barra di prolunga Hilti e spazzole in acciaio di diverso calibro per la pulizia del foro.

Come specificato nelle *Istruzioni per l'uso Hilti*, l'importanza della pulizia del foro ai fini delle prestazioni dei *ferri di ripresa post-installati* è evidenziata nella Figura 21b. Laddove non sia possibile eseguire le diverse fasi delle procedure di pulizia, si raccomanda l'utilizzo della tecnologia Hilti SafeSet™, abbinata a punta trapano cava (HDB).



a)

b)

Figura 21 – Pulizia di un foro con attrezzo ad aria compressa (a) e rappresentazione schematica della potenziale influenza delle procedure di pulizia del foro sull'adesione e lo spostamento misurati per un ferro di ripresa post-installato sottoposto a trazione (b)

Hilti offre diversi accessori per la pulizia dei fori, in conformità a quanto prescritto nelle *Istruzioni per l'uso*, tra cui spazzole in acciaio di diverso calibro, prolunghe per le spazzole per fori di notevole lunghezza, accessori per agevolare lo spazzolamento meccanico, pistole ad aria, prolunghe per tubi flessibili, raccordi e ugelli aria. Il set di accessori Hilti Profis Rebar (Figura 19b) offre in un unico prodotto i componenti aggiuntivi necessari per l'installazione di *ferri di ripresa post-installati*.

3.6 Scelta del sistema adesivo

L'idoneità dei sistemi adesivi Hilti per l'impiego con ferri di ripresa post-installati è stata verificata rispetto a un'ampia gamma di parametri di cantiere. In ogni caso, la scelta del sistema adesivo Hilti appropriato (Figura 22) e dell'attrezzatura di iniezione (Figura 23) per l'installazione di ferri di ripresa post-installati dipende in una certa misura da parametri legati alle condizioni del cantiere (vedere in proposito la sezione 4.1).



Hilti HIT-RE 500 V3



Hilti HIT-HY 200-R

Figura 22 – Resine ancoranti Hilti idonee per connessioni con *ferri di ripresa post-installati*.

NOTA. In caso di applicazioni strutturali o determinanti ai fini della sicurezza, è sconsigliato impiegare resine che non siano state appositamente verificate per l'installazione di *ferri di ripresa post-installati*.

Ad esempio, se viene impiegata una resina a presa rapida per l'installazione di ferri di grande diametro e profondità, il tempo necessario all'iniezione della resina potrebbe essere superiore al tempo di lavorabilità del polimero. In questi casi, potrebbe non essere possibile inserire il ferro a fondo nel foro e/o la resina potrebbe non raggiungere la completa capacità adesiva. In particolare quando si inserisce una grande quantità di resina in fori di grandi dimensioni, la reazione esotermica associata alla polimerizzazione può causare un eccessivo innalzamento della temperatura, che a sua volta può causare un indurimento accelerato, complicando ulteriormente l'installazione del ferro.



Figura 23 – Uso di dispenser a batteria Hilti in combinazione con le resine Hilti HIT-RE 500 V3 o Hilti HIT-HY 200-R per ferri di diametro inferiore.

D'altro canto l'iniezione di resine a temperature inferiori a 0 °C può causare un'elevata viscosità, che similmente renderebbe difficile o impossibile l'iniezione della resina manuale e l'installazione del ferro.

Alcune considerazioni di base relative alla scelta della resina:

- È possibile iniettare la resina e installare il ferro di ripresa entro il tempo di lavorabilità della resina?
- Si dispone dell'attrezzatura di iniezione appropriata, inclusi tutti gli accessori necessari, per garantire una corretta erogazione e miscelazione?
- La resina è idonea alle condizioni di temperatura e umidità del calcestruzzo, all'orientamento del foro e al metodo di perforazione?
- Che forza meccanica o apparecchiatura saranno necessari per iniettare la resina e installare il ferro di ripresa nel foro riempito di resina?
- Come si prevede di reggere il ferro in posizione durante il tempo di presa della resina?

3.7 Iniezione della resina

L'iniezione della resina consente di evitare la formazione di vuoti. Oltre a ridurre la superficie di adesione e inibire l'indurimento, la presenza di vuoti d'aria nella resina iniettata può causare maggiore sforzo nell'installazione del ferro di ripresa ed eiezione incontrollata della resina dal foro durante l'installazione, poiché l'aria viene spinta fuori dalla matrice adesiva.

NOTA. Durante l'iniezione delle resine Hilti ricordarsi di indossare sempre adeguati dispositivi di protezione della pelle e degli occhi.

Per iniettare la resina nel foro con minima formazione di vuoti d'aria, il sistema di iniezione Hilti utilizza galleggianti con tolleranza corrispondente (Figura 24). Il sistema a galleggiante Hilti consente all'operatore di controllare il processo di iniezione mediante la pressione della resina sul pistoncino, migliorando significativamente la qualità e l'efficienza dell'iniezione.



Figura 24 – Galleggianti Hilti HIT-SZ, disponibili in diversi diametri

La scelta dell'attrezzatura per l'iniezione dipende in genere dal diametro del ferro e dal suo orientamento, dalle condizioni di temperatura ambientale e dall'accessibilità (Figura 25).



Figura 25 – Il dispenser pneumatico Hilti HIT-P8000D, indicato per installazione di grandi volumi con ferri di diametro largo.

3.8 Installazione dei ferri di ripresa

I ferri di piccolo diametro possono essere inseriti verticalmente verso il basso con uno sforzo relativamente contenuto. I ferri di diametro maggiore con orientamento orizzontale o inclinati verso l'alto possono richiedere uno sforzo notevole durante il sollevamento e l'inserimento nel foro riempito di resina (Figura 26). **In ogni caso, è consigliabile verificare che il ferro entri nel foro prima di iniettare l'adesivo.**

In caso di installazioni sospese, in particolare con ferri di diametro ragguardevole, è necessario prevedere il fissaggio del ferro durante la presa della resina. Potrebbe inoltre essere necessario produrre una certificazione dell'idoneità degli installatori e sottoporre l'applicazione a ispezioni specifiche nel caso in cui i ferri debbano sostenere carichi di trazione.

NOTA. I dispenser Hilti consentono di iniettare la resina in modo efficiente, senza formazione di vuoti, a prescindere dalla direzione di iniezione, dal diametro e profondità del foro e dalle temperature.



Figura 26 – L'installazione di un ferro lungo nel foro riempito di resina può richiedere l'intervento di diversi operatori.

4. Scelta del sistema

Le opzioni a disposizione per installare dei *ferri di ripresa post-installati* comprendono: boiaccia cementizia, resine polimeriche e sistemi ibridi che combinano componenti cementizie e polimeri. L'uso di boiaccia cementizia (ad es. con piastra base) è generalmente limitato ad applicazioni con foro a roto-percussione e non è trattato nella presente Guida. Sono state concepite resine specifiche per ancoraggio e ferri di armatura: generalmente denominate anche resine tixotropiche, presentano una viscosità adeguata per ottenere uno strato adesivo privo di vuoti nel gioco tra il ferro di armatura e il calcestruzzo, e al contempo impediscono la fuoriuscita dalla sede della resina non ancora solidificata. Questo sistema consente di eseguire l'installazione secondo qualsiasi orientamento, con resistenza di adesione superiore in diverse condizioni di uso. La scelta del sistema corretto dipende da numerosi parametri legati al cantiere stesso.

Il software di calcolo Hilti PROFIS Rebar semplifica l'identificazione della resina Hilti ottimale per le installazioni di ferri di ripresa. Di facile navigazione, con funzioni, filtri e menu intuitivi, il software PROFIS esegue i calcoli in modo automatico e preciso con un solo clic, tenendo in considerazione le limitazioni dovute al sito selezionate dall'operatore.

4.1 Considerazioni relative alla scelta del sistema

Le limitazioni dovute al sito di installazione incidono sui valori di progetto (resistenza di adesione) e sull'efficacia dell'installazione stessa. I parametri tipici dei sistemi adesivi Hilti sono illustrati nella Tabella 2.

Tabella 2 – Parametri tipici delle resine HIT-HY 200-R e HIT-RE 500 V3

Limitazioni date dal sito di installazione	HIT-HY 200-R¹	HIT-RE 500 V3
Diametro ferro (intervallo tipico)	8-32 mm	8-32 mm ⁽²⁾
Intervallo di profondità di posa	Fino a 2 m ^{(3),(5)}	Fino a 3,2m ^{(3),(5)}
Temperatura del materiale base (installazione)	Tra -10 °C e 40 °C	Tra -5 °C e 40 °C
Tempo di lavorabilità³	Da 6 min a 3 h	Da 10 min a 2 h
Tempo di indurimento³	Da 1 h a 20 h	Da 4 h a 168 h
Fori praticati in calcestruzzo asciutto e saturo d'acqua	Sì	Sì
Fori riempiti d'acqua e applicazioni sott'acqua	No	Sì
Perforazione con trapano a percussione	Sì	Sì
Perforazione con corona diamantata	No	Sì
Tecnologia Hilti SafeSet™ con attrezzo di irruvidimento Hilti	No	Sì
Tecnologia Hilti SafeSet™ con aspiratore Hilti HDB e VC	Sì	Sì ⁴

¹ Disponibile HIT-HY 200-A (indurimento accelerato). Non indicato per barre di grande diametro, a causa del breve tempo di lavorabilità.

² Per ferri di diametro superiore, contattare Hilti.

³ Correlato alla temperatura.

⁴ Contattare Hilti.

⁵ Correlato al dispenser impiegato.

La scelta del sistema dipende quindi dalla combinazione di requisiti di progetto e limitazioni dovute al sito di installazione. Si noti inoltre che ogni sistema presenta diverse opzioni di iniezione, per quanto concerne il volume della cartuccia e l'attrezzatura di iniezione (manuale o a batteria oppure pneumatico). Inoltre Hilti propone sistemi di perforazione specializzati, che riducono sostanzialmente i requisiti relativi alla pulizia del foro.

Un aspetto spesso trascurato nella scelta del sistema è il volume assoluto della resina da inserire nel foro. Fori profondi e di grande diametro necessitano di un volume di resina maggiore di quanto può essere ragionevolmente inserito anche con un'attrezzatura pneumatica. Inoltre l'iniezione di grandi quantità di resina potrebbe generare surriscaldamento, a causa della natura esotermica della polimerizzazione. Questi aspetti devono essere considerati con attenzione nelle applicazioni di *ferri di ripresa post-installati* che esulano dai normali intervalli di valori.

NOTA. Il personale tecnico Hilti è a disposizione per consulenza in caso di applicazioni standard o non standard.

5. Sviluppo dei dati di progetto

5.1 Premessa

Negli ultimi vent'anni sono state condotte approfondite sperimentazioni per valutare le connessioni con *ferri di ripresa post-installati* sottoposte a diverse condizioni di carico. Buona parte di questo lavoro di ricerca è stato condotto presso importanti studi di ricerca in Europa e negli Stati Uniti, nonché presso i laboratori di ricerca di proprietà di Hilti [7],[8],[9],[10],[11],[12],[13],[14]. I risultati delle prove sono coerenti tra loro e dimostrano che i *ferri di ripresa post-installati* per i quali sono stati impiegati *sistemi qualificati* presentano caratteristiche di prestazione almeno equivalenti a quelle dei ferri di armatura gettati in opera in condizioni simili, anche quando il trasferimento del carico di base non è identico.

Figura 27 mostra schematicamente il meccanismo di trasferimento del carico nei ferri di armatura gettati in opera e post-installati sottoposti a trazione. Nel punto di interfaccia tra calcestruzzo e ferro di armatura, il carico viene trasferito principalmente mediante l'interblocco meccanico fornito dalle nervature. L'interblocco meccanico esercitato dalle nervature dirige le forze verso i puntoni di trazione a partire dalle nervature, generando sollecitazioni di trazione circolari perpendicolari alla direzione di carico. Se il copriferro è troppo sottile, queste sollecitazioni di trazione circolari possono causare fratture nel calcestruzzo stesso. Se il copriferro è "alto", il calcestruzzo si disgrega nella zona delle nervature e causa cedimento per sfilamento, oppure si può verificare il cedimento dell'acciaio.

Lo stesso principio relativamente al trasferimento del carico si applica ai ferri di ripresa post-installati; tuttavia, all'interfaccia tra calcestruzzo e resina il carico è trasferito tramite adesione e micro-interconnessioni dovute alla ruvidità della superficie del foro. Il ridotto spessore del copriferro può condurre anche a cedimento da frattura; tuttavia, si può verificare anche un cedimento da sfilamento tra il ferro e la resina, oppure tra la resina e il calcestruzzo, a seconda della resistenza dei singoli strati. Potrebbe verificarsi anche un cedimento dell'acciaio, in caso di profondità di posa sufficiente.

La *resistenza di adesione* è generalmente definita come l'adesione media sulla lunghezza del ferro immerso nel calcestruzzo, supponendo una distribuzione costante della sollecitazione di adesione sulla lunghezza del ferro di armatura (modello di adesione uniforme), sia per quanto riguarda i ferri di armatura gettati in opera che quelli post-installati.



Figura 27 – Meccanismo schematico del trasferimento del carico di un ferro di armatura gettato in opera e post-installato.

Figura 28 mostra il confronto tra le prestazioni di ferri di ripresa post-installati e gettati in opera secondo le prove di sfilamento eseguite presso l'Università di Stoccarda [14]. Per copriferro ridotti ($c = 50$ mm), i carichi a cedimento dei ferri *post-installati* e dei ferri gettati in opera sono risultati praticamente identici, dimostrando che, per quanto concerne il cedimento da frattura, i *ferri di ripresa post-installati* qualificati si comportano come ferri gettati in opera. Quando il copriferro è maggiore, le sollecitazioni circolari necessarie per fratturare il calcestruzzo non sono sufficientemente elevate e quindi si verifica il cedimento per sfilamento dei ferri.

Laddove lo sfilamento (cedimento dell'adesione) determina il comportamento del sistema, la resistenza di adesione di un *ferro di ripresa post-installato* potrebbe essere significativamente superiore rispetto a quella di un ferro gettato in opera, e ciò dipenderà dalla resina impiegata.

Inoltre le prestazioni in termini di slittamento del carico di *ferri di ripresa post-installati* con un sistema qualificato sono simili a quelle di ferri di armatura gettati in opera. Di conseguenza, le disposizioni di progetto relative al carico di trazione su ferri di ripresa gettati in opera possono essere estese ai *ferri di ripresa post-installati* in combinazione con prodotti qualificati.

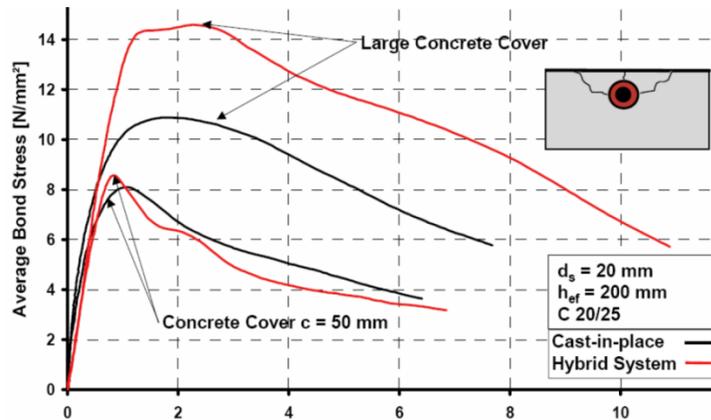


Figura 28 – Confronto delle sollecitazioni di legame in funzione della distanza dal bordo [14]

Figura 29 mostra i risultati di altre prove per mezzo di valori di resistenza di adesione ultima calcolati desunti da prove su ferri di ripresa gettati in opera e post-installati in C20/25, in funzione del relativo copriferro c_d/Φ . Inoltre è stata tracciata la resistenza di adesione di progetto risultante f_{bd} , secondo l'Eurocodice 2 [5], tenendo in considerazione il relativo copriferro.

$$f_{bd} = f_{bd,EC2}/\alpha_2 \text{ with } 0,7 \leq \alpha_2 \leq 1,0 \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$f_{bd} = f_{bd,EC2}/(1,0 - 0,15(c_d - \Phi)/\Phi) \quad (\text{N/mm}^2)$$

con $f_{bd,EC2} = 2,3 \text{ N/mm}^2$ secondo [12]

$$\text{mentre } c_d/\Phi = 1,0, \text{ e } \alpha_2 = 1,0 \quad \rightarrow f_{bd} = 1,0 f_{bd,EC2}$$

$$c_d/\Phi = 2,0, \text{ e } \alpha_2 = 0,85 \quad \rightarrow f_{bd} = 1,18 f_{bd,EC2}$$

$$c_d/\Phi = 3,0, \text{ e } \alpha_2 = 0,70 \quad \rightarrow f_{bd} = 1,43 f_{bd,EC2}$$

Nella Figura 29 si osserva che la distribuzione dei valori di resistenza di adesione ultima diminuisce al crescere del copriferro e che i valori di resistenza di adesione ultima derivati per i ferri di ripresa post-installati sono fino a 2,5 volte superiori rispetto ai valori della resistenza di adesione ultima dei ferri gettati in opera.

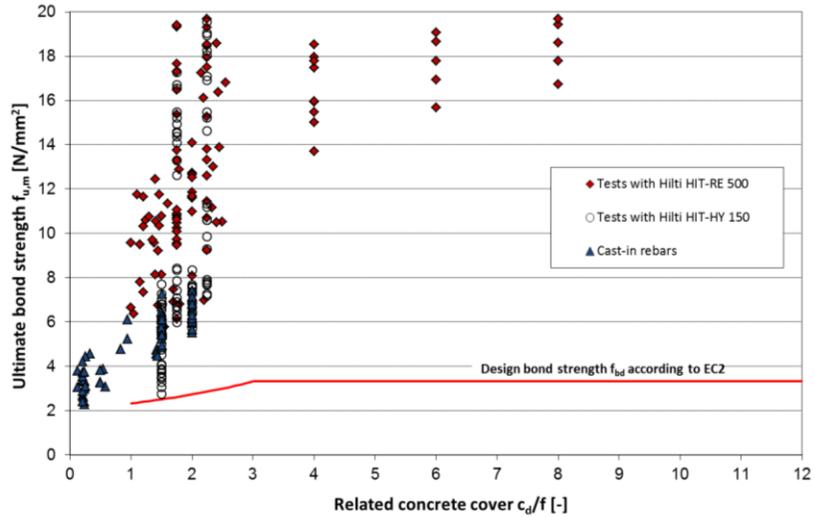


Figura 29 – Valori di resistenza di adesione ultima di ferri di ripresa post-installati con diverse resine Hilti e ferri di armatura gettati in opera, desunti dalle prove di laboratorio. A titolo di confronto, è tracciata anche la resistenza di adesione di progetto di ferri gettati in opera secondo l'Eurocodice 2 [5].

L'importanza della giusta combinazione di resistenza di adesione e rigidità in caso di giunzione è osservabile nella Figura 30.

La Figura 30a mostra la distribuzione delle sollecitazioni sull'acciaio di un ferro gettato in opera giuntato con un altro ferro gettato in opera, mentre la figura Figura 30b mostra i risultati di un ferro gettato in opera giuntato con un ferro di ripresa post-installato, per diversi livelli di carico misurati con un estensimetro, a titolo di confronto. Le curve superiori rappresentano la distribuzione delle sollecitazioni sull'acciaio al carico ultimo. I valori di sollecitazione dell'acciaio più elevati sono rilevati all'estremità caricata di ciascun ferro. Quando un ferro gettato in opera viene giuntato con un altro ferro gettato in opera, i valori delle sollecitazioni sull'acciaio sono praticamente identici per entrambi i ferri, mentre è possibile anche considerare la distribuzione come simmetrica rispetto all'asse, e si può assumere che l'asse di riflessione si collochi nel mezzo della giunzione.

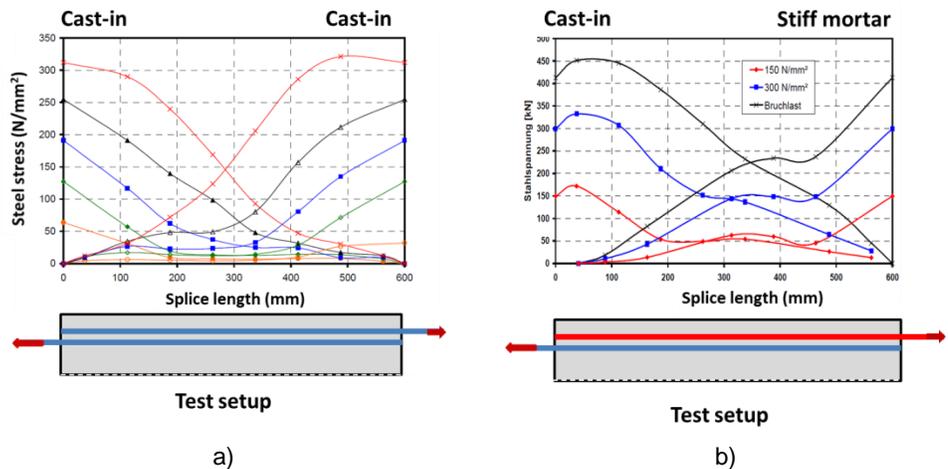


Figura 30 – Distribuzione delle sollecitazioni sull'acciaio in giunzioni a diversi livelli di carico: (a) ferro gettato in opera giuntato con altro ferro gettato in opera e (b) ferro gettato in opera giuntato con ferro di ripresa post-installato con resina approvata per ancoraggi ma non per ferri di ripresa, come da EOTA TR 023 [15]

Diversamente da quanto osservato nella Figura 30a, la Figura 30b mostra la distribuzione delle sollecitazioni sull'acciaio con una configurazione della prova identica, ma in questa prova un ferro gettato in opera è stato giuntato con un ferro post-installato utilizzando una resina epossidica estremamente rigida approvata per ancoraggi ma non per ferri di ripresa post-installati. In tale sistema, la giunzione ha mostrato una distribuzione disomogenea delle sollecitazioni sulla sua lunghezza. Tale distribuzione disomogenea può generare una fessura di grande ampiezza nell'area del ferro di ripresa post-installato e rendere quindi non idonea l'applicazione di ferri di ripresa post-installati.

Le resine Hilti HIT RE/HY hanno superato tutte le prove e possono essere considerate una soluzione affidabile per ferri di ripresa post-installati, con un buon equilibrio tra rigidità e prestazioni. Le prove hanno evidenziato una distribuzione uniforme delle sollecitazioni sulla lunghezza della giunzione.

Nel 2006, l'Organizzazione europea per la valutazione tecnica (EOTA) ha emesso il Rapporto tecnico TR 023 *Valutazione dei ferri di ripresa post-installati* [15]. Questo documento fornisce una metodologia per accertare che le connessioni eseguite con *ferri di ripresa post-installati* che impieghino uno specifico sistema mostrino comportamenti paragonabili a quelli delle connessioni con ferri gettati in opera in termini di carico e comportamento dello spostamento.

5.2 Definizione delle prestazioni del sistema richieste (qualifica)

L'idoneità di un sistema adesivo per applicazioni con *ferri di ripresa post-installati* dipende da numerosi fattori. I sistemi che diversamente sarebbero idonei per determinate applicazioni di ancoraggio non soddisfano necessariamente i requisiti di sicurezza e affidabilità delle connessioni con ferri di ripresa.

Nella Figura 31 sono elencate tutte le prove richieste perché un sistema di ancoraggio adesivo sia qualificato per applicazioni con *ferri di ripresa post-installati* come disposto nel TR 023 [15], e che possono essere riepilogate come segue:

1. capacità della resina di sviluppare la resistenza di adesione richiesta dalla classe di resistenza del calcestruzzo da C20/25 a C50/60;
2. sensibilità della resistenza di adesione alle condizioni di pulizia del foro, al congelamento e scongelamento, a valori estremi di temperatura ambientale del calcestruzzo, all'orientamento dell'installazione e all'esposizione ad ambienti alcalini/solfurei;
3. capacità del sistema di eseguire con successo installazioni di ferri lunghi (fino a 60 volte il diametro del ferro) senza vuoti significativi nella resina attorno al *ferro di ripresa post-installato*;
4. resistenza alla corrosione del *ferro di ripresa post-installato*.

In linea generale, le resine moderne idonee a installazioni strutturali sono in grado di sviluppare resistenze di adesione superiori a quelle osservate con ferri di armatura gettati in opera; tuttavia, le condizioni del sito di installazione, la temperatura e altri fattori da contemplare nel processo di valutazione possono ridurre significativamente la resistenza di adesione. Per tale motivo è essenziale ai fini della qualifica valutare le prestazioni di tutto il sistema e non solo la resistenza di adesione della resina determinata in condizioni ottimali.

	Purpose of test	Concrete (1)	Rebar (2) size length (9)		Minimum number of tests	Criteria req. α (3)	Test procedure
1	Bond resistance in C20/25	C20/25	12mm 25mm d_{max}	10 d_s 10 d_s 10 d_s	5 5 (4) 5	see 3.3.2	2.2
2	Bond resistance in C50/60	C50/60	d_{max}	7 d_s	5	see 3.3.2	2.3
3	Installation safety dry concrete	C20/25	d_{max} (5)	10 d_s	5	≥ 0.8 (6)	2.4
4	Installation safety wet concrete	C20/25	d_{max} (5)	10 d_s	5	≥ 0.75 (6)	2.5
5	Functioning under sustained loads	C20/25	12mm	10 d_s	5	≥ 0.9	2.6
6	Functioning under freeze/thaw conditions	C50/60 (7)	12mm	7 d_s	5	≥ 0.9	2.7
7	Functioning with installation direction	C20/25	d_{max}	10 d_s	5	≥ 0.9	2.8
8	Installation at maximum embedment depth	C20/25	d_{max}	max l_v	5	see 3.2.3	2.9
9	Correct injection		d_{max}	max l_v	5	see 3.2.4	2.10
10	Checking durability of mortar (8)	C20/25	12mm	10 d_s	3 x 10	see 3.3.3	2.11
11	Corrosion resistance of rebar (10)	C20/25	12mm	70mm	3	see 3.3.4.3	3.3.4.2

Notes to Table 2.1

- (1) All tests performed in non-cracked concrete
- (2) size: diameter of the rebar; d_{max} : max. diameter of the rebar specified by the manufacturer; length: embedment length of the bar in the concrete
- (3) see 3.3.1.
- (4) Tests are necessary only, if tests according to line 3 and 4 are done with $d_s = 25\text{mm} < d_{max}$
- (5) Tests shall be done with $d_s = 25\text{mm}$, if comparison tests according to line 1 are carried out with $d_s = 25\text{mm}$ instead of d_{max}
- (6) The required α shall not be changed, because the concept of installation safety factor γ_2 is not supported by EC2.
- (7) The test result shall be normalised to C20/25 by using a factor reflecting the influence of concrete strength or bond resistance as established by tests according to line 1 and 2
- (8) Tests are not required for mortars based on cement only
- (9) 10 d_s and 7 d_s shall be reduced in case of steel failure mode. It is the objective of these tests to determine bond resistance.
- (10) No prove of the corrosion resistance of the rebar is needed if post-installed rebars are used in building components in dry surroundings according to exposure class X0 and XC1 of EC2. Also no prove is needed when only corrosion resistant rebars are specified for all applications; see 3.3.4.1.

Figura 31 – Programma delle prove volte a valutare i ferri di armatura da impiegare in connessioni con *ferri di ripresa post-installati* (EOTA TR 023) [15].

6. Principi di calcolo

6.1 Determinazione della lunghezza del ferro di ancoraggio richiesta

I sistemi qualificati secondo EOTA TR 023 [15] devono dimostrare caratteristiche di resistenza di adesione e rigidità comparabili a quelle di armature gettate in opera. Per tale motivo i *ferri di ripresa post-installati* con sistemi qualificati possono essere progettati e specificati facendo riferimento alle stesse disposizioni applicabili a ferri di armatura diritti gettati in opera.

6.2 Panoramica delle disposizioni dell'Eurocodice 2 [5] per la lunghezza di ancoraggio per ferri di ripresa diritti

L'Eurocodice 2 [5] si basa, per quanto concerne la lunghezza di ancoraggio, sulla sollecitazione di adesione media raggiungibile sulla lunghezza della porzione di armatura immersa nel calcestruzzo. La lunghezza di ancoraggio può essere definita come la lunghezza più corta in cui la sollecitazione del ferro aumenta da zero al valore di progetto dell'acciaio σ_{sd} e che agisce nel punto in cui inizia l'ancoraggio o la giunzione. La sollecitazione del ferro è la forza per unità di superficie della sezione trasversale del ferro.

Il calcolo del cemento armato strutturale è basato in pratica sul presupposto che il ferro di armatura svilupperà la propria resistenza di snervamento nominale prima che si

verifichi un cedimento prematuro a causa di adesione inadeguata. La lunghezza di ancoraggio di base richiesta, la lunghezza di ancoraggio di progetto e la lunghezza di giunzione sono calcolate in modo che la resistenza allo snervamento nominale (la sollecitazione minima del ferro a cui si verifica una deformazione permanente [anelastica]) del ferro si possa sviluppare sotto carico strutturale. Anche se l'Eurocodice 2 non richiede calcoli della duttilità della connessione, si raccomanda vivamente di impiegare una lunghezza di ancoraggio tale da i garantire lo sviluppo della resistenza allo snervamento nominale.

Qui di seguito sono riepilogate le disposizioni dell'Eurocodice 2 [5] per quanto riguarda i ferri gettati in opera, nella misura in cui queste interessano il calcolo di *ferri di ripresa post-installati*.

La lunghezza di ancoraggio è strettamente correlata alla resistenza di adesione di progetto f_{bd} , calcolata come segue:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Dove:

2,25 = valore di base della resistenza di adesione di progetto (N/mm²)

η_1 = coefficiente correlato alla qualità della condizione di adesione e alla posizione del ferro

durante la gettata del calcestruzzo $\eta_1 = 1,0$ indica buone condizioni di adesione $\eta_1 = 0,7$ è utilizzato per tutti gli altri casi. Si noti che per ferri di ripresa post-installati si dovrà considerare $\eta_1 = 1,0$ (-).

η_2 = coefficiente correlato al diametro del ferro: $\eta_2 = (132 - \Phi)/100 \leq 1,0$ dove Φ è il diametro nominale del ferro di armatura [mm] mentre $\eta_2 = 1,0$ per $\Phi \leq 32$ mm (-)

f_{ctd} = resistenza di trazione di progetto del calcestruzzo

La lunghezza di ancoraggio di base richiesta $l_{b,rqd}$ è calcolata come segue:

$$l_{b,rqd} = (\Phi/4) \cdot (\sigma_{sd}/f_{bd}) \quad (\text{mm})$$

Dove:

Φ = diametro del ferro di armatura (mm)

σ_{sd} = sollecitazione dell'acciaio di progetto all'inizio dell'ancoraggio (N/mm²)

f_{bd} = valore di progetto della sollecitazione di adesione ultima (N/mm²)

La lunghezza di ancoraggio di progetto l_{bd} è calcolata sulla base della lunghezza di ancoraggio di base richiesta $l_{b,rqd}$, tenendo in considerazione l'influenza dei cinque parametri (da α_1 a α_5) e sapendo che non deve essere inferiore alla lunghezza minima di ancoraggio $l_{b,min}$. La lunghezza di ancoraggio di progetto l_{bd} è calcolata come segue:

$$\begin{aligned} \text{Armatura sotto trazione:} \quad & l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (\text{mm}) \\ \text{Armatura sotto compressione:} \quad & l_{bd} = \alpha_4 l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (\text{mm}) \end{aligned}$$

Dove:

α_1 = tiene in considerazione la forma del ferro (per ferri con estremità diritte $\alpha_1 = 1,0$, per altre forme in determinate condizioni $\alpha_1 = 0,7$) (-)

α_2 tiene in considerazione il copriferro: $0,7 \leq \alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - k\Phi) / \Phi \leq 1,0$
dove c_d è il
valore minimo di (a) il copriferro e (b) metà della misura dell'interasse libero tra i
ferri e $k = 1$ per ferri senza uncino e $k = 3$ per ferri con uncino (-).
 α_2 tiene in considerazione il confinamento passivo generato dal calcestruzzo circostante.

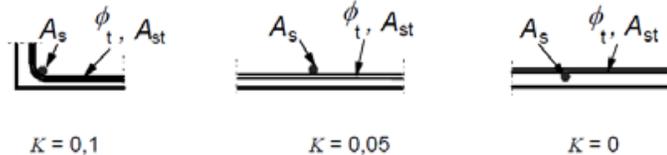
Per semplificare, si può presupporre $\alpha_2 = 1,0$.

α_3 tiene in considerazione l'effetto dell'armatura trasversale, dove $0,7 \leq \alpha_3 = 1 - K \lambda \leq 1,0$ con $\lambda = (\sum A_{st} - \sum A_{st,min}) / A_s$. (-)

$\sum A_{st}$ = superficie della sezione trasversale dell'armatura trasversale minima sulla
lunghezza di ancoraggio di progetto l_{bd} (mm²)

$\sum A_{st,min} = 0,25 A_s$ per travi e $\sum A_{st,min} = 0$ per solette dove A_s = l'area di un ferro ancorato singolo avente diametro massimo (mm²)

K : coefficiente correlato alla posizione del ferro di ripresa post-installato



α_3 tiene in considerazione il confinamento passivo generato dall'armatura laterale. Gli elementi strutturali in calcestruzzo confinati reagiscono alla spinta del modulo di Poisson e generano pressioni laterali. Con l'aumentare della pressione laterale sull'acciaio, aumenta la duttilità del calcestruzzo (ovvero la sua capacità di sostenere ampie variazioni permanenti di forma senza spezzarsi). Per semplificare, si può presupporre $\alpha_3 = 1,0$.

$\alpha_4 = 0,7$ se l'armatura trasversale è saldata all'armatura da ancorare, altrimenti $\alpha_4 = 1,0$ (-)

$\alpha_5 =$ tiene in considerazione la pressione trasversale, mentre $\alpha_5 = 1 - 0,04 p \geq 0,7$ dove p è la pressione trasversale sulla lunghezza di ancoraggio (confinamento attivo).

La pressione di confinamento esercitata lateralmente al calcestruzzo precompresso prima dell'applicazione del carico causa una deformazione volumetrica iniziale dovuta alla compressione. Per superare questo problema, sono necessarie ulteriori sollecitazioni e deformazioni assiali, e la capacità di carico del calcestruzzo è incrementata rispetto al calcestruzzo sottoposto a confinamento passivo.

L'effetto cumulativo di tali influenze è limitato da $\alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \geq 0,7$

La lunghezza di ancoraggio minima $l_{b,min}$ è calcolata come segue:

$$l_{b,min} = \max (0,3 l_{b,rqd}; 10 \Phi; 100 \text{ mm}) \text{ per ferri in trazione (mm)}$$

$$l_{b,min} = \max (0,6 l_{b,rqd}; 10\Phi; 100 \text{ mm}) \text{ per ferri in compressione (mm)}$$

Anche la lunghezza di giunzione di progetto l_o viene calcolata a partire dalla lunghezza di ancoraggio di base richiesta $l_{b,rqd}$ con:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 l_{b,rqd} \geq l_{0,min} \quad (\text{mm})$$

Per ferri in compressione (generalmente considerati solo in pilastri sottoposti a carichi considerevoli) tutti i coefficienti α ad eccezione di α_6 sono uguali a quelli impiegati per gli ancoraggi (vedere sopra). Per ferri in trazione (e α_4 anche in compressione) i coefficienti sono definiti come segue:

$\alpha_6 = 1$, se tutti i ferri sono giunti nella stessa regione (ovvero se le giunzioni non sono scaglionate) come generalmente accade nelle giunzioni post-installate (-)

N.B. Se l'interasse libero tra i ferri di armatura sovrapposti e supera di 4 volte il diametro del ferro Φ o è maggiore di 50 mm, la lunghezza di sovrapposizione sarà incrementata di un valore pari a $e - 4\Phi$ oppure $e - 50$ mm.

La lunghezza minima di giunzione $l_{0,min}$ può essere calcolata nel modo seguente:

$$l_{0,min} = \max (0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd}; 15\phi; 200 \text{ mm})$$

6.3 Disposizioni specifiche per ferri di ripresa post-installati

Per prevenire il danneggiamento del calcestruzzo durante la perforazione si dovranno rispettare i seguenti requisiti:

- Spessore minimo copriferro:
 $c_{min} = 30 + 0,06 l_v \geq 2d_s$ (mm) per fori eseguiti con trapano a percussione
 $c_{min} = 50 + 0,08 l_v \geq 2d_s$ (mm) per fori eseguiti con trapano ad aria compressa

I coefficienti 0,06 e 0,08 tengono in considerazione le possibili deviazioni durante la perforazione. Tuttavia, se si utilizzano specifiche guide di perforazione, tale valore può essere diminuito.

- L'interasse minimo tra due ferri di ripresa post-installati deve essere $4\phi \geq 40$ mm.

Si noti che l'Eurocodice 2 [5] limita l'entità della sollecitazione di adesione da utilizzare nel calcestruzzo mediante un massimo di 0,7 sul valore del coefficiente $0,7 \leq \alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - k\Phi)/\Phi \leq 1,0$ nell'equazione di calcolo della lunghezza di ancoraggio di base. Figura 32 mostra schematicamente questo limite, in cui per ferri con un valore di copriferro alto ($c_d / \phi \geq 3$), si suppone che la frattura non prevalga più sul comportamento al carico ultimo.

Le resine ancoranti Hilti possono generare sollecitazioni di adesione che superano ampiamente questo limite, rappresentato dalla linea della "capacità di adesione di progetto effettiva" tracciata nella figura. Le premesse di questa funzione sono illustrate nella sezione 6.3.

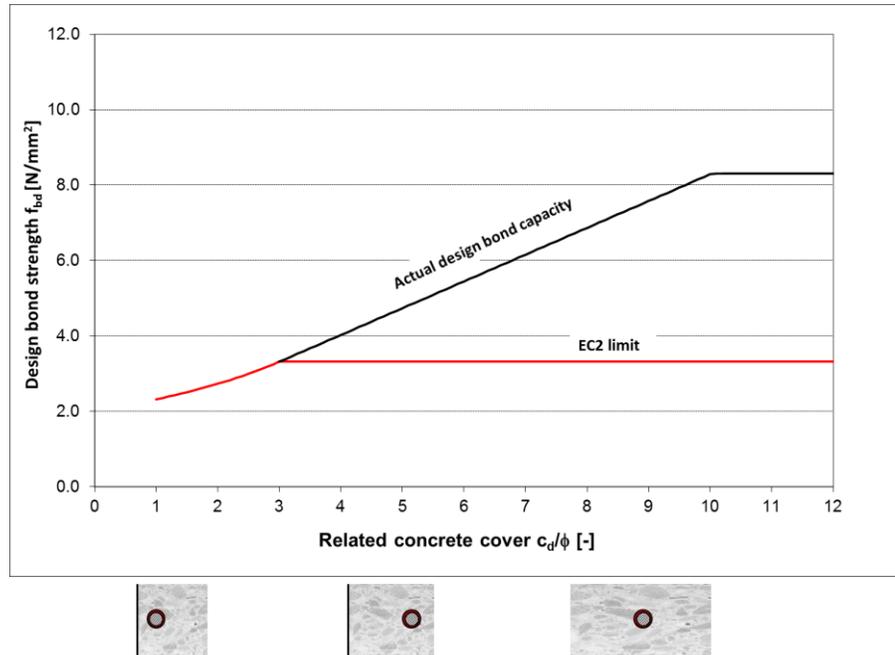


Figura 32 – Limite effettivo sulla sollecitazione di adesione di ferri di ripresa post-installati che utilizzano sistemi adesivi Hilti, rappresentato dalla “capacità di adesione di progetto effettiva” e dai valori della resistenza di adesione di progetto forniti dall’Eurocodice 2 [5]

6.4 Approcci alternativi per la definizione della profondità di posa: il metodo di calcolo Hilti Rebar

Le disposizioni dell’Eurocodice 2 [5] relativamente alla lunghezza di ancoraggio sono formulate sulla base del presupposto che i ferri gettati in opera possano avere un interasse ridotto e possano essere gettati a una certa distanza dalla superficie del calcestruzzo.

Non è possibile ridurre la lunghezza di ancoraggio di ferri di armatura con un copriferro maggiore o uguale a 3ϕ , poiché si suppone che il cedimento per sfilamento prevalga per questi ferri (rispetto al cedimento da frattura). Incrementando lo spessore del copriferro dovrebbe essere possibile ridurre ulteriormente la lunghezza di ancoraggio, oppure aumentare ulteriormente la resistenza di adesione di progetto per ferri di ripresa post-installati con resina Hilti; tuttavia, i ferri che sopportano le sollecitazioni di adesione possono generare un cedimento da rottura conica del calcestruzzo, se il ferro non è caricato contro un puntone di compressione locale o globale.

Tuttavia, quando i *ferri di ripresa post-installati* sono applicati in connessione momento resistente, non sovrapposti con armature esistenti e installati a distanza sufficiente dai bordi, con un valore elevato di copriferro, può essere opportuno impiegare altri principi di calcolo, che saranno illustrati di seguito.

6.4.1 Calcolo di ferri di armatura post-installati utilizzando il metodo di calcolo Hilti Rebar

Il metodo di calcolo dell’Eurocodice 2 [5]/ETA [15] presenta due principali svantaggi.

- La connessione di solette semplicemente appoggiate a pareti è possibile solo se queste ultime sono di spessore sufficiente ad accogliere la lunghezza di ancoraggio. Poiché non è possibile ridurre la lunghezza di ancoraggio con armature trasversali saldate o a uncino, nel caso delle armature post-installate, spesso accade che la parete sia troppo sottile. Tuttavia, se il

confinamento del calcestruzzo è sufficientemente ampio, è effettivamente possibile utilizzare tutta la resistenza di adesione della resina, anziché la resistenza di adesione indicata nell'Eurocodice 2 [5]. Il cosiddetto metodo di calcolo Hilti Rebar, o - per essere più precisi - il “calcolo del cedimento a frattura” consente di calcolare la resistenza completa della resina [7,8], come illustrato nella sezione 6.5.2.

- Secondo i principi del cemento armato tradizionale, le connessioni con nodi di telai momento resistenti richiedono l'impiego di ferri di connessione piegati. In considerazione di ciò, non possono quindi essere eseguiti con connessioni tramite ferri di ripresa post-installati diritti. Il modello a nodi di telaio consiste in un modello a tirante-puntone per progettare connessioni a nodi di telaio momento resistenti con ferri di connessione diritti [7,9], come illustrato nella sezione 6.5.4.

Tuttavia, perché nella maggior parte dei casi in cui i ferri di armatura post-installati si sovrappongono ad armature esistenti, il metodo di calcolo Hilti HIT Rebar non presenta alcun vantaggio?

Come illustrato nella sezione 1.3, in caso di giunzioni, il carico è trasferito da un ferro (gettato in opera) al ferro adiacente (post-installato) mediante puntone di compressione. Perciò il comportamento di sostegno del peso allo stato ultimo della giunzione è determinato dall'elemento più debole di questa interazione, ovvero il ferro gettato in opera. Anche se il ferro di ripresa post-installato giuntato avesse valori di resistenza di adesione infiniti, la giunzione cederebbe per sfilamento del ferro gettato in opera. Di conseguenza, l'impiego dei valori di resistenza di adesione relativi alla resina impiegata, come accade nel metodo di calcolo Hilti Rebar, è limitato dalla giunzione con il ferro gettato in opera, la cui esecuzione si attiene ai valori di resistenza di adesione dell'Eurocodice 2 [5].

Tuttavia, esiste un unico caso in cui il metodo di calcolo Hilti Rebar può rappresentare un vantaggio per la lunghezza complessiva di giunzione. Normalmente, l'estremità dei ferri di solette/travi è a uncino, quindi per il ferro gettato in opera il coefficiente di $\alpha_1 = 0,7$ e per il ferro post-installato $\alpha_1 = 1$. Ne consegue che la lunghezza del ferro di ancoraggio post-installato determina la lunghezza di ancoraggio complessiva della connessione. Utilizzando il metodo di calcolo Hilti Rebar, la lunghezza di ancoraggio del ferro di ripresa post-installato può essere ridotta fino a un valore pari alla lunghezza di ancoraggio del ferro gettato in opera.

6.4.2 Utilizzo del confinamento per incrementare l'efficienza di adesione (calcolo del cedimento a frattura Hilti)

Il coefficiente α_2 dell'Eurocodice 2 [5] tiene esplicitamente in considerazione la frattura e la fessurazione in funzione del copriferro relativo c_d/Φ (confinamento passivo).

I Benestare tecnici europei consigliano la stessa procedura per connessioni con ferri di ripresa post-installati. Il coefficiente α_2 – entro i propri limiti – causa una riduzione massima della lunghezza di ancoraggio di circa il 43%, se il copriferro ha spessore superiore a 3Φ . La riduzione della lunghezza del ferro di ancoraggio può essere interpretata anche sotto forma di un incremento della resistenza di adesione del 43% max ($\alpha_2 = 0,7$) dove $0,7 \leq \alpha_2 \leq 1,0$ come descritto nella sezione 5.1. Tale conversione può essere interpretata come segue:

finché α_2 supera il coefficiente di 0,7, la fessurazione del copriferro o la frattura tra i ferri di armatura determinano il modo di cedimento della connessione. Se α_2 è inferiore al coefficiente di 0,7, corrispondente a dimensioni del copriferro pari a $c_d/\Phi > 3$, il copriferro presenta uno spessore sufficiente a fare sì che la frattura non si verifichi più e prevalga lo sfilamento.

$$f_{bd} = f_{bd,EC2}/\alpha_2 \text{ con } 0,7 \leq \alpha_2 \leq 1,0 \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$f_{bd} = f_{bd,EC2}/(1,0 - 0,15 (c_d - \Phi)/\Phi) \quad (\text{N/mm}^2)$$

mentre per $c_d/\Phi = 1,0, \alpha_2 = 1,0$
 $c_d/\Phi = 2,0, \alpha_2 = 0,85$
 $c_d/\Phi = 3,0, \alpha_2 = 0,7$

Questo principio è adattato ed esteso ai ferri di ripresa post-installati mediante il principio di calcolo del software Hilti Rebar. Nell'equazione seguente viene aggiunto il pedice "Hilti" alle denominazioni delle equazioni per indicare che il calcolo è stato eseguito secondo il metodo del "calcolo del cedimento a frattura Hilti". La lunghezza di ancoraggio di base di progetto può essere calcolata come segue:

$$f_{bd,Hilti} = f_{bd,EC2}/\alpha_2 \quad (\text{N/mm}^2)$$

In caso di copriferro relativo pari a $1 \leq c_d/\Phi \leq 3$, prevale la "frattura" e la resistenza di adesione di progetto ottenuta dal "metodo di calcolo del cedimento a frattura Hilti" per ferri di ripresa post-installati diventa identica a quello per i ferri gettati in opera desunta dall'Eurocodice 2 [12], per mezzo della seguente equazione:

$$f_{bd,Hilti,1} = f_{bd,EC2}/\alpha_2 \quad (\text{N/mm}^2)$$

In caso di copriferro di spessore superiore all'intervallo indicato nell'Eurocodice 2 [5], ($c_d/\Phi > 3$ [solo ferro di ripresa post-installato con resina Hilti]), si utilizza un coefficiente adattato α_2' per creare un'estensione lineare della funzione di resistenza di adesione in relazione al valore della resistenza di adesione di base f_{bd} , mentre l'approccio lineare è stato desunto da numerose prove eseguite per descrivere l'incremento della resistenza di adesione in funzione del relativo copriferro. L'incremento della resistenza di adesione di progetto è limitato dalla sollecitazione di adesione a sfilamento massima $f_{bd,p}$, valore che si desume dal documento di omologazione del relativo ancorante. Quindi, il limite per il cedimento di adesione nel codice è stato sostituito dalla sollecitazione di adesione specifica del progetto relativa alla resina ancorante, per le condizioni specifiche dell'applicazione e in funzione della frattura, come segue:

$$f_{bd,Hilti,2} = f_{bd,EC2}/\alpha_2' \leq f_{bd,p} \quad (\text{N/mm}^2)$$

mentre

$$\alpha_2' = \frac{1}{\frac{1}{0.7} + \delta \cdot \frac{c_d - 3\phi}{\phi}} \geq 0.25$$

Dove:

δ = descrive l'incremento della resistenza di adesione di progetto, correlato al copriferro, tenendo in considerazione i diversi tipi di resina.

$f_{bd,p}$ = resistenza massima di adesione in caso di sfilamento, desunta dall'omologazione del relativo ancorante

0,25 = coefficiente per evitare valori irragionevolmente bassi di α_2'

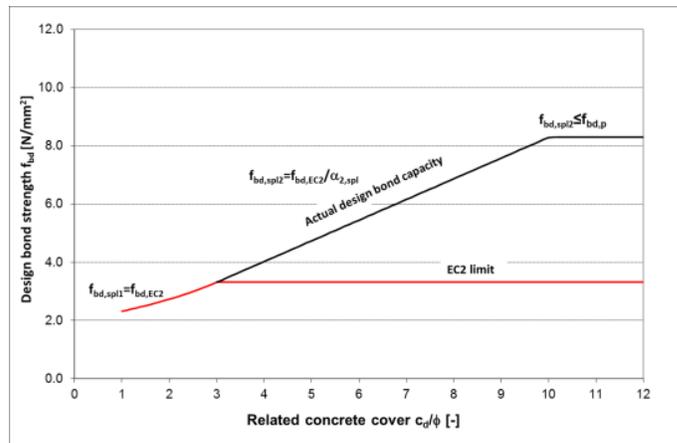


Figura 33 – Limite effettivo sulla sollecitazione di adesione di ferri di ripresa post-installati che utilizzano sistemi adesivi Hilti, rappresentato dalla “capacità di adesione di progetto effettiva” e dai valori della resistenza di adesione forniti dall’Eurocodice 2 [5]

La Figura 33 mostra una curva di resistenza di adesione di progetto tipica f_{bd} in funzione del relativo copriferro, mostrato per un calcestruzzo di classe C20/25 e per un ferro di ripresa con diametro non superiore a 32 mm.

In questa figura, le sollecitazioni di adesione di progetto secondo l’Eurocodice 2 [5] (linea rossa) e quelle risultanti dalla definizione precedente di α_2 e α_2' , sono tracciate in funzione del relativo copriferro (capacità di adesione di progetto effettiva). La resistenza di adesione di progetto è definita da una linea inclinata che aumenta con l’aumentare di c_d .

I seguenti esempi di calcolo sono basati sul principio di calcolo del software Hilti Rebar.

6.5 Esempi di calcolo

I seguenti esempi di calcolo sono forniti solo per scopo illustrativo. Sono illustrati sistemi di connessione basati sia sull'Eurocodice 2 che sul metodo di calcolo HIT Rebar.

6.5.1 Calcolo di sostegno terminale di una soletta semplicemente appoggiata secondo Eurocodice 2

Specifica:

Fornire un ferro di armatura post-installato per una soletta/trave nuova semplicemente appoggiata su una struttura in calcestruzzo come illustrato di seguito.

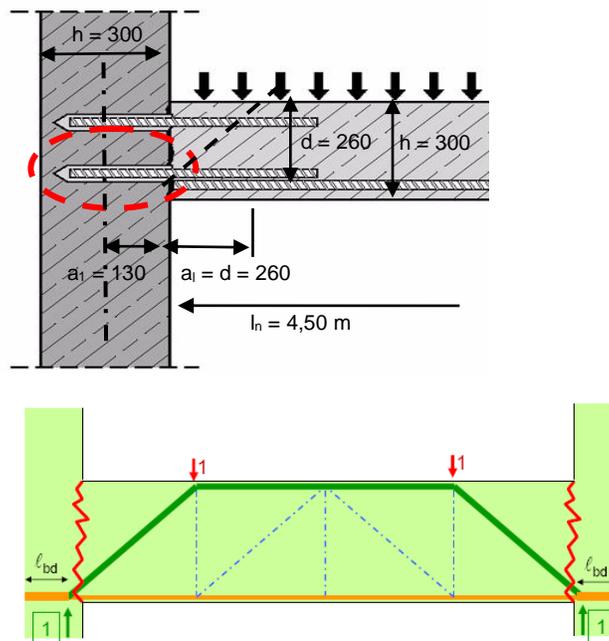


Figura 34 – Sezione trasversale della struttura

Struttura esistente: parete: $h = 300 \text{ mm}$

Nuova costruzione: soletta: $l_n = 4,50 \text{ m}$, $Q_k = 20 \text{ kN/m}^2$, $h = 300 \text{ mm}$, $d = 260 \text{ mm}$

Classe di resistenza del calcestruzzo: C20/25, calcestruzzo asciutto

Armatura: $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$, $\gamma_s = 1,15$

Carichi:

$$\begin{aligned} G_k &= 25 \text{ kN/m}^3 \cdot h &&= 7,5 \text{ kN/m}^2; \\ S_d &= (1,50 \cdot Q_k + 1,35 \cdot G_k) &&= 40,1 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Analisi strutturale (forze di progetto):

$$\begin{aligned} M_{Ed} &= S_d \cdot l_n^2 / 8 &&= 102 \text{ kNm/m} \\ V_{Ed} &= S_d \cdot l_n / 2 &&= 90,3 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Condizioni di installazione di progetto:

Metodo di perforazione:	trapano a rotopercolazione
Orientamento della connessione:	orizzontale/posizione della parete
Temperatura di installazione ed esercizio:	-5°C - +40°C
Tipo di materiale base:	calcestruzzo di peso normale
Condizioni del materiale base:	asciutto
Resina scelta sulla base delle condizioni:	HIT-RE 500 V3

Armatura inferiore richiesta a metà campata:

$$A_{s,rqd,m} = (M_{Ed} \cdot \gamma_s) / (0,9 \cdot d \cdot f_{yk}) = (102 \cdot 10^6 \cdot 1,15) / (0,9 \cdot 260 \cdot 500) = 1002 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Armatura fornita a metà campata:

$$\Phi 16, s = 200 \text{ mm} \rightarrow A_{s,prov,m} = 1005 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Armatura inferiore al supporto:

$$\text{Forza di trazione da ancorare: } F_E = |V_{Ed}| \cdot a / (0,9 d) = 90,3 \cdot 260 / (0,9 \cdot 260) = 100,3 \text{ kN/m}$$

{parag. 9.2.1.4(2), EC2: EN 1992-1-1:2004}

$$\text{Superficie dell'acciaio richiesta: } A_{s,rqd} = F_E \cdot \gamma_s / f_{yk} = 100 \cdot 10^3 \cdot 1,15 / 500 = 231 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Armatura minima da ancorare al supporto:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_s / \sigma_s = 0,4 \cdot 1 \cdot 2,2 \cdot 150 \cdot 1000 / 500 = 264 \text{ mm}^2/\text{m}$$

{parag. 7.3.2(2), EC2: EN 1992-1-1:2011}

$$A_{s,min} = 0,50 \cdot 998 = 499 \text{ mm}^2/\text{m}$$

{parag. 9.3.1.2(1), EC2: EN 1992-1-1:2011}

$$A_{s,min} = 0,25 \cdot 1005 = 251 \text{ mm}^2/\text{m}$$

{parag. 9.2.1.4(1), EC2: EN 1992-1-1:2011}

Decisivo è 499 mm²/m

⇒ armatura fornita: $\Phi 12, s = 200 \text{ mm} \Rightarrow A_{s,prov} = 565 \text{ mm}^2/\text{m}$;

Lunghezza di ancoraggio di base (richiesta)

{EC2: EN 1992-1-1:2004, par. 8.4.3}

$$l_{b,rqd} = (\Phi / 4) \times (\sigma_{sd} / f_{bd}) \quad [\text{mm}]$$

con: Φ = diametro del ferro di ripresa = 12 mm

σ_{sd} = sollecitazione di progetto calcolata per il ferro di ripresa

$$\begin{aligned} &= (A_{s,rqd} / A_{s,prov}) \cdot (f_{yk} / \gamma_s) \\ &= (231 / 565) \cdot (500 / 1,15) \\ &= 177 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

f_{bd} = valore di progetto della resistenza di adesione secondo ETA-16/0142

$$= 2,3 \text{ N/mm}^2 \text{ per C20/25}$$

$$l_{b,rqd} = (12 / 4) \times (177 / 2,3)$$

$$= 231 \text{ mm}$$

Lunghezza di ancoraggio di progetto

{EC2: EN 1992-1-1:2011, par. 8.4.4}

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

con:

α_1	= 1,0 per ferri dritti
α_2	= $1 - 0,15 (c_d - \emptyset) / \emptyset$ = 0,7 ($0,7 \leq \alpha_2 \leq 1,0$) con $c_d = (200-12)/2$ = 94 mm ($d_s = 12$ mm) mentre $c_d = \min (a/2, c_1, c)$
α_3	= 1,0 (senza armatura trasversale)
α_4	= 1,0 (senza armatura trasversale saldata)
α_5	= 1,0 (influenza della pressione trasversale trascurata)

$$l_{bd} = 0,7 \cdot 231 = 162 \text{ mm}$$

Lunghezza minima di ancoraggio:

{parag. 8.4.4(1), EC2: EN 1992-1-1:2011}:

$$l_{b,min} = \max \{0,3l_{b,rqd}; 10\Phi; 100 \text{ mm}\}$$
$$= 120 \text{ mm} \leq l_{bd}$$

l_{bd} prevale \rightarrow lunghezza di ancoraggio l_{bd} è pari alla lunghezza del foro $l_{inst} = 162$ mm.

N.B. Il valore della lunghezza del foro può essere diverso dalla lunghezza di ancoraggio; si veda ad esempio la "giunzione".

Metodo di perforazione alternativo e relativo effetto:

Metodo di perforazione: carotaggio a diamante a umido

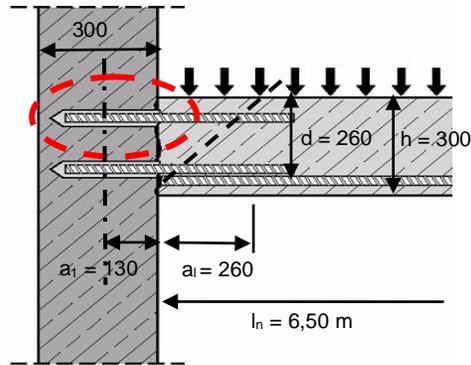
Installazione mediante carotaggio a diamante a umido: la resina idonea è Hilti HIT-RE 500 (vedere caratteristiche tecniche); tuttavia, se si utilizza il carotaggio a diamante a umido, la lunghezza minima di ancoraggio secondo l'Eurocodice 2 deve essere moltiplicata per 1,5 (ETA 09-0295, par. 4.3.3).

$$l_{b,min} = \max \{0,3l_{b,rqd}; 10\Phi; 100 \text{ mm}\} \cdot 1,5$$
$$= 180 \text{ mm} > l_{bd}$$

$l_{b,min}$ prevale \rightarrow lunghezza di ancoraggio l_{bd} è $l_{inst} = 180$ mm in fori a corona diamantata

Si noti che, se si utilizza l'attrezzo di irruvidimento, non si applica il coefficiente di amplificazione.

Armatura superiore al supporto:



Armatura minima:

{parag. 9.3.1.2(2), EC2: EN 1992-1-1:2004}

25% dell'acciaio inferiore richiesto a metà campata:

$$A_{s,req} = 0,25 \cdot 998 \\ = 247 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Requisito per limite di fessurazione:

{parag. 7.3.2(2), EC2: EN 1992-1-1:2004}

$$A_{s,min} = 0,4 \cdot 1 \cdot 2,2 \cdot 150 \cdot 1000 / 435 \\ = \underline{303 \text{ mm}^2/\text{m}} \text{ (decisivo)}$$

⇒ armatura fornita: $\Phi 10$, $s = 200 \text{ mm}$; $A_{s,prov} = 393 \text{ mm}^2/\text{m}$

Sollecitazione di progetto dell'acciaio nel ferro:

$$\sigma_{sd} = f_{yd} \cdot A_{s,min} / A_{s,prov} \\ = 335 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{b,rqd} = (\Phi / 4) \times (\sigma_{sd} / f_{bd}) \\ = (10 / 4) \cdot (335 / 2,3) \\ = 364 \text{ mm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \\ = 1 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 364 = 255 \text{ mm}$$

$$l_{b,min} = \max \{0,3l_{b,rqd}; 10\Phi; 100 \text{ mm}\} \\ = 110 \text{ mm}$$

Di conseguenza, la lunghezza del foro $l_v = l_{bd} = \mathbf{255 \text{ mm}}$

Metodo di perforazione alternativo e relativo effetto:

Metodo di perforazione: carotaggio a diamante a umido

Installazione mediante carotaggio a diamante a umido: la resina idonea è Hilti HIT-RE 500 V3 (vedere caratteristiche tecniche); tuttavia, se si utilizza il carotaggio a diamante a umido, la lunghezza minima di ancoraggio secondo l'Eurocodice 2 deve essere moltiplicata per 1,5, se non si utilizza lo strumento di irruvidimento.

$$l_{b,min} = \max \{0,3l_{b,rqd}; 10\Phi; 100 \text{ mm}\} \cdot 1,5$$

$$= 180 \text{ mm} \leq l_{bd}$$

l_{bd} prevale \rightarrow lunghezza di ancoraggio l_{bd} è $l_{inst} = 255 \text{ mm}$ anche in fori a corona diamantata

Metodo di perforazione	Condizioni del foro	$l_{bd, lower}$	$l_{bd, upper}$	$c_{min}^{(3)}$, vedere sez. 3.3
Carotaggio a diamante	umido	180 mm	255mm	34 mm/35 mm
Trapano a percussione	umido/asciutto	162mm	255mm	40mm/45mm

Secondo l'Eurocodice 2, il trasferimento dello sforzo di taglio all'interfaccia tra il calcestruzzo esistente e quello nuovo deve avvenire mediante attrito.

Specifica: fornire ferri di ripresa post-installati di diametro, interasse e lunghezza di ancoraggio conformi alle specifiche progettuali.

Sistema di ancoraggio: resina epossidica Hilti HIT RE-500 V3, installata conformemente all'intervallo di temperatura del calcestruzzo definito nelle Istruzioni scritte del fabbricante (MPII): tra $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ e $+40 \text{ }^\circ\text{C}$, calcestruzzo asciutto o umido durante l'installazione.

Il foro deve essere eseguito con trapano a rotoperussione e punta in carburo o corona diamantata. Individuare l'armatura esistente prima della perforazione: non è consentito danneggiare l'armatura senza la previa autorizzazione del responsabile della progettazione e coordinazione lavori.

Trasferimento dello sforzo di taglio all'interfaccia:

$$V_{Ed} = 90,3 \text{ kN/m}$$

$$V_{edi} = 90,3 / b_i = 90,3 / 0,3 = 301 \text{ kN/m}^2$$

$$c = 0,45$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 20^{2/3} = 2,21 \text{ N/mm}^2 \text{ (EN 1992-1-1:2004 [Tabella 3.1])}$$

$$f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,7 \cdot 2,21 \text{ N/mm}^2 = 1,55 \text{ N/mm}^2 \text{ (EN 1992-1-1:2004 [Tabella 3.1])}$$

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0,05} / \gamma_C = 1 \cdot 1,55 / 1,5 = 1,03 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{Rdi,c} = c \cdot f_{ctd} = 0,45 \cdot 1 \cdot 10^3 = 450 \text{ kN/m}^2$$

$$v = 0,6 \cdot (1 - f_{ck} / 250) = 0,6 \cdot (1 - 20 / 250) = 0,55 \text{ (EN 1992-1-1:2004 [6.2.2])}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_C = 1 \cdot 20 / 1,5 = 13,33 \text{ N/mm}^2 \text{ (EN 1992-1-1:2004 [3.1.6])}$$

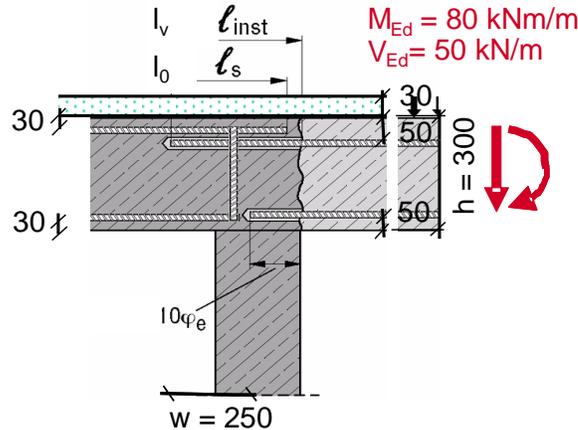
$$V_{Rdi,max} = 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} = 0,5 \cdot 0,55 \cdot 13,33 \cdot 1000 = 3670 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{Rdi} = \min(V_{Rdi,max}; V_{Rdi,c}) = \min(400; 3670) = 400 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{Rdi} \leq V_{edi}$$

6.5.2 Calcolo della giunzione su supporto secondo Eurocodice 2

Specifica: fornire un ferro di armatura post-installato per il nuovo ampliamento di un balcone su una struttura in calcestruzzo esistente come indicato di seguito.



Azioni: $M_{Ed}=80 \text{ kNm/m}$; taglio: $V_{Ed} = 50 \text{ kN/m}$
 Classe di resistenza del calcestruzzo: C25/30
 Armatura: $f_{yk}= 500 \text{ N/mm}^2$
 Soletta: copriferro dei ferri gettati in opera $c_c = 30 \text{ mm}$
 (superiore, inferiore) copriferro dei nuovi ferri: $c_n = 50 \text{ mm}$ $h = 300 \text{ mm}$;
 Armatura superiore (nuova ed esistente):
 $\Phi 16$, $s = 200 \text{ mm} \rightarrow A_{s,prov} = 1005 \text{ mm}^2/\text{m}$; copriferro di interfaccia con $c_1 = 30 \text{ mm}$
 Armatura inferiore:
 $\Phi 10$, $s = 200 \text{ mm} \rightarrow A_{s,prov} = 393 \text{ mm}^2/\text{m}$

Condizioni di installazione di progetto:

Metodo di perforazione:	trapano a rotopercolazione
Orientamento della connessione:	orizzontale/posizione della parete
Temperatura di installazione ed esercizio:	-5°C
Tipo di materiale base:	calcestruzzo di peso normale
Condizioni del materiale base:	asciutto
Resina scelta sulla base delle condizioni:	HIT-RE 500 V3

Armatura gettata in opera (c_i) superiore

$$l_{0,ci} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,rqd,ci} \geq l_{0,min}$$

$$\eta_1 = (d-\Phi/2 > 250 \text{ mm}) \quad 0,7 \text{ cattive condizioni di legame}$$

$$z_{ci} = 239 \quad \text{mm} \quad (\text{dal calcolo statico})$$

$$A_{s,req} = (M_{Ed}/z) \cdot (\sigma_s/f_{yk}) = (80 / 0,239) \cdot (1,15 / 0,5)$$

$$= 770 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\sigma_{sd} = (A_{s,rqd} / A_{s,prov}) \cdot (f_{yk}/\gamma_s) = (770 / 1005) \cdot (500 / 1,15)$$

$$= 333 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned}
 f_{bd} &= 2,25 \cdot \eta_1 \cdot 0,7 \cdot 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} / \gamma_c \\
 &= 2,25 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,3 \cdot 25^{2/3} / 1,5 \\
 &= 1,89 \text{ N/mm}^2 \qquad \qquad \qquad (\text{ETA 16/0142})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{b,rd,ci} &= (\Phi / 4) \cdot (\sigma_{sd} / f_{bd}) \\
 &= (16 / 4) \cdot (333 / 1,89) \\
 &= 705 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$\alpha_1 = 0,7$ (estremità a uncino dei ferri gettati in opera)

$$\begin{aligned}
 \alpha_2 &= (1 - 0,15 (c_d - \emptyset) / \emptyset \geq 0,7) \\
 &= 1 - 0,15 (30-16) / 16 \\
 &= 0,87
 \end{aligned}$$

$\alpha_3 = 1,0$ (senza armatura trasversale)

$\alpha_5 = 1,0$ (senza pressione trasversale)

$\alpha_6 = 1,5$ (coefficiente di giunzione)

$$\begin{aligned}
 l_{0,min} &= \max\{0,3 \cdot 1,5 \cdot 705; 15 \cdot 16; 200\} \\
 &= 317 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{0,ci} &= 0,70 \cdot 0,87 \cdot 1,5 \cdot 705 \\
 &= 643 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Armatura post-installata (ρ_i) superiore

La lunghezza di sovrapposizione di progetto richiesta l_0 sarà determinata in conformità a EC2: EN 1992-1-1:2004, par. 8.7.3:

$$l_{0,pi} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,rd,pi} \geq l_{0,min}$$

$$d = h - c_n - \Phi / 2 = 300 - 50 - 16 / 2 = 242 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 \eta_1 &= (d - \Phi / 2 < 250 \text{ mm}) \quad 1,0 \text{ (buone condizioni di legame)} \\
 z &= 228 \text{ mm (dai calcoli statici)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s,req} &= (M_{Ed} / z) \cdot (\sigma_s / f_{yk}) \\
 &= (80 / 0,228) \cdot (1,15 / 0,5) \\
 &= 807 \text{ mm}^2/\text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{sd} &= (A_{s,rd} / A_{s,prov}) \cdot (f_{yk} / \gamma_s) = (807 / 1005) \cdot (500 / 1,15) \\
 &= 349 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{bd} &= \text{valore di progetto della resistenza di adesione secondo ETA-16/0142} \\
 &= 2,7 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

$$l_{b,rd,pi} = (\Phi / 4) \cdot (\sigma_{sd} / f_{bd}) = (16 / 4) \cdot (349 / 2,7) = 516 \text{ mm}$$

$\alpha_1 = 1,0$ (ferri diritti)

$$\begin{aligned}
 \alpha_2 &= (1 - 0,15 (c_d - \emptyset) / \emptyset \geq 0,7) \\
 &= 1 - 0,15 (50-16) / 16 \\
 &= 0,7
 \end{aligned}$$

$\alpha_3 = 1,0$ (senza armatura trasversale)

$\alpha_5 = 1,0$ (senza pressione trasversale)

$\alpha_6 = 1,5$ (coefficiente di giunzione)

$$l_{0,min} = \max\{0,3 \cdot 1,5 \cdot 515; 15 \cdot 16; 200\} = 240 \text{ mm}$$

$$l_{0,pi} = 0,7 \cdot 1,5 \cdot 530 = 542 \text{ mm}$$

Profondità di posa per ferri di ripresa post-installati superiori:

Distanza libera tra ferri sovrapposti:

$$e = [(s/2)^2 + (c_n - c_c)^2]^{0.5} - \Phi = [100^2 + (50-30)^2]^{0.5} - 16 = 86 \text{ mm} \quad \text{interasse libero tra ferri giuntati}$$

Incremento della lunghezza di sovrapposizione a causa della distanza libera:

$$l_0 = e - 4\Phi = 86 - 4 \cdot 16 = 22 \text{ mm}$$

$$l_0 = \max(l_{0,pi} ; l_{0,pi,fi} ; l_{0,ci} ; l_{0,min}) + \Delta l_0$$

Dove:

$l_{0,pi}$ = lunghezza di sovrapposizione di progetto del ferro di ripresa post-installato = 542 mm

$l_{0,pi,fi}$ = lunghezza di sovrapposizione di progetto del ferro di ripresa post-installato in condizioni di incendio = non richiesto

$l_{0,ci}$ = lunghezza di sovrapposizione di progetto del ferro gettato in opera = 643 mm

$$l_{0,min} = \text{lunghezza minima di sovrapposizione} = 317 \text{ mm} \\ = 643 + 22 \\ = 665 \text{ mm}$$

$$c_f = 30 \text{ mm}$$

$$w/2 = 125 \text{ mm}$$

Lunghezza di perforazione

$$l_{inst} = l_0 + \max(w/2; c_f) \\ = 665 + 125 \\ = 790 \text{ mm}$$

Profondità di posa per ferri di ripresa post-installati inferiori:

Calcestruzzo compresso, nessuna forza sui ferri di armatura → ancoraggio con lunghezza di posa minima.

$$f_{min} = 1,0 \quad (\text{ETA 08/0105}) \\ l_{b,min} = f_{min} \cdot \max(10\Phi; 100 \text{ mm}) \\ = 1,0 \cdot \max(10 \cdot 10; 100) \\ = 100 \text{ mm}$$

$$w/2 = 125 \text{ mm}$$

$$l_{inst} = l_{b,min} + w/2 = 100 + 125 = 225 \text{ mm}$$

Metodo di perforazione	Condizioni del foro	$l_{0,top}$ rispettivamente $l_{drill,top}$	$l_{0,bottom}$ rispettivamente $l_{drill,bottom}$	c_{min} , vedere sez. 3.3
Carotaggio a diamante	umido	790 mm	225 mm	82 mm/44 mm
Trapano a percussione	Umido/asciutto	790 mm	225 mm	48 mm/35 mm

Specifica: fornire ferri di ripresa post-installati di diametro, interasse e ancoraggio conformi alle specifiche progettuali.

Sistema di ancoraggio: resina epossidica Hilti HIT-RE 500 V3, installata conformemente all'intervallo di temperatura del calcestruzzo definito nelle Istruzioni scritte del fabbricante (MPII): tra -5 °C e +40 °C, calcestruzzo asciutto o umido durante l'installazione.

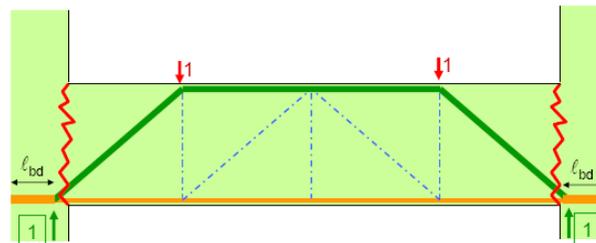
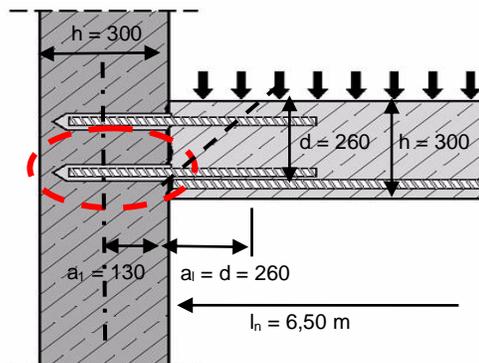
Il foro deve essere eseguito con trapano a rotopercolazione e punta in carburo o corona diamantata. Individuare l'armatura esistente prima della perforazione: non è consentito danneggiare l'armatura senza la previa autorizzazione del responsabile della progettazione e coordinazione lavori.

6.5.3 Calcolo di supporto terminale di una soletta semplicemente appoggiata secondo il metodo HIT Rebar

Specifica:

fornire un ferro di armatura post-installato per una soletta/trave nuova su una struttura in calcestruzzo come illustrato di seguito, **utilizzando il principio di calcolo Hilti Rebar**.

a) estremità di supporto della soletta, semplicemente appoggiata



Soletta: $l_n = 4,50\text{m}$, $Q_k = 20\text{ kN/m}^2$, $h = 300\text{ mm}$, $d = 260\text{ mm}$

Parete: $h = 300\text{ mm}$

Classe di resistenza del calcestruzzo: C20/25, calcestruzzo asciutto

Armatura: $f_{yk} = 500\text{ N/mm}^2$, $\gamma_s = 1,15$

Carichi:

$$G_k = 25\text{ kN/m}^3 \cdot h = 7,5\text{ kN/m}^2;$$

$$S_d = (1,50 \cdot Q_k + 1,35 \cdot G_k) = 40,1\text{ kN/m}^2$$

Analisi strutturale (forze di progetto):

$$M_{Ed} = S_d \cdot l_n^2 / 8 = 102 \text{ kNm/m}$$

$$V_{Ed} = S_d \cdot l_n / 2 = 90,3 \text{ kN/m}$$

Armatura inferiore richiesta a metà campata:

$$A_{s,rqd,m} = (M_{Ed} \cdot \gamma_s) / (0,9 \cdot d \cdot f_{yk}) = 998 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Armatura fornita a metà campata: $\varnothing 16$, $s = 200 \text{ mm}$

$$A_{s,prov,m} = 1005 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Armatura inferiore al supporto:

$$\text{Forza di trazione da ancorare: } F_{Ed} = |V_{Ed}| \cdot a / (0,9d) = 100 \text{ kN/m}$$

{parag. 9.2.1.4(2), EC2: EN 1992-1-1:2004}

$$\text{Superficie dell'acciaio richiesta: } A_{s,rqd} = F_{Ed} \cdot \gamma_s / f_{yk} = 231 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Armatura minima da ancorare al supporto:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_s / \sigma_s = 0,4 \cdot 1 \cdot 2,2 \cdot 150 \cdot 1000 / 500 = 264 \text{ mm}^2/\text{m}$$

{parag. 7.3.2(2), EC2: EN 1992-1-1:2011}

$$A_{s,min} = 0,5 \cdot A_{s,rqd,m} = 0,50 \cdot 988 = 499 \text{ mm}^2/\text{m}$$

{parag. 9.3.1.2(1), EC2: EN 1992-1-1:2011}

$$A_{s,min} = 0,25 \cdot A_{s,prov,m} = 0,25 \cdot 1010 = 251 \text{ mm}^2/\text{m}$$

{parag. 9.2.1.4(1), EC2: EN 1992-1-1:2011}

Decisivo è $499 \text{ mm}^2/\text{m} \Rightarrow$ armatura fornita: $\varnothing 12$, $s = 200 \text{ mm} \Rightarrow A_{s,prov} = 565 \text{ mm}^2/\text{m}$;

Installazione mediante trapano a percussione; Hilti HIT-RE 500 V3

Lunghezza minima di ancoraggio

$$\sigma_{sd} = (A_{s,rqd} / A_{s,prov}) \cdot (f_{yk} / \gamma_s) = (23/565) \cdot (500/1,15) = 177 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{bd,EC2} = 2,3 \text{ N/mm}^2$$

(ETA-16/0142)

$$l_{b,rqd} = (\Phi / 4) \times (\sigma_{sd} / f_{bd}) = (12 / 4) \times (177 / 2,3) = 231 \text{ mm}$$

$$l_{b,min} = \max \{0,3 l_{b,rqd}; 10\Phi; 100 \text{ mm}\} = 120 \text{ mm}$$

{parag. 8.4.4(1), EC2: EN 1992-1-1:2011}

Lunghezza di sviluppo:

$$\text{Spessore copriferro: } c_d = (s - \Phi) / 2 = 94 \text{ mm}$$

$$\text{Confinamento } c_d / \Phi = 94 / 12 = 7,8$$

Resistenza alla separazione dell'incollaggio per $c_d/\phi > 3$:

$$\alpha_2' = \frac{1}{\frac{1}{0.7} + \delta \cdot \frac{c_d - 3\phi}{\phi}} = \frac{1}{\frac{1}{0.7} + 0.306 \cdot \frac{94 - 3 \cdot 12}{12}} = 0.344$$

$$f_{bd,spl,2} = \frac{f_{bd,EC2}}{\max(\alpha_2'; 0.25)} = \frac{2.3}{0.344} = 6.7 \text{ N/mm}^2$$

Resistenza allo sfilamento dell'incollaggio: $f_{bd,p} = 9,3 \text{ N/mm}^2$ (ETA-16/0143)

Resistenza di adesione di progetto applicabile: $f_{bd} = \min(f_{bd,spl}; f_{bd,p}) = 6,7 \text{ N/mm}^2$

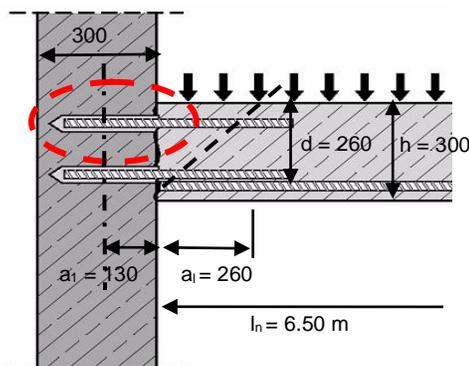
Lunghezza di sviluppo di progetto: $\ell_{bd} = (\Phi/4) \cdot (\sigma_{sd}/f_{bd}) = 80 \text{ mm}$

Prevale la lunghezza minima \rightarrow lunghezza foro $l_{inst} = 120 \text{ mm}$

N.B. Usando il metodo di calcolo Hilti, la lunghezza minima di ancoraggio prevale, con $l_{b,min} = 120 \text{ mm} = l_{inst}$. Nell'esempio dello stesso progetto, seguendo le disposizioni dell'Eurocodice 2, prevaleva la lunghezza di ancoraggio di progetto, con $l_{bd} = 162 \text{ mm} = l_{inst}$.

Usando il metodo di calcolo Hilti, la lunghezza di ancoraggio è ridotta del 26% circa.

Armatura superiore al supporto:



Armatura minima:

- a) 25% dell'acciaio nella regione inferiore richiesto a metà campata {parag. 9.3.1.2(2), EC2: EN 1992-1-1:2004}:
 $A_{s,req} = 0,25 \cdot 988 = 247 \text{ mm}^2/\text{m}$

- b) requisito per limite di fessurazione {par. 7.3.2(2), EC2: EN 1992-1-1:2004}:
 $A_{s,min} = 0,4 \cdot 1 \cdot 2,2 \cdot 150 \cdot 1000 / 435 = 303 \text{ mm}^2/\text{m}$

Decisivo è $303 \text{ mm}^2/\text{m}$

\Rightarrow armatura fornita: $\varnothing 10$, $s = 200 \text{ mm}$; $A_{s,prov} = 393 \text{ mm}^2/\text{m}$

Sollecitazione di progetto nel ferro: $\sigma_{sd} = f_{yd} \cdot A_{s,min} / A_{s,prov} = 335 \text{ N/mm}^2$

Lunghezza minima di ancoraggio

$$\begin{aligned}\sigma_{sd} &= (A_{s,rqd} / A_{s,prov}) \cdot (f_{yk} / \gamma_s) = (23/565) \cdot (500/1,15) = 335 \text{ N/mm}^2 \\ f_{bd,EC2} &= 2,3 \text{ N/mm}^2 \text{ (ETA-16/0142)} \\ l_{b,rqd} &= (\Phi / 4) \times (\sigma_{sd} / f_{bd}) = (10 / 4) \times (335 / 2,3) = 364 \text{ mm} \\ l_{b,min} &= \max \{0,3 l_{b,rqd}; 10\Phi; 100 \text{ mm}\} = 110 \text{ mm} \\ &\{\text{parag. 8.4.4(1), EC2: EN 1992-1-1:2011}\}\end{aligned}$$

Lunghezza di sviluppo:

$$\begin{aligned}\text{Spessore copriferro: } c_d &= (s - \Phi) / 2 = 95 \text{ mm} \\ \text{Confinamento } c_d / \Phi &= 95 / 10 = 9,5\end{aligned}$$

Resistenza alla separazione dell'incollaggio per $c_d / \Phi > 3$:

$$\begin{aligned}\alpha_2' &= \frac{1}{\frac{1}{0,7} + \delta \cdot \frac{c_d - 3\phi}{\phi}} = \frac{1}{\frac{1}{0,7} + 0,306 \cdot \frac{95 - 3 \cdot 10}{10}} = 0,293 \\ f_{bd,spl,2} &= \frac{f_{bd,EC2}}{\max(\alpha_2'; 0,25)} = \frac{2,3}{0,293} = 7,9 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Resistenza allo sfilamento dell'incollaggio: $f_{bd,p} = 9,3 \text{ N/mm}^2$ (ETA-16/0143)

Resistenza di adesione di progetto applicabile: $f_{bd} = \min(f_{bd,spl}; f_{bd,p}) = 7,9 \text{ N/mm}^2$

Lunghezza di sviluppo di progetto: $l_{bd} = (\Phi/4) \cdot (\sigma_{sd}/f_{bd}) = 97 \text{ mm}$

Prevale la lunghezza minima → lunghezza foro $l_{ef} = 110 \text{ mm}$

Quindi, la lunghezza del foro $l_{ef} = 110 \text{ mm}$

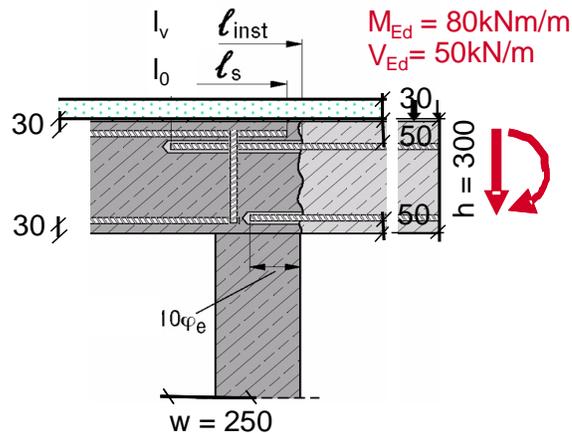
N.B.

Usando il metodo di calcolo Hilti, la lunghezza minima di ancoraggio prevale, con $l_{b,min} = 110 \text{ mm} = l_{inst}$. Nell'esempio dello stesso progetto, seguendo le disposizioni dell'Eurocodice 2, prevaleva la lunghezza di ancoraggio di progetto, con $l_{bd} = 255 \text{ mm} = l_{inst}$.

Usando il metodo di calcolo Hilti, la lunghezza di ancoraggio è ridotta del 57% circa.

6.5.4 Calcolo della giunzione su supporto secondo il metodo di calcolo HIT Rebar

Specifica: fornire un ferro di armatura post-installato per il nuovo ampliamento di un balcone su una struttura in calcestruzzo come indicato di seguito, **utilizzando il principio di calcolo Hilti Rebar**.



Come descritto nella sezione 6.3.1, il metodo di calcolo Hilti Rebar non presenta vantaggi in caso di sovrapposizione. Di conseguenza, questo metodo di calcolo darà come risultato la stessa lunghezza di ancoraggio del metodo dell'Eurocodice 2.

6.6 Modelli tirante-puntone

L'Eurocodice 2 [5] fornisce le procedure per lo sviluppo di modelli a tirante e puntone per progettare strutture o elementi in cemento armato. Questo approccio è particolarmente indicato per progettare connessioni di sistemi mediante *ferri di ripresa post-installati*. La struttura viene suddivisa in regioni B e D. Le regioni B sono parti della struttura in cui si applica l'ipotesi di Bernoulli sui profili di deformazione lineare. Lo stato di sollecitazione interna delle regioni B è facilmente deducibile dalle forze agenti sulla sezione e la regione può essere calcolata sulla base della teoria classica della trave.

Le regioni D sono le parti di una struttura che presentano una variazione complessa delle deformazioni. Comprendono porzioni vicine a variazioni improvvise in geometria (discontinuità geometriche) o forze concentrate (discontinuità statistiche). Si presuppone che le regioni D si estendano per una distanza h (altezza dell'elemento) dalla forza applicata o dalla discontinuità geometrica (vedere Figura 35).

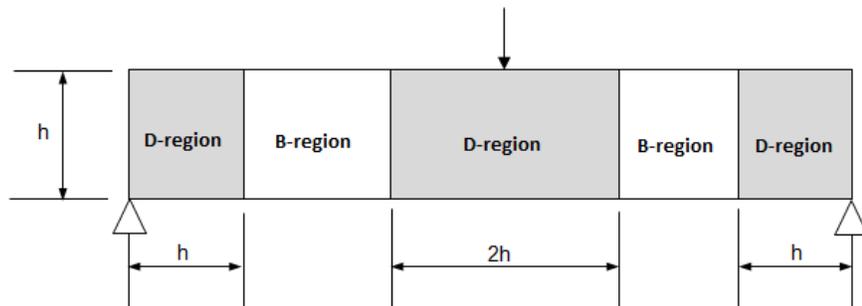


Figura 35 – Regioni D e B schematizzate in una trave di calcestruzzo

Il calcolo delle regioni D è complesso e richiede una chiara comprensione del flusso di forze. Nel modello tirante-puntone, lo stato complesso di forze interne è schematizzato in una travatura reticolare. Gli elementi di compressione (puntone) e trazione (tiranti) della regione sono determinati dall'utilizzatore. L'armatura è collocata in zone di trazione determinate, mentre la resistenza di compressione insiste sui puntone. Il modello tirante-puntone, scelto tra tutti i modelli possibili, deve generare deformazioni plastiche minime e una disposizione dell'armatura economica. I punti di equilibrio, in cui si intersecano puntone, tiranti e le relative forze concentrate, prendono il nome di nodi (Figura 36).

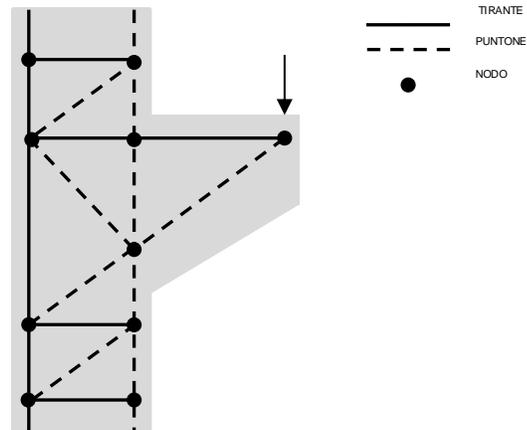


Figura 36 – Modello tirante-puntone di una mensola

I nodi sono a loro volta classificati in base al senso e orientamento delle intersezioni tra tiranti e puntone (Figura 37). Il modello tirante-puntone è ampiamente illustrato nell'Eurocodice 2, capitolo 6.5.

Molti dei problemi osservabili nei *ferri di ripresa post-installati* possono essere descritti con varianti di un nodo CCT (compressione-compressione-trazione), come illustrato nella [Error! Reference source not found.](#)

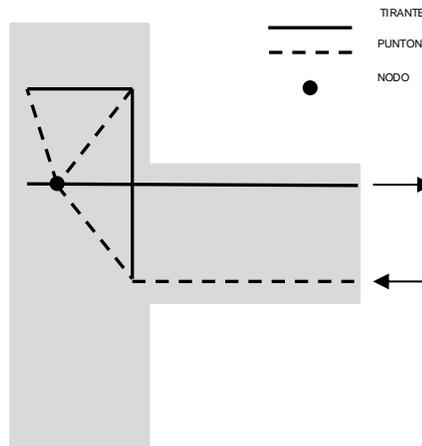


Figura 37 – Modello tirante-puntone per una connessione con *ferri di ripresa post-installati*

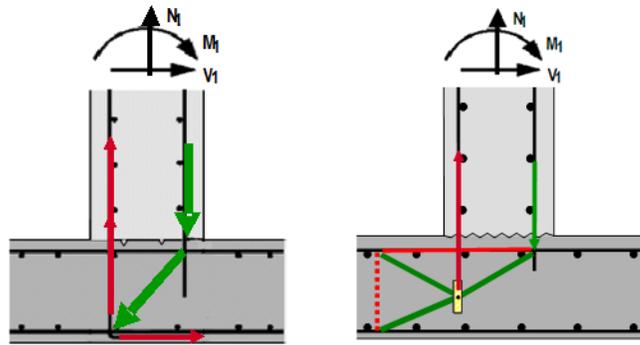
NOTA. Una descrizione dettagliata del modello tirante-puntone di una connessione con *ferri di ripresa post-installati* in una giunzione pilastro-fondazione soggetta a momento di rovesciamento è reperibile in Kupfer, *et al.* [9]. Ulteriori verifiche sperimentali di questa connessione sono fornite in Hamad, B., *et al.*, "Evaluation of Bond Strength of Bonded-In or Post-Installed Reinforcement," ACI Structural Journal V. 103, No. 2, pp. 207-218 [7].

6.7 Modello tirante-puntone per nodi di telai (concetto dei nodi di telai Hilti)

Laddove i nodi di telai (o le connessioni momento resistenti in generale) sono calcolati con armature gettate in opera, sono necessari generalmente ferri piegati, come disposto dalle norme per il calcolo del cemento armato.

L'ancoraggio di armature di connessioni momento resistenti mediante ferri dritti causerebbe, perlomeno a una prima indagine, una trazione a carico del calcestruzzo, con possibile cedimento dello stesso per frattura conica. Poiché questa modalità di cedimento è di natura fragile, tale ancoraggio non è coerente con i principi alla base delle norme sui calcoli del cemento armato nazionali.

In collaborazione con il Politecnico di Monaco, Hilti ha condotto un programma di ricerca per elaborare un modello tirante-puntone per nodi di telai con ferri di connessione dritti [7, 9]. La differenza principale rispetto alla soluzione gettata in opera standard è che il puntone di compressione è ancorato nell'area di adesione del ferro dritto (Figura 38b), anziché nella porzione piegata del ferro (Figura 38a): ciò causa una riduzione del braccio di leva interno z_{1R} (Figura 40b) all'interno del nodo e un incremento delle forze di frattura nella zona di transizione tra la regione D e la regione B (Figura 38b). Questa differenza sarà meglio illustrata successivamente.



a) b)
 Figura 38 – Modello tirante-puntone per una connessione momento resistente con ferro piegato (a) e con ferri di armatura post-installati con estremità diritta (rosso = tirante, verde = puntone)

Equilibrio globale del nodo

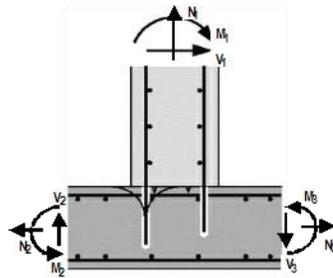
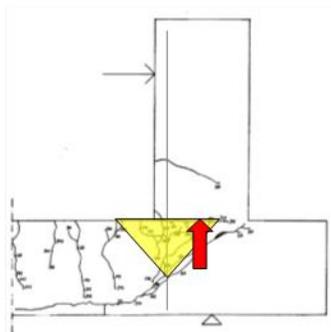


Figura 39 – Equilibrio globale del nodo in una connessione con ferri di ripresa post-installati con estremità diritta

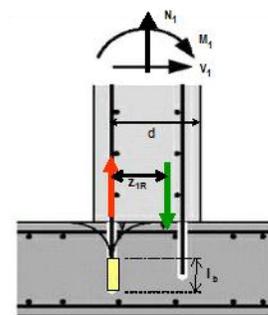
Al fine di verificare i tiranti e puntone nel nodo, è necessario definire N_2 , V_2 , M_2 , N_3 , V_3 , M_3 alle altre estremità del nodo (Figura 39). Normalmente, questi valori risultano dall'analisi strutturale all'esterno della regione del nodo e sono determinati dal progettista responsabile.

Trazione nei ferri di connessione

Il carico applicato alla parete (Figura 40b) genera una forza di trazione sull'armatura sul lato sinistro (freccia rossa) e una forza di compressione sul lato destro (freccia verde). Verifiche iniziali e indagini numeriche [7, 9] hanno condotto alla considerazione seguente: le forze di compressione del ferro diritto sottoposto a trazione a causa dell'adesione tendono a orientarsi contro l'interfaccia con la parete, come indicato dallo schema di fessurazione che si crea al carico ultimo (Figura 40a). Di conseguenza, la sollecitazione compressiva non è concentrata all'esterno della parete, ma è distribuita su un'ampia regione dell'interfaccia, diminuendo quindi il braccio di leva interno nella sezione della parete (Z_{1R}). Il coefficiente di riduzione consigliato per il braccio di leva interno è 0,85 per i momenti di apertura e 1,0 per i momenti di chiusura.



a) Schema di fessurazione risultante dalle prove, che indica una concentrazione delle forze di compressione a partire da carichi concentrati sul lato sinistro



b) Braccio di leva interno ridotto Z_{1R} , basato sullo schema di fessurazione (fig. 43a) e su indagini numeriche [7, 9]

Figura 40 – Schema di fessurazione e ridotto braccio di leva interno con connessioni con ferri di ripresa post-installati con estremità diritta (rosso = tirante, verde = puntone)

Lunghezza di ancoraggio

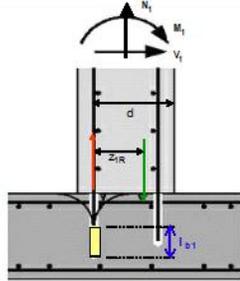


Figura 41 – Definizione della lunghezza di ancoraggio l_b

Se l'equilibrio all'interno di nodi di telaio con ferri a uncino gettati in opera può essere modificato mediante il puntone di compressione che prosegue dalla forza di compressione verticale ed è ancorato nella curva a livello dell'armatura inferiore (Figura 38a), le barre diritte sono ancorate mediante sollecitazioni di adesione a un livello superiore rispetto all'armatura inferiore.

Poiché si prevede che si verifichino delle fessure da piegatura all'estremità caricata dei ferri di armatura sottoposti a trazione, la zona di ancoraggio si sviluppa dall'estremità inferiore del ferro e la sua lunghezza l_b è la lunghezza richiesta per sviluppare la sollecitazione a carico

dell'acciaio, ma generata dalle sollecitazioni sulla sezione M_1 , N_1 e V_1 .

$$l_b = \frac{\sigma_{sd} \cdot \Phi}{4 \cdot f_{bd}} \text{ [mm]}$$

dove σ_{sd} è la sollecitazione di progetto dell'acciaio nei ferri di connessione [N/mm²]

Φ è il diametro del ferro verticale [mm]

f_{bd} è la resistenza di adesione di progetto del ferro gettato in opera oppure della resina adesiva [N/mm²]

Lunghezza di installazione

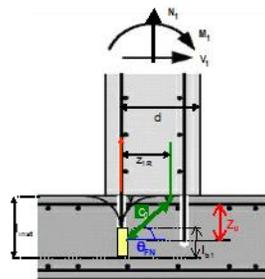


Figura 42 – Definizione dell'angolo del puntone θ_{FN}

Sulla base delle conoscenze attuali, l'angolo del puntone θ_{FN} del modello tirante-puntone deve avere un angolo, creato dal puntone di compressione inclinato C_0 , compreso tra 30° e 60°.

Per lunghezze di ancoraggio ridotte, dove l'angolo del puntone risultante sarebbe inferiore a 30°, non si applica il calcolo indicato. Questa soluzione è basata sul fatto che in questi casi i puntone che iniziano dai punti di adesione non sarebbero equilibrati con il puntone di compressione locale della parete e si potrebbe verificare un cedimento fragile per rottura conica del calcestruzzo. Inoltre è necessaria una lunghezza minima del foro per mantenere il progetto il più possibile simile alla soluzione

con ferri piegati. Si raccomanda quindi di praticare i fori con la maggiore profondità possibile, in modo che l'angolo maggiore possibile del puntone θ_{FN} sia $\leq 60^\circ$.

Il software sviluppato da Hilti per il calcolo di connessioni con ferri di ripresa post-installati PROFIS Rebar propone di preferenza una lunghezza di installazione (perforazione) tale per cui l'angolo del puntone θ_{FN} sia pari a 60°. Qualora il materiale base non consenta una profondità sufficiente, la profondità di posa massima possibile, definita per ancoranti adesivi nella norma ETAG 001, parte 5 [1], è desunta dalla seguente equazione:

$$l_{inst,max} = h_{member} - \max(2 \cdot d_0; 30 \text{ mm})$$

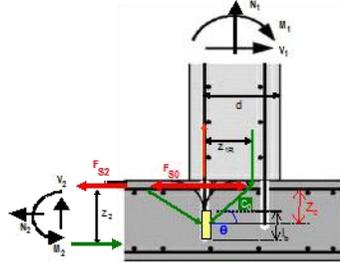
dove $l_{inst,max}$ è la lunghezza di installazione massima possibile [mm]

h_{member} è lo spessore dell'elemento in calcestruzzo esistente [mm]

d_0 è il diametro del foro eseguito [mm]

L'esecuzione di fori di lunghezza maggiore di $l_{inst,max}$ può causare la fessurazione del copriferro a causa dell'energia di impatto e deve quindi essere evitata.

Trazione nell'armatura esistente



Dati la lunghezza di installazione l_{inst} e un copriferro misurato dall'armatura superiore al centro dei ferri trasversali c_s , il braccio di leva all'interno del nodo z_0 può essere calcolato come segue:

$$z_0 = l_{inst} - \frac{\ell_b}{2} - c_s \quad (\text{mm})$$

Figura 43 – Definizione del braccio di leva interno nel nodo z_0

Il valore del braccio di leva all'interno del nodo z_0 è perciò inferiore al valore del braccio di leva della soletta z_2 . Di conseguenza, la forza di trazione nell'armatura della soletta superiore nella regione del nodo, F_{s0} , è maggiore della forza di trazione calcolata per la soletta utilizzando z_2 . Sulla base di ciò, la resistenza di trazione dell'armatura superiore esistente $A_{s0,prov}$ deve essere verificata separatamente nel modo seguente:

$F_{s2} = M_2/z_2 + N_2/2$ (N), (trazione nell'armatura esistente esternamente alla regione del nodo)

$H_{s2} = \left(M_1 + (V_2 + V_3) \cdot \frac{z_1}{2} \right) \cdot \left(\frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_2} \right) + V_1 \cdot \left(\frac{z_{1R}}{z_0} - 1 \right)$ (trazione aggiuntiva nel nodo a causa del ridotto braccio di leva)

$F_{s0} = F_{s2} + H_{s2}$ (trazione sull'acciaio nella regione del nodo)

$A_{s0,rqd} = F_{s0} / (f_{yk} \cdot \sigma_s)$ (superficie dell'acciaio richiesta nell'elemento esistente per forze esercitate dall'elemento nuovo)

Se la superficie di acciaio fornita $A_{s0,prov}$ è maggiore o uguale a quella richiesta $A_{s0,rqd}$, l'armatura dell'elemento esistente è sufficiente. Questa è l'analisi che si ottiene con il software PROFIS Rebar.

Come detto in precedenza, è necessario eseguire verifiche più accurate qualora vi siano altre forze in gioco. In tal caso si dovrà valutare F_{s2} in un "equilibrio globale" secondo un calcolo statico completo.

Minore è la profondità di posa del ferro verticale post-installato, maggiore è la riduzione del momento resistente della soletta nella regione del nodo rispetto a un nodo con ferro a uncino. Pertanto, si raccomanda inoltre di prevedere una profondità di posa sufficiente per i ferri di connessione, anziché cercare di ottimizzare il consumo di resina cercando di calcolare una profondità di posa quanto più possibile ridotta.

Puntone di compressione nel calcestruzzo

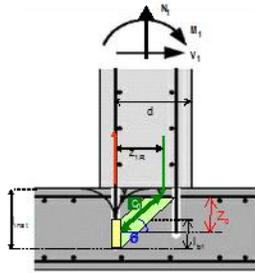


Figura 44 – Definizione di puntone di compressione C₀

Il modello tirante-puntone presuppone che il puntone di compressione C₀ sia ancorato al centro della zona di ancoraggio e che l'ampiezza del suo campo di compressione corrisponda alla lunghezza della zona di ancoraggio l_b.

$$F_{c0} = \frac{M_1 + (V_2 + V_3) \cdot z_1 / 2}{z_0}$$

(componente orizzontale della forza esercitata sul puntone nel calcestruzzo).

$$D_0 = F_{c0} / \cos \theta_{FN}$$

(forza di compressione nel calcestruzzo in direzione del

puntone)

$$\sigma_{Rd,max} = v' \cdot k_2 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

(resistenza del calcestruzzo ridotta nella regione del nodo di trazione-compressione come da ENV1992-1-1, 4.5.4(4b). Parametri standard: $\alpha' = 1 - f_{ck}/250$; $k_2 = 0,85$; $\alpha_{cc} = 1,0$; $\alpha_c = 1,5$, soggetti a variazioni nei Documenti di applicazione nazionale)

$$D_{0,R} = \sigma_{Rd,max} \cdot l_b \cdot w \cdot \cos \theta_{FN}$$

= larghezza della sezione)

(resistenza del calcestruzzo in direzione del puntone, w

Se $D_{0,R} \geq D_0$, il puntone nel calcestruzzo può sostenere i carichi dovuti al nuovo elemento.

Frattura del calcestruzzo nell'area di transizione

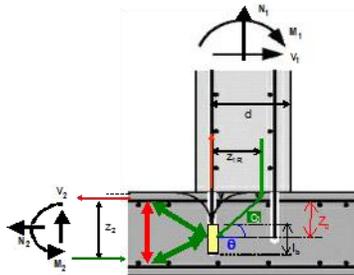


Figura 45 – Definizione della lunghezza di ancoraggio l_b

Sul lato sinistro della zona di ancoraggio, la forza di compressione prosegue attraverso gli ulteriori puntoni fino alle zone sottoposte a trazione e compressione della regione B della soletta, dove vi è equilibrio tra le forze orizzontali. Le componenti verticali di questi puntoni sono assorbite dalle sollecitazioni di trazione nel calcestruzzo. Normalmente non vi sono armature verticali nella soletta per assorbire la forza di trazione. I carichi e le sollecitazioni termiche della soletta non generano fessure orizzontali; perciò è possibile attribuire la forza di trazione alla capacità di trazione del calcestruzzo. A titolo cautelativo, si deve supporre la sollecitazione massima a frattura come la forza generata da un carico concentrato C₀ al centro della zona di ancoraggio. È stato dimostrato che la sollecitazione a frattura maxσ_{sp} può essere calcolata come segue:

A titolo cautelativo, si deve supporre la sollecitazione massima a frattura come la forza generata da un carico concentrato C₀ al centro della zona di ancoraggio. È stato dimostrato che la sollecitazione a frattura maxσ_{sp} può essere calcolata come segue:

$$\max \sigma_{sp} = \left(M_1 + \frac{(V_2 + V_3) \cdot z_1}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{z_0}{z_2} \right) \cdot \left(1 - \frac{l_b}{2 \cdot z_2} \right) \cdot \left(\frac{2.42}{b \cdot z_2^2} \right) \leq f_{ct}$$

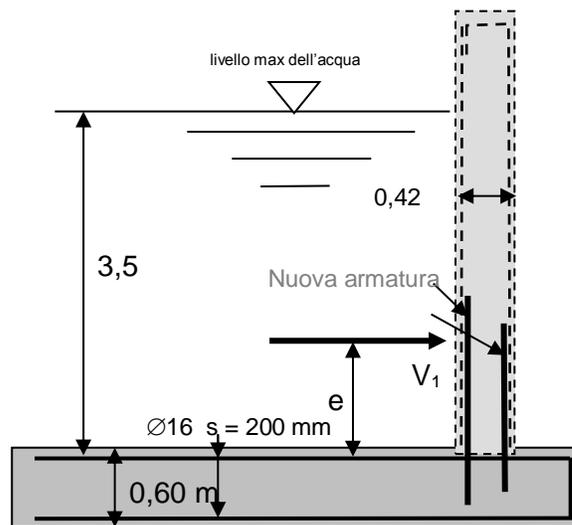
con: M₁, V₂, V₃:
z₂

forze esterne sul nodo come da figura 5
braccio di leva interno della sezione di soletta esterna alla

b regione del nodo
 larghezza della sezione della parete
 $f_{ctd} = f_{ct} \cdot 0.7 \cdot 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} / f_c$ resistenza a trazione del calcestruzzo (valore standard nell'Eurocodice 2: $f_{ct}=1,0$, soggetto a variazioni nei documenti di applicazione nazionale)

Se la sollecitazione a frattura max calcolata è minore della resistenza di trazione del calcestruzzo f_{ct} , il calcestruzzo può assorbire le forze di frattura senza ulteriori armature a taglio.

6.8 Calcolo di una connessione momento resistente secondo il metodo di calcolo HIT Rebar



Geometria:

$h_1 = 420 \text{ mm}; h_2 = h_3 = 600 \text{ mm};$
 $d_1 = 380 \text{ mm}; d_2 = d_3 = 560 \text{ mm};$
 $z_1 = 360 \text{ mm}; z_2 = z_3 = 520 \text{ mm}$
 $A_{s0} = A_{s2} = A_{s3} = 1005 \text{ mm}^2/\text{m}$
 ($\varnothing 16 \text{ s} = 200 \text{ mm}$)
 $c_s = h_2 - d_2 = 40 \text{ mm}$

Materiali:

Calcestruzzo: C20/25 (elementi nuovi ed esistenti), $\gamma_s = 1,5$
 Acciaio: 500 N/mm^2 , $\gamma_s = 1,15$
 Coefficiente di sicurezza per carico variabile: $\gamma_Q = 1,5$

HIT-RE 500 V3 (intervallo di temperatura I, perforazione a percussione)

Forze agenti:

$$\begin{aligned}
 V_{1d} &= \gamma_Q \cdot p \cdot h^2 / 2 = 1,4 \cdot 10 \cdot 3,5^2 / 2 && = 92 \text{ kN/m} \\
 e &= h / 3 = 3,5 / 3 && = 1,17 \text{ m} \\
 M_{1d} &= V_{1d} \cdot e = 92 \cdot 1,17 && = 107 \text{ kNm/m}
 \end{aligned}$$

Forza agente nell'armatura post-installata

$$\begin{aligned}
 z_{1r} &= 0,85 \cdot z_1 = 0,85 \cdot 360 && = 306 \text{ mm} \\
 &\text{(momento di apertura} \rightarrow \text{braccio di leva interno ridotto)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{s1d} &= M_{1d} / z_{1r} = 107 / 0,306 && = 350 \text{ kN/m} \\
 A_{s1,rqd} &= F_{s1d} / (f_{yk} / \gamma_{Ms}) = 350.000 / (500 / 1,15) && = 805 \text{ mm}^2/\text{m} \\
 \text{Scegliere } \varnothing 12 \text{ mm, interasse } s_1 = 125 \text{ mm} &\rightarrow A_{s1,prov} && = 905 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{diametro foro: } d_0 = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Sollecitazione nel ferro: } \sigma_{sd} = F_{s1d} / A_{s1,prov} = 386 \text{ N/mm}^2$$

Lunghezza di ancoraggio

$$f_{bd,EC2} = 2,3 \text{ N/mm}^2 \text{ (ETA-16/0142)}$$

$$l_{b,rqd,EC2} = (\Phi/4) \cdot (\sigma_{sd}/f_{bd,EC2}) = 504 \text{ mm}$$

$$l_{b,min} = \max \{0,3l_{b,rqd,EC2}; 10\Phi; 100 \text{ mm}\} = 151 \text{ mm}$$

$$f_{bd,b} = 9,3 \text{ N/mm}^2 \text{ (ETA-16/0143)}$$

$$c_d = s_1/2 - \Phi/2 = 56,5 \text{ mm} > 3\Phi$$

$$\alpha_2' = \frac{1}{\max \left[\frac{1}{0,7} + \delta \cdot \frac{c_d - 3\phi}{\phi}; 0,25 \right]} = 0,512$$

$$f_{bd,sp12} = \frac{f_{bd}}{\max [\alpha_2'; 0,25]} = 4,5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{bd} = \min \{f_{bd,b}; f_{bd,sp12}\} = 4,5 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{b1} = \max \{(\Phi/4) \cdot (\sigma_{sd} / f_{bd}); l_{b,min}\} = 258 \text{ mm}$$

Lunghezza foro

$$l_{inst,max} = h_2 - \max \{2d_0; 30 \text{ mm}\} = 568 \text{ mm}$$

(lunghezza massima possibile del foro)

$$l_{inst,60} = c_s + Z_{1R} \cdot \tan 60^\circ + l_{b1} / 2 = 672 \text{ mm}$$

(lunghezza del foro corrispondente a $\theta = 60^\circ$)

$$l_{inst,60} > l_{inst,max} \rightarrow \text{scegliere lunghezza foro } l_{inst} = l_{inst,max} = 568 \text{ mm}$$

$$\text{Angolo puntone con } l_{inst,max}: \tan \theta = (l_{inst,max} - c_s - l_{b1}/2) / Z_{1R} \rightarrow \theta_{FN} = 53^\circ$$

verificare: $\theta > 30^\circ \rightarrow \text{ok}$

Reazione nella fondazione:

$$-M_{2d} = M_{1d} + V_{1d} \cdot z_2 / 2 = 107 + 0,25 \cdot 92 = 131 \text{ kNm/m}$$

$$N_{2d} = -V_{1d} = -92 \text{ kN/m}$$

$$M_{s3} = 0; V_{2d} = V_{3d} = 0; N_1 = N_3 = 0$$

Verifica dell'armatura della fondazione

$$F_{s2d} = M_{2d} / z_2 + N_{2d} / 2 = 298 \text{ kNm/m}$$

(trazione esternamente alla regione del nodo)

$$z_0 = l_{inst} - c_s - l_{b1} / 2 = 568 - 40 - 258/2 = 399 \text{ mm}$$

(braccio di leva nella regione del nodo)

$$H_{s2d} = M_{1d} \cdot (1/z_0 - 1/z_2) + V_{1d} \cdot (z_1/z_0 - 1) = 53 \text{ kNm/m}$$

(forza aggiuntiva nella regione del nodo)

$$F_{s2d,node} = F_{s2d} + H_{s2d} = 351 \text{ kNm/m}$$

(trazione nella regione del nodo)

$$A_{s2,rqd} = F_{s2d,node} / (f_{yk}/\gamma_{Ms}) = 351.000 / (500 / 1.15) = 808 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_{s2} > A_{s2,rqd} \rightarrow \text{ok (} A_{s2} \text{ è dato)}$$

Verifica puntone di compressione nel calcestruzzo

$$F_{c0d} = M_{1d} / z_0 = 268 \text{ kNm/m}$$

$$D_{0d} = F_{c0d} / \cos\theta_{FN} = 441 \text{ kN/m}$$

$$f_{cc} = 1,0$$

(EC2: EN 1992-1-1:2004, 3.1.6(1))

$$v' = 1 - f_{ck}/250 = 0,92$$

(EC2: EN 1992-1-1:2004, 6.5.2(2))

$$k_2 = 0.85$$

(EC2: EN 1992-1-1:2004, 6.5.4(4b))

$$D_{0Rd} = f_{ct} \cdot v' \cdot k_2 \cdot f_{ck} / \gamma_c \cdot l_{b1} \cdot \cos\theta_{FN} = 1639 \text{ kN/m}$$

$$D_{0Rd} > D_{0d} \rightarrow \text{ok}$$

Verifica fratture nel calcestruzzo nel piano di fondazione

$$\alpha_{cc} = 1,0$$

(EC2: EN 1992-1-1:2004, 3.1.6(2))

$$f_{ctk,0.05} = f_{ct} \cdot 0.7 \cdot 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} / \gamma_c = 1,03 \text{ N/mm}^2$$

(tabella 3.1, EC2: EN 1992-1-1:2004)

$$M_{sp,d} = F_{c0d} \cdot z_0 \cdot (1 - z_0/z_2) \cdot (1 - l_{b1}/(2z_2)) = 1,87 \cdot 10^7 \text{ Nmm/m}$$

$$W_{sp} = 1000 \text{ mm} \cdot z_2^2 / 2,41 = 1,12 \cdot 10^8 \text{ mm}^3/\text{m}$$

$$\max\sigma_{sp} = M_{sp,d} / W_{sp} = 0,17 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ctk,0.05} > \max\sigma_{sp} \rightarrow \text{ok}$$

NOTA. Potrebbe essere necessario verificare ulteriormente l'adeguatezza del modello. Per ulteriori informazioni, si veda Hamad, B., *et al.* "Evaluation of Bond Strength of Bonded-In or Post-Installed Reinforcement," ACI Structural Journal V. 103, No. 2, pp. 207-218 [7].

7. Cos'altro serve sapere?

7.1 Calcestruzzo fessurato e non fessurato

Secondo il rapporto EOTA TR 023, per contemplare possibili variazioni nel comportamento di un ferro di ripresa post-installato e di un ferro gettato in opera in calcestruzzo fessurato, la lunghezza minima di ancoraggio deve essere incrementata secondo un coefficiente di 1,5. Tale incremento viene omesso se le prove dimostrano che la resistenza di adesione del ferro di ripresa post-installato e del ferro gettato in opera nel calcestruzzo fessurato sono simili [15]. Inoltre, nella maggior parte delle applicazioni con ferri di ripresa post-installati, le fessure sono distribuite perpendicolarmente all'asse dell'armatura, senza incidere sulla capacità di carico del legame creato dalla connessione tra i sistemi. Nell'ETA relativa al ferro di ripresa post-installato per ciascun prodotto sono riportati i valori di resistenza di adesione e i coefficienti di amplificazione delle lunghezze di ancoraggio minime.

Si dovrà prestare maggiore attenzione alla differenza tra calcestruzzo fessurato e non fessurato quando si applica il metodo di calcolo HIT Rebar, al fine di ridurre la lunghezza di ancoraggio dei ferri di ripresa post-installati in una connessione tra sistemi. Innanzitutto si dovrà individuare la direzione delle fessure che si potrebbero sviluppare lungo l'armatura. Se tali fessure sono parallele all'asse dell'armatura, il limite superiore del metodo di calcolo HIT Rebar è costituito dalla resistenza di adesione del calcestruzzo fessurato indicata nel documento di omologazione del relativo prodotto.

7.2 Ulteriori fattori che influenzano la resistenza di adesione

La deformazione eccessiva in alcune applicazioni di ancoraggio è stata correlata a carichi di trazione sostenuti sugli ancoranti adesivi. Per le applicazioni con ferri di armatura post-installati, si dovrà valutare la necessità di adottare ulteriori precauzioni qualora debbano essere sottoposte a carichi di trazione sostenuti. Per determinati casi specifici, ad es. laddove un numero ridotto di ferri sia soggetto a trazione diretta in conseguenza di pesi morti, potrebbe essere consigliabile usare una ridotta sollecitazione di adesione. Inoltre si dovranno adottare, se appropriate, misure come riduzione della resistenza di adesione in funzione della temperatura del calcestruzzo, della presenza di acqua (calcestruzzo saturo) e installazione in calcestruzzo leggero.

7.3 Fatica

Il carico di fatica ad alto numero di cicli non è oggetto specifico dei requisiti di qualifica trattati nel rapporto TR 023 [15] per connessioni con ferri post-installati. Tuttavia, gli elementi sottoposti a carico ciclico considerevole, in connessioni con resine adesive, devono essere oggetto di calcolo della fatica specifico. In caso di evidenza di resistenza a fatica a carico dei ferri di armatura, i calcoli del calcestruzzo e della resina dovranno essere forniti separatamente.

Per i casi più semplici, è ragionevole utilizzare metodi semplificati e adottare misure cautelative.

I coefficienti di sicurezza parziale per carichi sono specificati nella norma relativa al cemento armato.

I coefficienti di sicurezza parziale per i materiali sono indicati nella tabella 4.3.

Tabella 4.3: coefficienti di sicurezza parziale per materiali soggetti a carichi ciclici

Evidenza di	modalità di cedimento correlate al calcestruzzo (cedimento conico e frattura)	di	modalità di cedimento correlate alla resina (sfilamento)	ferri di ripresa (acciaio)
Coefficiente di sicurezza parziale [-]	1,5		1,8	1,15

Fatica a carico dei ferri di ripresa (acciaio)

La resistenza a fatica dei ferri di ripresa (acciaio) è specificata nel codice relativo al cemento armato. Il comportamento di ferri di ripresa legati per mezzo di prodotti HIT è di qualità almeno paragonabile a quello di armature gettate in opera.

Fatica a carico di resina e calcestruzzo (approccio semplificato)

Per adottare un approccio semplice e cautelativo, la presenza di fatica è confermata se viene verificata la seguente equazione:

$$F_{Sd,fat} \leq N_{Rd} \cdot f_{fat} \quad (N)$$

dove:

$F_{Sd,fat}$ Valore di progetto della forza di ancoraggio relativo alla condizione prevista di sollecitazione a fatica (N)

N_{Rd} Resistenza di progetto per carico statico dell'ancoraggio (resina e calcestruzzo) (N)

f_{fat} Coefficiente di riduzione per fatica a carico di resina e calcestruzzo: $f_{fat} = 0,5$
Se i valori max/min dei cicli sono noti, i coefficienti di riduzione sono quelli illustrati nella Figura 46.

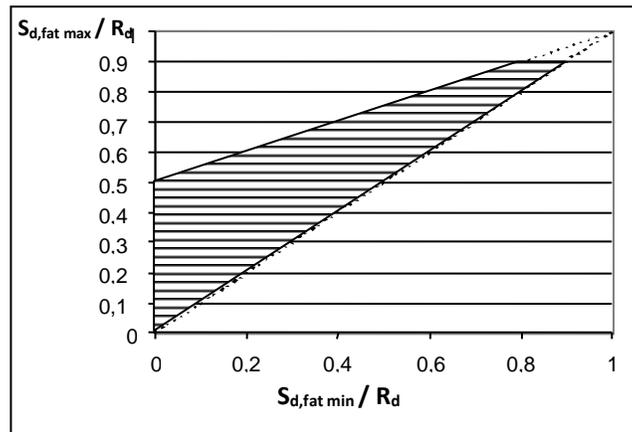


Figura 46 – Schema di un approccio semplificato con $2 \cdot 10^6$ cicli (diagramma di Weyrauch)

Coefficienti di riduzione per fatica a carico di resina e calcestruzzo

Se il metodo semplificato non è soddisfacente, è possibile dedurre ulteriori informazioni dalle curve di Woehler. Per ulteriori informazioni, contattare l'assistenza tecnica Hilti.

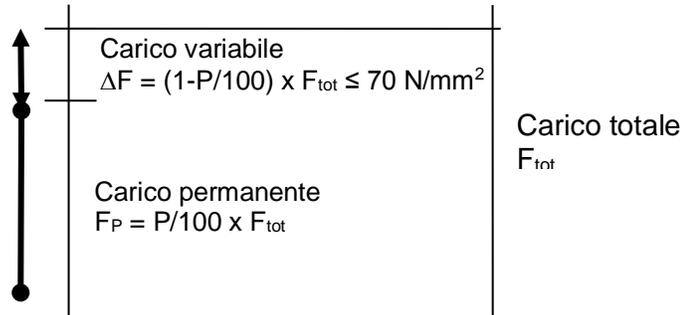
Approccio di calcolo

Resistenza dell'acciaio

La resistenza dell'acciaio sotto carico di fatica è calcolata sulla base della porzione di carico permanente, la porzione di carico ciclica e la resistenza a snervamento dell'acciaio. I coefficienti di sicurezza sono gli stessi impiegati per il calcolo statico (desunti da ENV 1992-2-2:1996, sez. 4.3.7.2).

$\Delta\sigma_{s,max}$ = variazione di sollecitazione massima consentita, generalmente stabilita dalle norme, ad es. ENV 1992-2-2:1996, sez. 4.3.7.5: $\Delta\sigma_{s,max} = 70 \text{ N/mm}^2$

P percentuale permanente del carico: $0 \leq P \leq 100$



Il coefficiente di riduzione sulla resistenza dell'acciaio dovuta a carico dinamico può essere calcolato come segue:

$$f_{red,s,dyn} = \frac{\min(f_{yk}; \frac{70}{1 - (\frac{P}{100})})}{f_{yk}} (-)$$

mentre la sollecitazione massima dell'acciaio risultante considerata per il carico di fatica può essere definita come segue:

$$\sigma_{s,max,dyn} = f_{red,s,dyn} \cdot f_{yk} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Resistenza del calcestruzzo

La resistenza del calcestruzzo calcolata per il carico statico è ridotta secondo un coefficiente di riduzione per i carichi di fatica $f_{red,c,dyn}$ che è applicato a tutti i tipi di modalità di cedimento del calcestruzzo, ovvero frattura, rottura del bordo sotto carico di taglio per calcestruzzo fessurato e non fessurato. Questo coefficiente è calcolato a partire dal diagramma di Weyrauch contenuto nell'Eurocodice 2 (ENV 1992-2-2:1996, sez. 4.3.7.4), per mezzo dell'equazione seguente:

$$f_{red,c,dyn} = 0.5 + 0.45 \cdot \frac{P}{100} \leq 0.9$$

Per $P = 100$ (solo carichi permanenti), $f_{red,c,dyn}$ è naturalmente 1,0, ma non appena $P < 100$, $f_{red,c,dyn} \leq 0,9$.

Per semplificare, si può considerare a titolo cautelativo $f_{red,c,dyn} = 0,5$.

Resistenza di adesione

La resistenza della resina calcolata per il carico statico è ridotta secondo un coefficiente di riduzione per i carichi di fatica $f_{red,b,dyn}$ calcolato a partire dal diagramma di Weyrauch, sulla base delle prove relative e dell'analisi della letteratura [8] e si applica solo alle resine Hilti. È necessario scegliere tra due formule. Il valore di $f_{red,b,dyn}$ può essere determinato, in funzione del metodo di perforazione, come segue:

Approccio generale per le resine Hilti:

$$f_{red,b,dyn} = 0.63 + 0.37 \cdot \frac{P}{100} \leq 0.9$$

Per la resina Hilti HIT-RE 500 V2 in fori praticati con corona diamantata (saturi d'acqua):

$$f_{red,b,dyn} = 0.53 + 0.47 \cdot \frac{P}{100} \leq 0.9$$

Per semplificare, si può considerare a titolo cautelativo $f_{red,c,dyn} = 0,5$.

Per ulteriori indicazioni sull'argomento, contattare il personale tecnico Hilti.

7.4 Effetti del fuoco

Le resine organiche sono sensibili alle alte temperature. Per quanto riguarda connessioni con ferri di ripresa post-installati all'interno di strutture soggette a classificazione antincendio (solai, tetti, ecc), è importante che la resistenza al fuoco della connessione venga valutata utilizzando i dati di prove che consentano di calcolare la riduzione tempo-dipendente della resistenza di adesione associata alle geometrie tipiche e ai protocolli di carico tempo-temperatura.

La resistenza di adesione di ferri di ripresa post-installati sottoposti a incendio viene valutata mediante prove basate su un nuovo Documento di valutazione europea (EAD) [18]. L'ETA dei ferri di armatura per il relativo prodotto riporta il coefficiente di riduzione da applicare alla resistenza di adesione in funzione della temperatura. Ad esempio, la Figura 46 mostra il coefficiente di riduzione in funzione della temperatura per la resina HIT RE-500 V3.

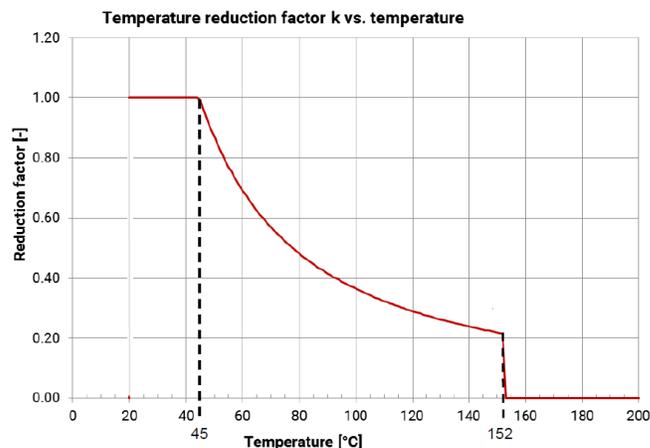


Figura 49 – Coefficiente di riduzione $K_{fi}(\theta)$ in funzione della temperatura (da ETA – 16/0142)

Il profilo della temperatura sulla lunghezza di ancoraggio può essere costante (Figura – 48a) e in funzione dello spessore del copriferro e del tempo di esposizione, oppure variabile e in funzione della lunghezza di ancoraggio stessa e del tempo di esposizione (Figura – 48b). La connessione tra soletta e soletta, ad esempio, è rappresentativa della prima condizione (“parallela”) mentre la connessione semplicemente appoggiata è rappresentativa della seconda condizione (“ancoraggio”).

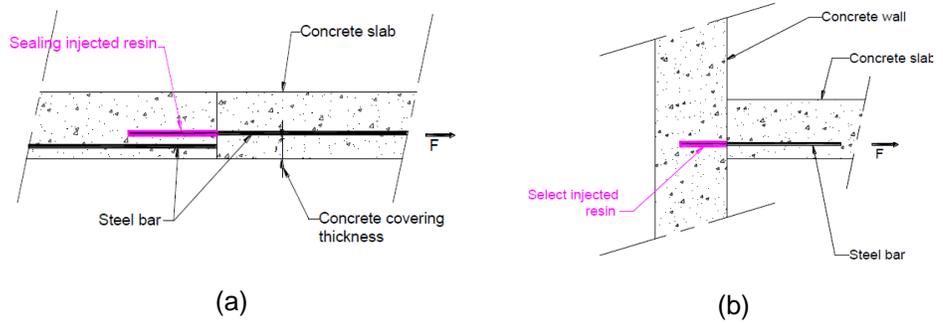


Figura 50 – Schematizzazioni di una connessione soletta-soletta (a) e trave-parete (b)

I calcoli si attengono alle regole dell'Eurocodice 2:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

Il carico $E_{d,fi}$, è il 70% del carico "a freddo" (supponendo che in caso di incendio l'edificio non sia soggetto al carico massimo di progetto) e la reazione $R_{d,t,fi}$, viene ridotta in base alla temperatura della connessione tra i sistemi durante l'evento.

È necessario verificare i tre componenti della connessione: calcestruzzo, acciaio e resina.

Il calcestruzzo mostra minore sensibilità alle alte temperature rispetto alla resina e all'acciaio, di conseguenza quest'ultimo necessita di maggiore attenzione. Per quanto riguarda resina e acciaio, la minore resistenza dovuta alle alte temperature viene valutata mediante i coefficienti di riduzione reperibili rispettivamente nell'ETA e nell'Eurocodice 2.

Per valutare il profilo della temperatura sulla lunghezza di ancoraggio è necessario, in taluni casi, ricorrere a programmi FEM, con conseguente allungamento dei tempi di processo. Per agevolare i propri clienti, Hilti ha sviluppato delle tabelle di prestazione per i vari tipi di applicazione, in cui sono riportati le resistenze di adesione e i carichi di adesione. In particolare, in caso di sovrapposizione, la resistenza di adesione è in funzione dello spessore del copriferro, mentre in caso di nodi semplicemente appoggiati o momento resistenti il carico sulla resina è in funzione della lunghezza dell'ancoraggio e del tempo di esposizione.

Caso "parallelo"

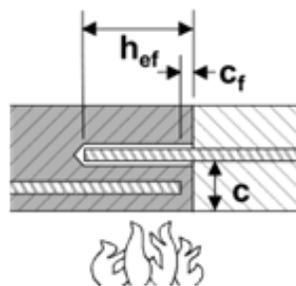


Figura 47 – Condizione di incendio "parallelo"

Concrete Cover (mm)	Fire Design Bond Resistance $f_{bd,fire}$ (N/mm ²)					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
30						
40	0.8					
50	1.1					
60	1.5					
70	2.1	0.9				
80	2.9	1.2				
90	3.5	1.5	0.9			
100		1.8	1.1	0.8		
110		2.3	1.4	1.0		
120		2.8	1.6	1.2		
130		3.4	2.0	1.4	0.9	
140		3.5	2.3	1.6	1.0	

Figura – 48 Valori di resistenza di adesione di progetto applicabili $\tau_{Rd,fi}$ (τ_c) in caso di incendio, in funzione dello spessore del copriferro libero c , condizione parallela (esempio)

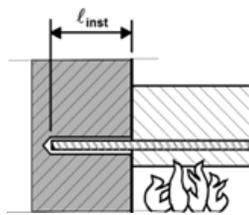
Nella condizione di incendio "parallelo" gli unici parametri rilevanti sono la distanza libera tra la superficie di calcestruzzo esposta al fuoco e il perimetro del ferro

(“spessore del copriferro libero c”) e la durata dell’incendio. Questi due parametri consentono di dedurre dalle relative tabelle (visualizzate in estratto nella Figura – 48) la resistenza di adesione di progetto applicabile per la resina in uso in funzione della durata dell’incendio.

Per quanto riguarda i calcoli antincendio, i parametri che determinano le condizioni del legame, come il profilo della temperatura sulla lunghezza di ancoraggio e il coefficiente di riduzione, non sono necessari. È sufficiente provare che la giunzione o la lunghezza di ancoraggio calcolate siano sufficienti a trasferire il carico in condizioni di incendio con la resistenza di adesione di progetto data $\tau_{Rd,fi}$ (denominata τ_c nella Figura 51). Osservando la Figura – 48, ad esempio, la resistenza di adesione di progetto $\tau_{Rd,fi}$ per uno spessore del copriferro $c = 70$ mm e una durata dell’incendio di R60 è uguale a $\tau_{Rd,fi} = 0,9$ N/mm². Sulla base di questa considerazione, la forza di trazione massima sull’armatura di ripresa nelle condizioni circostanti ipotizzate potrà essere calcolata come segue:

$$F_{fire} = \tau_{Rd,fi} \cdot \pi \cdot h_{ef} \cdot \phi \quad (N)$$

Caso “ancoraggio”



Concrete Cover = 10 mm		Fire Design Load Resistance N Rd,Fire (kN)					
Diameter (mm)	Length lv (mm)	R30	R60	R90	R120	R180	R240
8	100	3.4	1.2	0.5	0.2	0.0	0.0
	140	6.9	4.1	2.2	1.4	0.5	0.0
	180	10.3	7.4	5.4	3.8	1.9	1.0
	220	13.8	11.1	8.9	7.2	4.3	2.7
	260	16.8	14.5	12.4	10.7	7.6	5.2
	290		16.8	15.0	13.3	10.3	7.8
	320			16.8	15.9	12.9	10.4
	330				16.8	13.7	11.3
	370					16.8	14.7
	400						16.8
10	110	5.3	2.2	1.0	0.5	0.0	0.0
	150	9.6	6.2	3.6	2.4	0.9	0.3
	190	14.0	10.5	7.9	5.8	3.0	1.7
	230	18.3	14.6	12.2	10.1	6.3	4.0
	270	22.7	19.2	16.5	14.4	10.6	7.6
	310	26.2	23.6	20.9	18.8	15.0	11.9
	340		26.2	24.1	22.0	18.2	15.2
	360			26.2	24.2	20.4	17.3
	380				26.2	22.6	19.5
	420					26.2	23.8
450						26.2	

Figura 49 – Condizione di incendio “ancoraggio”

Figura 50 – Forza di trazione applicabile F_{fire} ($F_{s,T}$) in condizioni di incendio, in funzione del diametro del ferro, della lunghezza di installazione e della classe di durata dell’incendio (esempio)

Nelle condizioni di incendio “**ancoraggio**”, le tabelle mostrano direttamente la resistenza all’incendio come forza [kN] per valori definiti di diametri, profondità di posa, spessori del copriferro e durata dell’incendio.

Le tabelle forniscono le forze massime dell’acciaio in condizioni di incendio in funzione del diametro dei ferri, della lunghezza di installazione e della durata dell’incendio. Si osservi che questi valori sono desunti da un valore specifico della resistenza a snervamento del ferro di armatura, $f_{yk,fi}$, e variano al variare di $f_{yk,fi}$. Osservando la tabella della Figura 50, ad esempio, il carico massimo di progetto di adesione $F_{bd,fi}$, per una lunghezza di ancoraggio $c = 270$ mm, uno spessore del copriferro di 10 mm e una durata dell’incendio di R60 è uguale a $F_{bd,fi} = 19,2$ kN.

È possibile calcolare per interpolazione lineare i valori intermedi della forza massima dell’acciaio, tra i valori indicati nei calcoli delle condizioni di incendio, tenendo in considerazione la lunghezza di installazione/ancoraggio; non è invece consentito eseguire estrapolazioni.

7.5 Calcolo sismico di ferri di ripresa post-installati strutturali

La crescente densità della popolazione, l'importanza dei centri urbani, dove si concentrano una miriade di attività preziose e il fatto che la società dipenda da un'infrastruttura efficiente impongono una maggiore attenzione nei confronti dei rischi attinenti ai terremoti. In numerose regioni di tutto il mondo, questi rischi sono stati ridotti tramite l'adozione di regolamenti edilizi appropriati e pratiche di costruzione assolutamente all'avanguardia. Inoltre, lo sviluppo di metodi di prequalificazione per valutare prodotti edili per progetti a rischio sismico contribuisce a realizzare edifici più sicuri per le generazioni future.

Le omologazioni DTA (Disposizioni tecniche amministrative) emesse dal CSTB (Centro scientifico e tecnico di edilizia), membro dell'EOTA (Organizzazione europea per la valutazione tecnica), riconoscono i prodotti Hilti come le resine iniettabili HIT RE-500 V3 e HIT HY-200-A/R come prodotti qualificati per le applicazioni di ferri di ripresa strutturali in zone sismiche. Questa approvazione nazionale prevede che i prodotti qualificati abbiano un'approvazione ETA per il ferro di ripresa, un'approvazione ETA per l'ancoraggio in calcestruzzo fessurato e una prequalificazione ICC-ES per condizioni sismiche.

Il calcolo sismico è limitato a:

- $\max f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
- non utilizzare calcestruzzo di classe inferiore a C20/25
- solo armature duttili (classe C)
- nessuna combinazione di ferri di ripresa post-installati e, ad esempio, ferri piegati per garantire la compatibilità di spostamento
- solo sistemi a iniezione specifici per l'ancoraggio delle armature:
 - HIT-HY 200-R
 - HIT-RE 500 V3

I documenti di omologazione contengono la procedura di calcolo dettagliata e, oltre a illustrare in dettaglio le disposizioni dell'Eurocodice 2 e l'ETA dei ferri di ripresa, tengono in considerazione le seguenti disposizioni della norma EN 1998-1:2004 (Eurocodice 8) [11]:

- L'uso del sistema è limitato a nuove costruzioni o strutture che devono essere sottoposte a importanti lavori di ristrutturazione.
- La struttura in cui i ferri vengono inseriti sarà calcolata in considerazione di sollecitazioni sismiche e l'armatura sarà calcolata in modo tale da assorbire le forze generate dai ferri di ripresa installati successivamente.
- I calcoli saranno eseguiti contemporaneamente alla verifica della struttura iniziale.
- Lo stesso processo può essere utilizzato per estrapolare eventuali sollecitazioni di trazione o compressione. L'applicazione non è designata per agire da tirafondo.
- Il calcolo dei ferri post-installati e la determinazione delle forze interne saranno eseguiti in conformità alle norme EN 1992-1-1 e EN 1998-1-1 e coincideranno con il calcolo della struttura stessa.
- I carichi applicati all'armatura, in considerazione delle accelerazioni, saranno sotto la responsabilità dello studio di progettazione, che potrà decidere di inserire ulteriori ferri di armatura o prevedere lunghezze di ancoraggio maggiori.

- Sarà eseguita la verifica del trasferimento locale dei carichi nel calcestruzzo.
- Sarà eseguita la verifica del trasferimento dei carichi ancorati nella struttura.
- La distanza tra i ferri di armatura è specificata per ciascun prodotto nel relativo Benestare tecnico europeo.
- Ancoraggi e giunzioni saranno conformi a EN 1998-1-1.

Nelle schede tecniche del manuale sulle tecnologie di fissaggio sono incluse tabelle con i valori di progetto della resistenza di adesione.

7.6 Corrosione

Il calcestruzzo è un materiale naturalmente alcalino: di conseguenza, in condizioni normali, la corrosione dell'armatura annegata nel calcestruzzo viene ostacolata mediante passivazione della superficie del ferro. Tuttavia, quando il calcestruzzo è sottoposto a carbonatazione, il pH minore può fessurare lo strato passivante del ferro e consentire la corrosione. Inoltre si è osservata una velocità di corrosione maggiore (corrosione alveolare) quando il calcestruzzo è contaminato da cloruri.

La qualifica dei sistemi adesivi per applicazioni con *ferri di ripresa post-installati* comprende una verifica specifica sulla suscettibilità del sistema a corrosione a lungo termine dei ferri. I ferri installati con sistemi qualificati dovranno presentare velocità di corrosione simili a quelle di ferri gettati in opera nello stesso calcestruzzo. È importante che la resina che circonda il ferro sia relativamente priva di spazi vuoti al fine di ridurre al minimo la corrosione. Di conseguenza, la qualità dell'installazione è estremamente importante ai fini della resistenza alla corrosione, oltre che dell'elevata resistenza di adesione.

L'Associazione svizzera per la protezione contro la corrosione (SGK) ha ricevuto incarico di valutare il comportamento di corrosione di fissaggi post-installati in calcestruzzo mediante i sistemi a iniezione Hilti HIT-HY 200 e Hilti HIT-RE 500.

A tal fine sono state condotte delle prove di corrosione nelle quali è stato valutato il comportamento dei due sistemi in relazione al loro uso in un contesto reale confrontato quindi con il comportamento di armature gettate in opera.

Il risultato può essere riassunto come segue:

Hilti HIT-HY 200-R

- Il sistema Hilti HIT-HY 200-R in combinazione con ferri di ripresa possono essere considerati resistenti alla corrosione quando utilizzati in calcestruzzo sano, avente pH alcalino. L'alcalinità della resina adesiva protegge la passivazione iniziale dell'acciaio. A causa della porosità della resina, avviene uno scambio tra questa e la soluzione porosa alcalina di cui è composto il calcestruzzo.
- Immergendo i ferri in calcestruzzo privo di cloruri come in questo sistema, in caso di successiva esposizione a cloruri, la velocità di corrosione è all'incirca dimezzata rispetto ai ferri gettati in opera.
- In calcestruzzo contenente cloruri, il comportamento di corrosione del sistema è simile a quello dei ferri gettati in opera. Se ne deduce che non è consigliabile l'uso di acciaio non protetto in calcestruzzo esposto precedentemente o eventualmente in futuro a cloruri, poiché è prevedibile che si verifichino fenomeni di corrosione già dopo un breve periodo di esposizione.

Hilti HIT-RE 500 V3

- Utilizzando il sistema Hilti HIT-RE 500 V3 in un ambiente corrosivo, uno strato di resina di spessore adeguato allunga il periodo di tempo prima che inizino a verificarsi fenomeni di corrosione ai danni dell'acciaio immerso nel calcestruzzo.
- Il sistema HIT-RE 500 V3 può essere descritto come resistente alla corrosione, anche se il calcestruzzo è carbonatato e contiene cloruri, a condizione di impiegare uno spessore di resina di almeno 1 mm. In tal caso, l'acciaio non protetto nella giunzione in calcestruzzo e nel calcestruzzo nuovo è in condizioni critiche.
- In assenza di tale spessore, il sistema HIT-RE 500 V3 può essere usato solo in calcestruzzo sano. In tal caso, il ferro può anche essere posto a contatto con la parete del foro. Nei punti di contatto l'acciaio si comporta come se fosse ricoperto da un sottile strato di resina epossidica.
- Nei casi analizzati l'acciaio precedentemente arrugginito (senza cloruri) non ha mai mostrato fenomeni di corrosione, anche se immerso in calcestruzzo contenente cloruri.
- Parimenti, durante lo studio non è stata osservata un'accelerazione della corrosione in punti difettosi della resina, e non esistono riferimenti a tale fenomeno in letteratura. Anche in caso di formazione di macro-elementi, l'elevata resistenza alla diffusione impedisce un incremento della velocità di corrosione a livello locale.
- Le informazioni nei dati di riferimento sono coerenti con i risultati del presente studio.

7.7 Programma di calcolo PROFIS Rebar

Il software di calcolo PROFIS Rebar™ consente di calcolare in modo rapido e sicuro le connessioni con ferri di ripresa post-installati, tenendo in considerazione tutti i parametri analizzati nella presente guida.

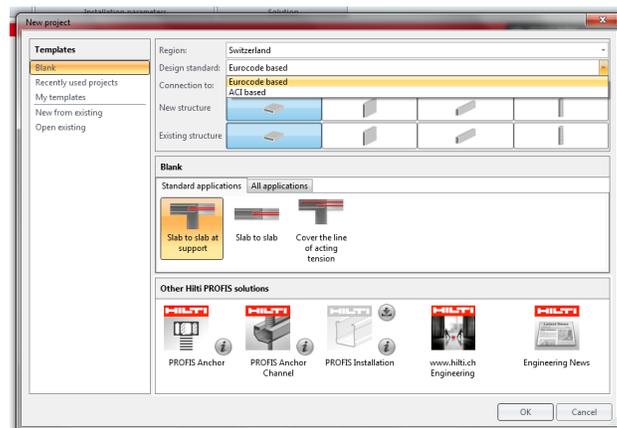


Figura 51 – PROFIS Rebar™

Dopo aver aperto un nuovo progetto, l'utente può scegliere diversi metodi di calcolo, basati sull'Eurocodice 2 [5] oppure basati su ACI, nonché il tipo di applicazione. Le "applicazioni standard" contengono la gamma di applicazioni contemplata nel TR 023, "tutte le applicazioni" contiene ulteriori applicazioni, che esulano dalle disposizioni del TR 023, come i nodi

momento resistenti, per i quali Hilti propone una soluzione di calcolo. Una volta scelta la corretta applicazione, è necessario definire i dati relativi alla struttura nuova e a quella esistente.

Nella finestra dei risultati a destra del disegno l'utente può passare da un tipo di metodo a un altro, ad es. da "EC/ETA" a "Metodo di calcolo Hilti Rebar" (vedere la sezione 6).

Nella barra di sinistra dello schermo l'utente può selezionare la resina che intende utilizzare e il diametro del ferro o l'interasse tra gli strati superiori e inferiori. Sulla

base dei dati inseriti, il programma calcola le forze di taglio nell'acciaio e nel calcestruzzo e la posizione dell'asse neutro. (Presupponendo un comportamento elastico-plastico dell'acciaio; non è preso in considerazione l'eventuale incrudimento dell'acciaio).

Il rapporto riepiloga la sequenza di fasi e i parametri, i fattori e le formule impiegati per il calcolo della soluzione.

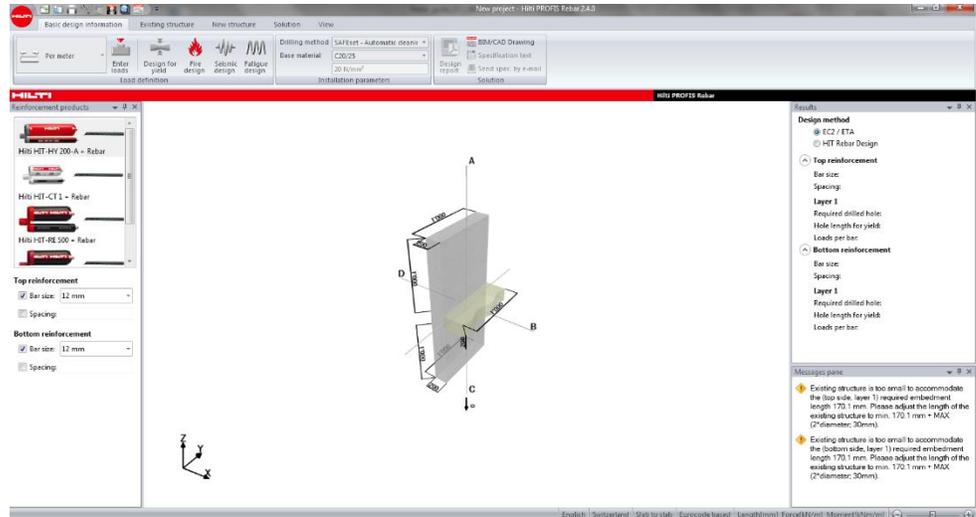


Figura 52 – PROFIS Rebar™

Per ulteriori indicazioni sull'argomento, visita il sito www.hilti.it ed il blog di ingegneria blog.hilti.it

8. Bibliografia e suggerimenti per approfondimenti

- [1] Organizzazione Europea per la valutazione tecnica (EOTA): ETAG 001, parte 5 Ancoraggi metallici da utilizzare nel calcestruzzo, ancoranti chimici, 2002
- [2] Versione tedesca della norma CEN/TS 1992-4-1:2009, Progettazione di fissaggi per l'uso nel calcestruzzo - Parte 4-1
- [3] Fuchs, W.; Eligehausen R.; Breen, J. E. (1995/2): Concrete capacity design (CCD) Approach for fastenings to concrete. ACI Structural Journal, Vol. 92 (1995), No. 1, S-73-94
- [4] Appl, J.: Tragverhalten von Verbunddübeln unter Zugbelastung; Dissertation, Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2009
- [5] DIN EN 1992: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004
- [6] Organizzazione Europea per la valutazione tecnica (EOTA): rapporto tecnico 029, Calcolo di ancoranti chimici, 2010
- [7] Hamad, B., Hammoud, R., and Kunz, J. (2006). "Evaluation of Bond Strength of Bonded-In or Post-Installed Reinforcement," ACI Structural Journal V. 103, No. 2, pp. 207-218.
- [8] Kunz, J. (2005). "Splitting Design for Anchorages and Splices with Post-Installed Reinforcement," Proceedings, ICF XI - 11th International Conference on Fracture.
- [9] Kupfer, H., Münger, F., Kunz, J., and Jähring, A. (2003). "Nachträglich Verankerte Gerade Bewehrungsstäbe bei Rahmenknoten," (Post-installed Straight Reinforcing Bars in Frame Joints), *Bauingenieur*, Band 78, 15 pp. (in tedesco).
- [10] Palieraki, V., Vintzileou, E., Silva, J. (2013). Discussione 109-S73/dal numero di novembre-dicembre 2012 della pubblicazione ACI Structural Journal "Towards an Improved Understanding of Shear-Friction Behavior," ACI Structural Journal sett-ott 2013, pp. 887-888.
- [11] Randl, N. and Kunz, J. (2012). "Concrete Splitting for Rebars Post-Installed with High Bond Adhesives," Proceedings of the 4th International Symposium on Bond in Concrete, Cairns, J., *et al.*, eds., Manerbio, Brescia, pp. 521-526
- [12] Simons, I. N. (2007). "Verbundverhalten von Bewehrungsstahl Stäbe unter Zyklischer Belastung," (Comportamento di adesione di ferri di armatura sottoposti a carico ciclico), tesi di dottorato, Università di Stoccarda (in tedesco).
- [13] Spieth, H., Ozbolt, J., Eligehausen, R., and Appl, J. (2001). "Numerical and Experimental Analysis of Post-Installed Reinforcing Bars Spliced with Cast-In-Place Reinforcing Bars," Proceedings, International Symposium on Connections between Steel and Concrete, RILEM Publications, Stoccarda, pp. 889-898.
- [14] Spieth, H. (2002). "Tragverhalten und Bemessung von Eingemörtelten Bewehrungsstäben," (Comportamento strutturale e calcolo di ferri di ripresa fissati con ancoranti chimici), tesi di dottorato, Università di Stoccarda (in tedesco).

- [15] Organizzazione Europea per la valutazione tecnica (EOTA): rapporto tecnico 023, Valutazione di connessioni con ferri di ripresa post-installati, 2013
- [16] Mahrenholtz, C., Eligehausen, R., Reinhardt, HW. (2015). "Design of post-installed reinforcing bars as end anchorage or as bonded anchor," Engineering Structure, V.100, p.645-655.
- [17] Wicke, M. (2006). "Hilti HCC-B for concrete overlays," (Resina HCC-B per sovrapposizione di strati di calcestruzzo), Manuale di tecnologie di fissaggio, documentazione Hilti.
- [18] Organizzazione Europea per la valutazione tecnica (EOTA): EAD 330087-00-0601, Sistema per connessione con ferri di ripresa post-installati con resina, 2015