

OVERLAY - SOVRAPPOSIZIONE DI STRATI DI CALCESTRUZZO

Progettazione della resistenza al taglio longitudinale delle interfacce calcestruzzo-calcestruzzo secondo EOTA TR066

L'attuale norma europea EN 1992-1-1 (EC2) [1] per la progettazione delle strutture in cemento armato include regole per la progettazione della capacità di taglio delle giunture calcestruzzo-calcestruzzo di elementi semi-prefabbricati in calcestruzzo. Tuttavia, per la progettazione di un'interfaccia rinforzata con connettori post-installati, la norma EOTA TR 066 [2] è l'approccio più appropriato.

In questo articolo viene affrontato in modo esauriente l'argomento delle sovrapposizioni di strati di calcestruzzo. Viene esaminata l'attuale normativa per la progettazione della sovrapposizione di strati di calcestruzzo (*Overlay*) e vengono trattati i singoli componenti che descrivono la capacità portante dell'interfaccia dei due strati sovrapposti. Inoltre, vengono fornite informazioni sulla preparazione della superficie dell'interfaccia e sull'installazione dei connettori a taglio post-installati secondo EOTA TR 066 [2]. Infine, vengono mostrate delle soluzioni per la modellazione e progettazione nel suo insieme. Per quest'ultimo punto ci riferiamo al modulo di sovrapposizione di calcestruzzo del software di progettazione PROFIS Engineering di Hilti.



Figura 1. Un'applicazione tipica di sovrapposizione di strati calcestruzzo (*Overlay*) in ingegneria civile è il rinforzo o il risanamento di pavimentazioni industriali.

Sommario

1. Sintesi
2. Fasi di lavorazione in cantiere e portafoglio prodotti
3. Comportamento e capacità portante dell'interfaccia
4. Progettazione di sovrapposizione di strati in calcestruzzo secondo il report EOTA TR 066
5. Un parametro chiave: la scabrezza R_t
6. Consigli pratici sulla progettazione: differenze principali tra EN 1992-1-1 e EOTA TR 066
7. Riepilogo

1 Sintesi

L'installazione di nuovi strati di calcestruzzo sovrapposti agli elementi esistenti in calcestruzzo (*Overlay*), sta diventando sempre più importante a causa della crescente necessità di rinforzare e adeguare le strutture esistenti.

Le sezioni trasversali delle travi da ponte rinforzate con un nuovo strato di calcestruzzo, nonché il ringrosso e il rinforzo di elementi esistenti in calcestruzzo sono esempi tipici dell'utilizzo della sovrapposizione di due strati (*Overlay*), vedere Figura 2. Se gli sforzi di taglio non si possono trasferire attraverso il giunto tra i due strati di calcestruzzo che sono stati gettati in momenti diversi, allora la sicurezza strutturale è a rischio.



a) Rinforzo o adeguamento di pavimentazioni industriali



b) Rinforzo di un soffitto



c) Adeguamento e rinforzo dell'impalcato di un ponte

Figura 2. Applicazione tipica di sovrapposizione di strati di calcestruzzo nella costruzione di edifici e nell'ingegneria civile.

Nella Figura 3a viene mostrato il diagramma a taglio di una trave senza l'attivazione del flusso di taglio tra gli strati di calcestruzzo (interfaccia non rinforzata). In questo caso, gli strati di calcestruzzo si comportano indipendentemente l'uno dall'altro. Questa, in realtà, è una semplificazione perché anche nel caso di un'interfaccia non rinforzata con connettori, tra gli strati di calcestruzzo si genera comunque una connessione per adesione non dovuta a quest'ultimi. Tuttavia, tale legame adesivo, è già compromesso quando si arriva a deformazioni relative tra 0,03 mm e 0,05 mm a causa delle fessurazioni tra l'interfaccia dei due elementi in calcestruzzo.

Il cedimento dell'adesione può verificarsi anche anni dopo l'installazione del nuovo strato di calcestruzzo. Quando ciò si verifica, le forze di trazione create devono essere assorbite da connettori post installati posizionati attraverso l'interfaccia.

Ciò consente, ad esempio, di ampliare in una sezione trasversale le zone di compressione e/o di trazione dovute alla flessione (rinforzo strutturale) o di ripristinare le altezze originarie di queste zone tese e/o compresse (ristrutturazione), vedere la Figura 3b.

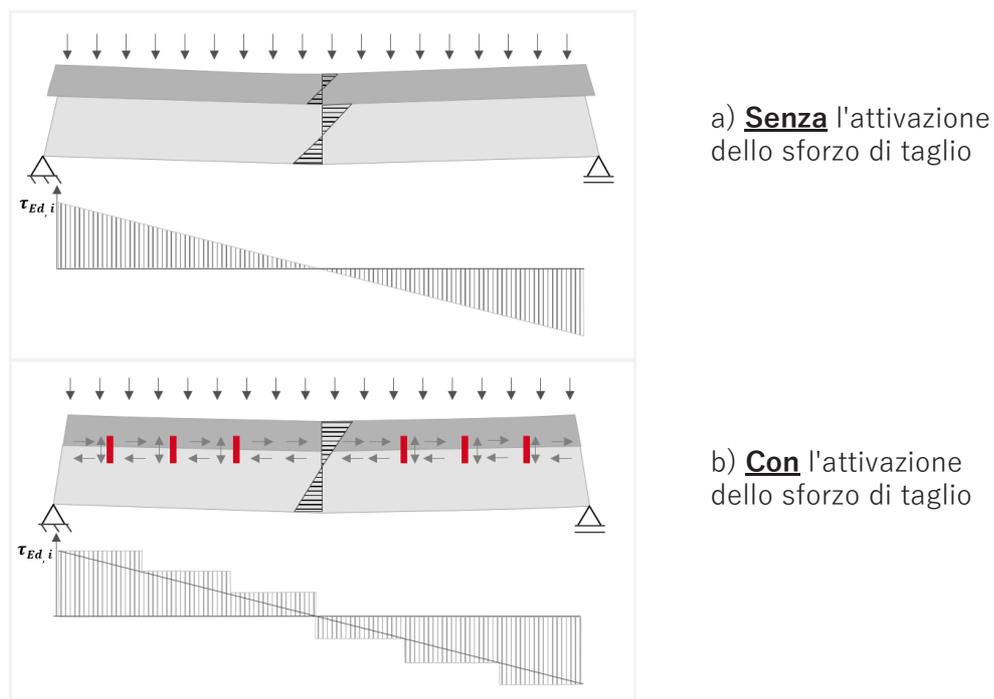


Figura 3. Trave con e senza l'attivazione degli sforzi di taglio nell'interfaccia.

Il nuovo concetto di progettazione secondo EOTA TR 066 "*Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers*" [2] consente la progettazione e il dimensionamento di questi collegamenti e dell'interfaccia tenendo conto di tutti i componenti della capacità portante (attrito, ingranamento degli aggregati ed effetto spinotto) e altri fattori specifici del prodotto.

Diversamente dalla norma EN 1992-1-1 (EC2) [1], tiene conto del comportamento del singolo connettore per quanto riguarda la capacità di carico. Pertanto, l'EOTA TR 066 [2] riflette l'attuale stato dell'arte nella progettazione di applicazioni Overlay con connettori post-installati.

Nella Figura 4 è mostrata l'evoluzione normativa fino ad arrivare, a EOTA TR 066 [4] nel 2019. Novembre 2020 è stato pubblicato un aggiornamento di questa ultima.

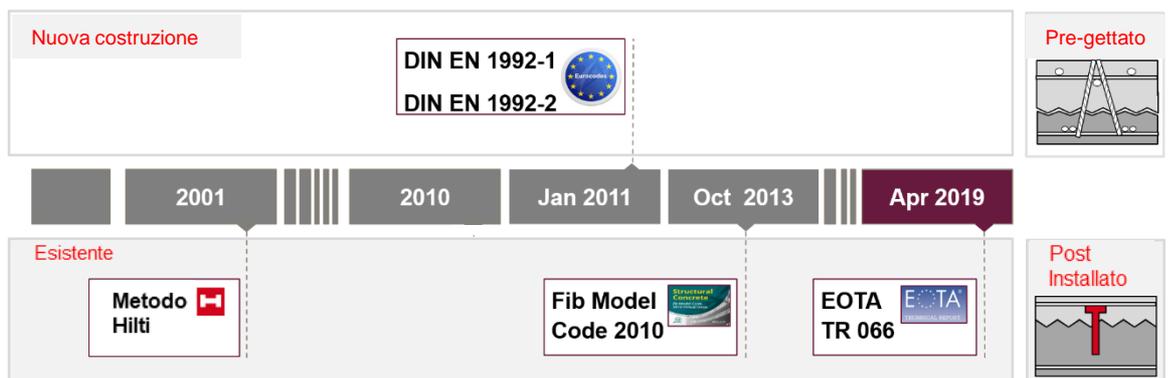


Figura 4. Evoluzione normativa dei connettori post-installati fino ad arrivare all'attuale metodo di progettazione secondo EOTA TR 066 [2].

2 Fasi di lavorazione in cantiere e portafoglio prodotti

L'intervento *Overlay* con sovrapposizione del calcestruzzo può essere tipicamente diviso in diverse fasi: la demolizione o l'esposizione dello strato di calcestruzzo esistente danneggiato, l'irruvidimento della superficie, l'installazione di connettori post-installati, l'inserimento delle nuove armature di rinforzo e infine il getto del nuovo strato di calcestruzzo (Fig. 5).

Prima di descrivere l'approccio progettuale di EOTA TR 066 [2], forniamo alcuni importanti consigli sulla preparazione della superficie e la successiva installazione dei connettori, come descritto in parte in EOTA TR 066 [2].

A seconda del paese, sono ovviamente da considerare ulteriori linee guida tecniche locali in combinazione con le linee guida e le normative internazionali.



Figura 5. Panoramica semplificata delle fasi di esecuzione di una misurazione di costruzione con sovrapposizione.

2.1 Preparazione della superficie e installazione dei connettori post-installati

L'irruvidimento della superficie viene solitamente eseguito mediante getto d'acqua ad alta pressione. Questo anche per evitare ad esempio, microfessurazioni che possono verificarsi durante l'irruvidimento con fresatura con conseguente danneggiamento della struttura del calcestruzzo. Gli aggregati esposti che devono essere chiaramente visibili [2] e la profondità media di rugosità richiesta R_t deve corrispondere al valore minimo richiesto.

La stessa profondità di rugosità media deve essere determinata secondo il metodo di Kaufmann (sand patch) o mediante una misurazione elettronica ottica [2]. L'idoneità del calcestruzzo vecchio irruvidito deve essere verificata misurando la resistenza coesiva perpendicolare all'interfaccia (resistenza a trazione adesiva) f_h , per cui si deve ottenere almeno il valore di $f_h \geq \min(1,5 \text{ N/mm}^2; f_{ctm})$ [2]. I test per la misurazione della profondità di rugosità e della resistenza a trazione adesiva devono essere eseguiti secondo EOTA TR 066 [2], tenendo conto anche di ulteriori linee guida, codici o normative per la costruzione. In particolare, per la misurazione della profondità della rugosità, possono essere utilizzate a favore di sicurezza le aree meno irruvidite.

2.1.1 Requisiti per la pulizia dell'interfaccia

La sequenza di lavoro deve essere organizzata in modo che l'interfaccia resti sempre pulita dal momento dell'irruvidimento finché non viene gettato il calcestruzzo [2]. L'abrasione da pneumatici (passaggio mezzi da cantiere) e la contaminazione della superficie devono essere evitati il più possibile. Particolare attenzione deve essere prestata alla polvere dovuta al processo di perforazione per l'installazione dei connettori. La pulizia deve essere eseguita secondo le istruzioni del produttore del connettore. La superficie deve rimanere pulita senza polvere [2]. Metodi di pulizia automatica con punte cave se previste nelle certificazioni del prodotto sono raccomandati. Se il foro deve essere pulito con aria compressa, il flusso dell'aria deve essere privo di olio [2].

2.1.2 Post-trattamento della superficie irruvidita

L'interfaccia pulita deve essere mantenuta umida per diversi giorni prima di posizionare il calcestruzzo. Il giorno della posa del calcestruzzo, tutte le pozze d'acqua, indipendentemente dalle loro dimensioni, devono essere aspirate [2]. Al momento del getto del calcestruzzo, la superficie deve essere leggermente asciutta (satinata) [2] per supportare l'idratazione del calcestruzzo fresco nell'area dell'interfaccia.

2.1.3 Connettori post-installati

È disponibile un'ampia gamma di connettori post-installati. Si può fare una distinzione tra i sistemi con ancorante a vite per calcestruzzo e i sistemi con ancoraggio chimico.

L'installazione di un connettore a vite, ad es. Hilti HUS4, avviene in tre fasi. Innanzitutto, viene praticato un foro nel calcestruzzo esistente, idealmente senza polvere, utilizzando una punta cava, ad es. una punta cava Hilti. In alternativa si può eseguire la perforazione a percussione standard e conseguente pulizia in conformità alla valutazione ETA. Il certificato ETA descrive anche le situazioni d'installazione in cui la pulizia del foro di con i connettori Hilti può essere completamente omessa. L'ancorante a vite viene inserito poi con un speciale avvitatore a impulsi. La profondità di perforazione viene generalmente eseguita in una misura leggermente superiore a quella della profondità di avvitamento in modo da creare spazio alla polvere e ai detriti derivanti dal processo di foratura di depositarsi a fondo foro.

Grazie al taglio filettato nel calcestruzzo, questo connettore può anche essere regolato in altezza in una certa misura (Figura 6).


 HCC-**HUS4**

HCC-K

HCC-HAS-U

HCC-B

 Figura 6. Installazione di connettori Hilti (HCC -**H**ilti **C**oncrete **C**onnecto**r**)

I connettori post-installati di tipo "ancoraggio chimico" sono elementi speciali o elementi standard provvisti di accessori aggiuntivi, ad es. HCC-B (elemento speciale, ottimizzato per il posizionamento del rinforzo e l'installazione (Figura 6), HCC-K (barra di rinforzo con testa (elemento speciale)) e HCC-HAS-U (barra filettata con rondella e dado (elemento standard)).

Indipendentemente dall'elemento, viene praticato un foro nel calcestruzzo esistente e la polvere di foratura deve essere rimossa durante la perforazione, come descritto sopra. A tale scopo, Hilti offre la tecnologia SafeSet grazie alla quale la polvere viene aspirata automaticamente durante il processo di perforazione e il foro viene pulito in conformità con la valutazione ETA. La resina viene iniettata nel foro con un dispenser pneumatico, a batteria o manuale prima che l'elemento d'acciaio venga inserito nel foro.

Invece, quando si utilizza il connettore post-installato HCC-B, l'elemento può essere martellato automaticamente nel foro prima che venga iniettata la resina. In questo modo, il connettore Hilti HCC-B consente di iniettare la resina dopo le misure di livellamento attraverso la sezione trasversale cava.

Nella Figura 7 viene fornita una panoramica dei vari connettori Hilti che si possono trovare nei vari mercati europei e delle loro proprietà tecniche. Sicuramente uno dei aspetti principali che guida la scelta è la conformità del prodotto con riferimento alle condizioni di carico. Il connettore HCC-HUS4 è certificato ETA anche per carichi sismici.

	HCC-HUS4	HCC-K	HCC-HASU	HCC-B
Tipo di carico?	▪ statico, sismico	▪ statico	▪ statico	▪ statico + dinamico
Pronto per sostenere il carico?	▪ Immediatamente	▪ una volta indurita la resina	▪ una volta indurita la resina -	▪ Immediatamente caricabile (1 kN)
Diametro?	▪ 8, 10, 14, 16	▪ 10, 12, 14, 16	▪ da 8 a 30	▪ 14
ETA?	▪ Sì (anche sismico)	▪ sì	▪ sì	▪ sì (anche di fatica)
Resina?	▪ Non necessaria	▪ RE500 V4, HY200-RV3	▪ RE500 V4, HY200-R V3, HY170	▪ RE500 V4
Spessore min. calcestruzzo esistente	▪ 100 mm ($\varnothing = 8$ mm)	▪ 100 mm ($\varnothing = 10$ mm)	▪ 100 mm ($\varnothing = 10$ mm)	▪ 127 mm
Spessore min. nuovo getto	▪ ≥ 48 mm + c_{nom} (hef min., $\varnothing = 8$ mm)	▪ ≥ 42 mm + c_{nom} (valore min., $\varnothing = 10$ mm) x	▪ ≥ 44 mm + c_{nom} (hef min., $\varnothing = 8$ mm)	▪ ≥ 75 mm

Figura 7. Panoramica dei connettori Hilti HCC (connettori per calcestruzzo Hilti) e delle loro proprietà tecniche per la progettazione della capacità di taglio dell'interfaccia secondo EOTA TR 066 [2].

3 Comportamento e capacità portante dell'interfaccia

Il comportamento dell'interfaccia sottoposta a sforzi di taglio longitudinali può essere descritto utilizzando la teoria dell'attrito di taglio. Va notato, tuttavia, che il termine "teoria dell'attrito di taglio" può essere fuorviante in quanto include diverse fasi di sviluppo.

La teoria è stata sviluppata intorno al 1960 da Birkeland e Birkeland [5] e presuppone che il meccanismo di trasmissione degli sforzi di taglio in un'interfaccia che è soggetta simultaneamente a forze di taglio e compressione sia assicurato solo dall'attrito. Generalmente, per illustrare i principi di base di questa teoria viene utilizzato un semplice modello a dente di sega (Figura 8).

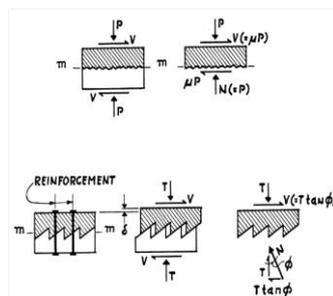


Figura 8. "Teoria dell'attrito di taglio" nel modello a dente di sega 1960 di Birkeland e Birkeland [5].

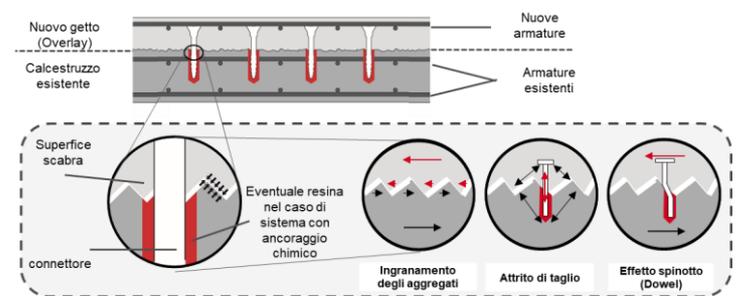


Figura 9. Trasferimento degli sforzi di taglio nel giunto composito rinforzato: coesione/interblocco, attrito ed effetto perno utilizzando l'esempio del connettore antispostamento HCC-K.

Nel 1972, è stata ampliata da Mattock e Hawkins [6] includendo la componente della capacità portante della coesione. Nel 1978, nella teoria è stata inclusa la resistenza alla compressione del calcestruzzo da Loov [7]. Infine, Randl [8] descrive che il trasferimento del taglio nel giunto composito rinforzato consiste di tre meccanismi principali: coesione, attrito ed effetto spinotto. Questi tre meccanismi principali sono chiaramente descritti nella Figura 9. Nella Figura 10 è mostrata la curva dello sforzo di taglio in funzione dello spostamento relativo dei singoli meccanismi della capacità portante ossia adesione/ingranamento τ_{adh} , attrito τ_{sf} e armatura a taglio τ_{sr} (Zilch e Reinecke [9]).

La componente di adesione τ_{adh} è dovuta al legame adesivo tra le particelle del vecchio e del nuovo calcestruzzo. Quando si raggiunge la massima capacità portante adesiva, si verifica il distacco all'interfaccia tra gli strati di calcestruzzo e gli sforzi di taglio vengono trasferiti tramite ingranamento meccanico dovuto alla rugosità superficiale.

Con l'aumentare dello spostamento relativo tra gli strati di calcestruzzo, i connettori che attraversano l'interfaccia vengono sottoposti a sollecitazioni e possono cedere per snervamento dell'acciaio, per estrazione o per altri possibili meccanismi di rottura. A causa della resistenza dei connettori e dello spostamento relativo tra gli strati in calcestruzzo, l'interfaccia è soggetta a compressione e le forze di taglio vengono trasmesse per attrito (τ_{sf}). Lo spostamento relativo tra gli strati di calcestruzzo causa anche uno sforzo di taglio nel connettore che solitamente viene definito come effetto spinotto (*dowel*) (τ_{sr}).

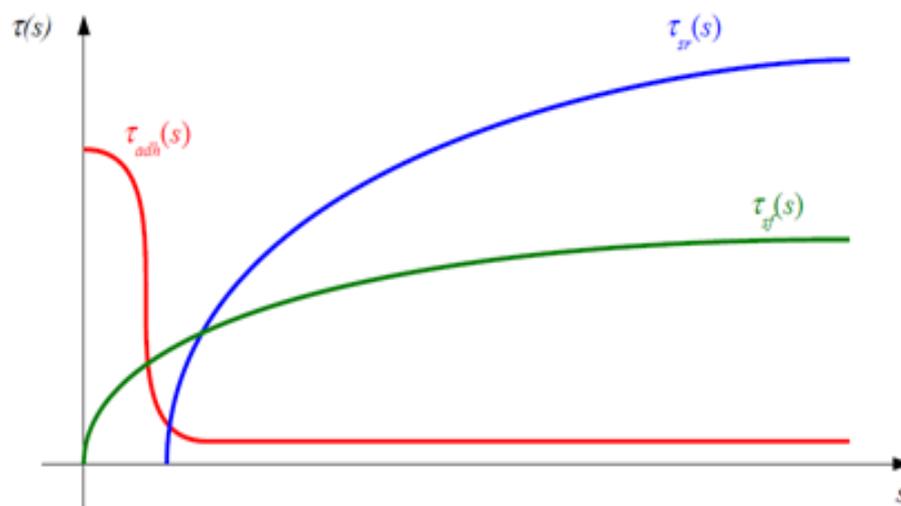


Figura 10. Curva dello sforzo di taglio in funzione dello spostamento relativo per i singoli meccanismi della capacità portante (adesione/interblocco τ_{adh} , attrito τ_{sf} e effetto spinotto del connettore τ_{sr} (Zilch e Reinecke [9])).

Con l'aumentare della scabrezza della superficie, sia resistenza sia la rigidità al taglio del giunto composito aumentano considerevolmente. Inoltre, la distribuzione della resistenza totale tra i tre componenti della capacità portante cambia. Nel caso estremo, quando l'interfaccia è molto ruvida, i connettori in corrispondenza del giunto sono soggetti principalmente a sollecitazioni di trazione, mentre con un'interfaccia liscia è predominante l'effetto spinotto.

4 Progettazione di sovrapposizione di strati in calcestruzzo secondo EOTA TR 066

4.1 Azioni

4.1.1 Azione statica e quasi-statica

4.1.1.1 Forze esterne

Per determinare lo sforzo di taglio agente, la forza di taglio esterna applicata $V_{Ed,i}$ viene convertita dalla seguente equazione in uno sforzo di taglio $\tau_{Ed,i}$ che agisce in parallelo all'interfaccia in una determinata sezione i :

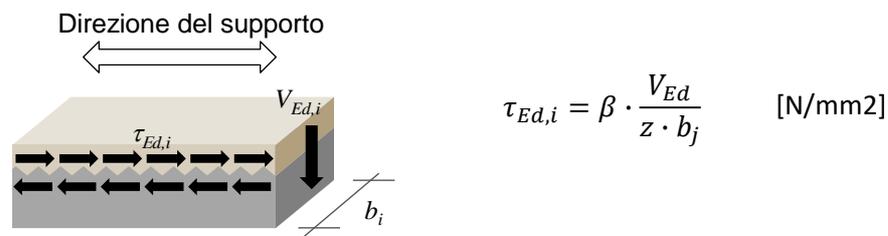


Figura 11. Conversione della forza esterna di taglio (azione) $V_{Ed,i}$ in uno sforzo di taglio $\tau_{Ed,i}$ che agisce in parallelo all'interfaccia del giunto composito.

Con:

β = rapporto tra la forza longitudinale nel nuovo calcestruzzo e la forza longitudinale totale nella zona in compressione o in trazione, per la sezione presa in esame, vedere Figura 12;

$V_{Ed,i}$ = azione esterna agente; forza di taglio;

b_i = larghezza della zona presa in considerazione;

z = lunghezza della leva delle forze interne;

Queste aree o zone di lunghezza " l_i " possono essere definite in base alla distribuzione dello sforzo di taglio dovuto al carico esterno (ovvero la distribuzione della forza di taglio nell'elemento), per cui è determinante il massimo sforzo di taglio all'interno della zona. Il rapporto tra la forza longitudinale nel nuovo calcestruzzo e la forza longitudinale totale nella zona in compressione o in trazione (coeff. β) dipende dall'altezza del nuovo strato di calcestruzzo rispetto all'altezza della zona di compressione del calcestruzzo (momento flettente positivo, vedere Figura 12).

Invece x , nella Figura 12, è l'altezza dell'area di compressione del calcestruzzo, $A_{s,N}$ è l'area della sezione trasversale del rinforzo nel nuovo strato di calcestruzzo, $A_{s,E}$ è l'area della sezione trasversale del rinforzo nel calcestruzzo esistente, h_N è l'altezza del nuovo strato di calcestruzzo ed h_E è l'altezza del calcestruzzo esistente ("vecchio").

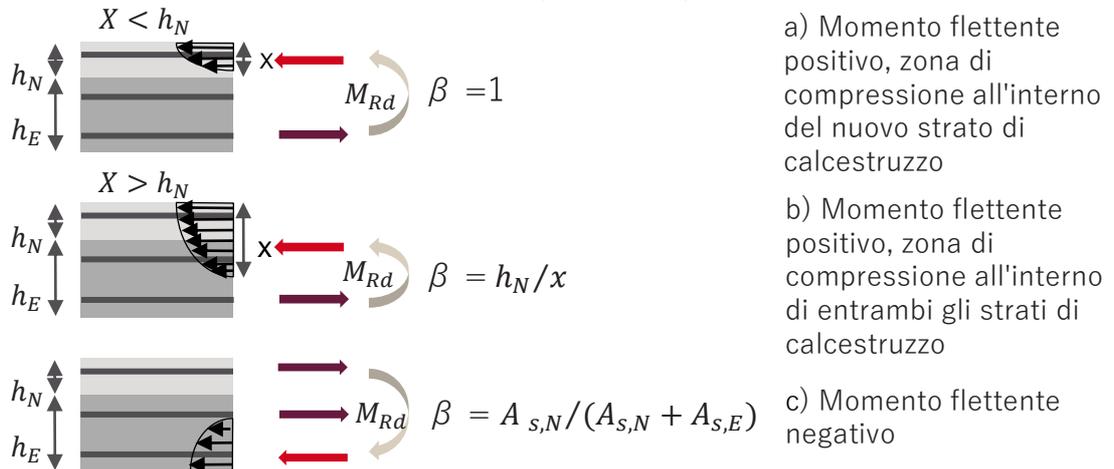


Figura 12. Determinazione del rapporto tra la forza longitudinale nel nuovo calcestruzzo e la forza longitudinale totale (β), considerando diverse condizioni al contorno.

4.1.1.2 Forze interne imposte

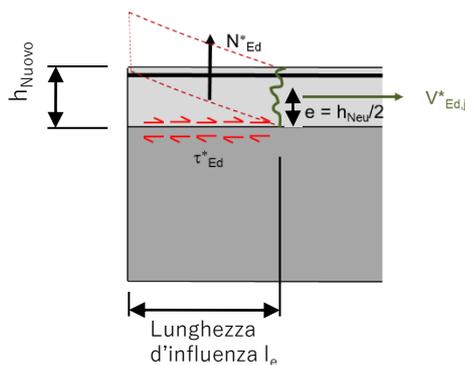


Figura 13. Schema delle forze di sollevamento dovute al ritiro secondo EOTA TR066 [2].

EOTA TR 066 [2] considera anche le forze interne vincolari lungo il perimetro dovute al ritiro del getto nuovo di calcestruzzo. Questo fenomeno genera sforzi di taglio paralleli al giunto di fissaggio τ_{Ed}^* e forze di sollevamento $N_{Ed,j}^*$ (Fig. 13). Queste forze di sollevamento sono considerate entro una certa lunghezza di influenza l_e lungo l'area perimetrale, che dipende della rugosità della superficie e dell'altezza del nuovo strato di calcestruzzo.

Inoltre, queste forze di sollevamento devono essere inferiori alla resistenza alla trazione N_{Rd} del connettore che tiene conto delle varie modalità di rottura. Più alto è il nuovo strato di calcestruzzo e più ruvida è la superficie di calcestruzzo, maggiore sarà la lunghezza l_e che deve essere presa in considerazione.

Va notato che in EOTA TR 066 [2], le forze vincolari non vengono combinate con i carichi agenti delle forze esterne. In questo caso, per la verifica, viene preso in considerazione lo sforzo di taglio dovuto alle forze vincolari oppure lo sforzo di taglio applicato derivante da azioni esterne nell'interfaccia, per cui il valore massimo dello sforzo di taglio tra i due risulta essere decisivo: ($\tau_{Ed} = \max.(\tau_{Ed,i}; \tau_{Ed}^*)$).

4.1.2 L'azione ciclica - Fatica

La resistenza a fatica di materiali o componenti è generalmente determinata in via sperimentale con prove di carico cicliche in cui viene applicata un'azione di pura fatica senza azioni statiche. Anche nei casi in cui le azioni sono costituite da una combinazione di azioni cicliche a fatica e azioni statiche, è necessario tenerne conto poiché ciò influisce sulla resistenza a fatica dell'interfaccia. Di conseguenza, EOTA TR 066 [2] classifica l'azione di fatica generata da un carico ciclico nel giunto in base a 3 situazioni (Figura 14):

Situazione 1	Situazione 2	Situazione 3
<p>Lo sforzo di taglio ciclico applicato $\Delta \tau_{Ed}$ deriva da un'azione a fatica senza la componente statica (azione pulsante-stessa direzione). Il carico ciclico inferiore assume il valore zero ($\Delta \tau_{Ed, \min} = 0$).</p>	<p>Lo sforzo di taglio ciclico applicato $\Delta \tau_{Ed}$ deriva da un'azione statica e un'azione a fatica (azione pulsante-stessa direzione). Il carico ciclico inferiore è maggiore di zero ($\Delta \tau_{Ed, \min} > 0$).</p>	<p>Lo sforzo di taglio ciclico agente $\Delta \tau_{Ed}$ deriva da un'azione a fatica alternata che cambia direzione. Il carico ciclico inferiore è minore di zero ($\Delta \tau_{Ed, \min} < 0$).</p>

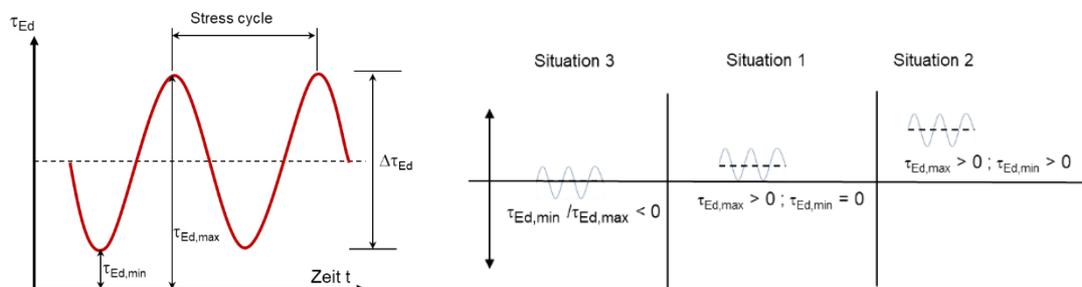


Figura 14. Designazione e categorizzazione dell'azione ciclica secondo EOTA TR 066.

4.1.3 Azione sismica

In condizioni sismiche, l'interfaccia è progettata per lo stato limite ultimo con il carico massimo risultante dalle combinazioni di carico ($V_{Ed,i,seis}$) secondo EN 1998-1:2004 (EC8) [10]. Nel determinare il carico sismico che agisce sull'interfaccia rinforzata con connettori devono essere prese in considerazione anche eventuali ulteriori condizioni al contorno specifiche dell'applicazione di rinforzo strutturale (lastra, parete, trave, struttura del telaio).

4.2 Resistenza a taglio dell'interfaccia

4.2.1 Resistenza statica, quasi-statica

Due condizioni applicative sono definite per il calcolo della resistenza a taglio dell'interfaccia R_d

4.2.1.1 Resistenza di progetto a taglio senza connettori (non rinforzata)

Questa prima condizione si applica ad un'interfaccia priva di connettori post-installati, dove si può presumere un buon legame tra i strati di calcestruzzo e che non si verificano sollecitazioni di trazione perpendicolari al giunto. In questo caso, la resistenza a taglio all'interfaccia tra calcestruzzi gettati in tempi diversi viene garantita dal legame adesivo (n. 1 nella Figura 15) e l'attrito dovuto a eventuale sforzo normale di compressione da sollecitazioni esterne (n. 2 nella Fig. 15), senza considerare il contributo dei connettori. I coefficienti corrispondenti dipendono dalla rugosità del giunto e sono riportati in EOTA TR 066 [2].

La resistenza a taglio è limitata dal puntone di compressione del calcestruzzo (n. 3 nella Fig. 15). La massima resistenza a taglio in questo caso è di circa il 30 % del valore della resistenza di progetto a compressione cilindrica del calcestruzzo.

$$\tau_{Rd} = \underbrace{c_a \cdot f_{ctd}}_1 + \underbrace{\mu \cdot \sigma_n}_2 \leq \underbrace{0,5 \cdot v \cdot f_{cd}}_3$$

Figura 15. Condizione applicativa I: Resistenza a taglio senza connettori (non rinforzata)

Se la condizione $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd}$ è soddisfatta, i connettori post-installati sono necessari solo sul bordo perimetrale a causa del ritiro (cfr. 4.1.1.2). Se la condizione $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd}$ non è soddisfatta, sono necessari connettori post-installati nell'area del bordo e lungo l'interfaccia.

4.2.1.2 Resistenza di progetto a taglio con connettori (rinforzata)

La seconda condizione si applica nel caso in cui è consentito lo spostamento relativo nell'interfaccia e vengono utilizzati connettori post-installati. Di conseguenza, la progettazione della capacità di taglio dell'interfaccia include i meccanismi di ingranamento (*interlock*) (n. 1 nella Figura 16), attrito (*friction*) (n. 2 nella Figura 16) ed effetto spinotto (*dowel*) (n. 3 nella Figura 16).

$$\tau_{Rd} = \underbrace{c_r * f_{ck}^{\frac{1}{3}}}_{\text{1 Ingranamento}} + \underbrace{\mu * (\sigma_n + \kappa_1 * \alpha_{\kappa 1} * \rho * \sigma_s)}_{\text{2 Attrito}} + \underbrace{\kappa_2 * \alpha_{\kappa 2} * \rho * \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\gamma_s} * \frac{0,85 * f_{ck}}{\gamma_c}}}_{\text{3 Effetto spinotto}} \leq \underbrace{\beta_c * v * \frac{0,85 * f_{ck}}{\gamma_c}}_{\text{4 Limite puntone calcestruzzo}}$$

Figura 16. Condizione applicativa II: Resistenza a taglio dell'interfaccia rinforzata secondo EOTA TR 066 [2].

L'ingranamento meccanico (non il legame per adesione) è descritto dall'espressione " $c_r \cdot f_{ck}^{1/3}$ " nel caso di un'interfaccia rinforzata con connettori e tiene conto della resistenza a compressione del calcestruzzo e della scabrezza della superficie. Il coefficiente c_r assume valori compresi tra 0 e 0,2. Si noti che rispetto alla condizione applicativa 1, la resistenza dovuta al legame adesivo tra i due strati rappresentata dal coefficiente c_a è sostituita dal coefficiente che tiene conto dell'ingranamento meccanico c_r .

Con l'aumento dello spostamento relativo tra i strati di calcestruzzo, questi tendono a separarsi ulteriormente. I connettori post-installati contrastano questa separazione e si sollecitano a trazione, sviluppando così forze di compressione tra le superfici, con conseguente aumento attrito tra esse. Inoltre, le forze di compressione possono anche essere causate da forze esterne, che vengono prese in considerazione da σ_N . Tuttavia, i connettori possono essere caricati solo fino al raggiungimento della resistenza massima a trazione. Questa resistenza massima coincide con la resistenza a trazione dei connettori che viene determinata considerando il meccanismo di rottura più stringente. Inoltre, questa stessa resistenza determina anche la sollecitazione dell'acciaio σ_s (Figura 17).

Il coefficiente $\alpha_{\kappa 1}$ considera la percentuale di attivazione della forza di trazione che agisce sul connettore. Per le superfici lisce $\alpha_{\kappa 1} = 0$. L'effetto spinotto è causato dallo spostamento relativo di entrambi gli strati di calcestruzzo. In queste condizioni e in funzione del valore dello spostamento relativo, i connettori sono soggetti a sforzi di taglio (oltre allo sforzo di trazione dovuto all'attrito) e alle sollecitazioni di flessione.

Aumentando il carico, il calcestruzzo vicino alla superficie all'interno dell'interfaccia viene danneggiato e, di conseguenza, la resistenza risultante viene ridistribuita più in profondità nel calcestruzzo. Ciò aumenta l'eccentricità tra la forza di taglio e la risultante di compressione sul connettore, con conseguenti sollecitazioni di flessione nel connettore. Il fattore α_{k2} tiene conto di ciò come capacità di carico a flessione ed è un coefficiente specifico del prodotto (valutazione ETA).

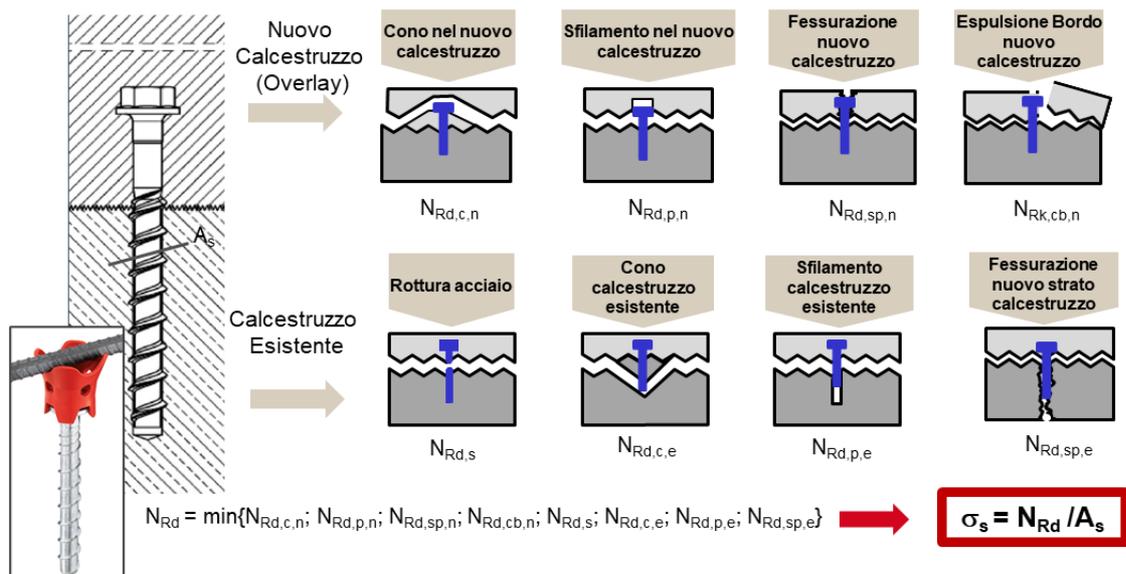


Figura 17. Esempio relativo a un connettore a vite. Lo sforzo a trazione che raggiunge il connettore σ_s è funzione della modalità di rottura dimensionante.

4.2.2 Resistenza a fatica

La determinazione della resistenza a fatica del giunto a taglio secondo EOTA TR 066 [2] si basa su una serie di prerequisiti. Una verifica a fatica è possibile solo se la superficie è classificata come molto scabra ($R_t \geq 3,0$ mm). I requisiti per la classe di resistenza del calcestruzzo esistente e del nuovo getto vengono riportati nella valutazione ETA del prodotto. In genere per il nuovo strato di calcestruzzo viene richiesta una classe di resistenza di almeno C40/50, mentre per lo strato di calcestruzzo esistente viene richiesto almeno una classe di resistenza C30/37.

Se queste condizioni al contorno sono soddisfatte, la resistenza a taglio sotto carico di fatica può essere determinata moltiplicando la resistenza sotto carico statico con un fattore di riduzione η_{sc} ed espressioni matematiche aggiuntive a seconda della classificazione del carico di fatica, cfr. Sezione 4.1.2. L'esempio seguente si applica al caso di un carico di fatica puro (cfr. Figura 4.1.2).

$$\Delta \tau_{Ed} \leq \eta_{sc} \cdot \tau_{Rd}$$

Per le situazioni in cui un'azione a fatica è sovrapposta ad un'azione statica, la riduzione viene eseguita secondo il diagramma di Goodman fornito in EOTA TR 066 [2]. Il diagramma di Goodman tiene conto dell'influenza di un carico statico sulla resistenza alla fatica. Ulteriori dettagli sono disponibili in EOTA TR 066 [2].

4.2.3 Resistenza sismica

La determinazione della resistenza sismica del giunto si basa su diverse condizioni al contorno. Le interfacce non rinforzate sotto l'azione sismica non sono coperte da EOTA TR 066 [2], inoltre non è consentita una superficie molto liscia ai sensi di EOTA TR 066 [2].

La resistenza a taglio sotto l'azione sismica è descritta dagli stessi parametri dell'azione statica ma con valori diversi - riferimento Tabella 3.2 EOTA TR 066 [2]. La componente della capacità portante per coesione/ingranamento viene trascurata e la resistenza a taglio totale del giunto viene ulteriormente ridotta di un fattore α_{seis} dipendente dal prodotto. Questo fattore è specificato nell'ETA relativo al prodotto.

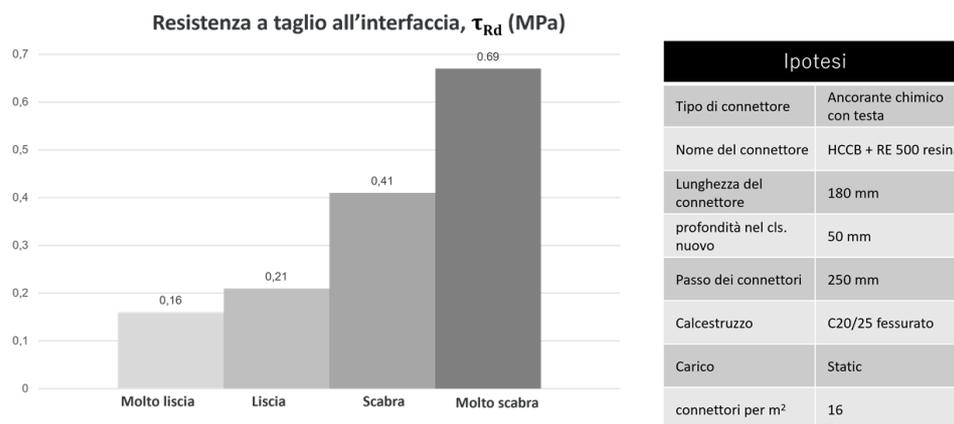
Le verifiche locali dei connettori, sia lato acciaio che lato rotture calcestruzzo ($N_{Rd,s}$; $N_{Rd,c}$; $N_{Rd,p}$; $N_{Rd,sp}$; $N_{Rd,cb}$), devono essere effettuate assumendo una categoria di performance sismica (C1 o C2 in funzione del livello di sismicità e della classe d'importanza della struttura, vedere EN 1992-4 [11]).

Inoltre, deve essere stabilita una relazione tra la modalità di cedimento determinante e il comportamento desiderato dell'interfaccia (modalità di cedimento duttile lato acciaio vs. modalità di cedimento fragile).

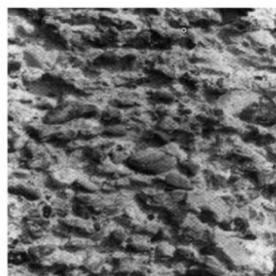
5 Un parametro chiave che influisce sulla capacità a taglio del giunto: la scabrezza R_t

La Figura 18a mostra la resistenza a taglio di un'interfaccia rinforzata, calcolata secondo EOTA TR 066 [2], in funzione della categoria di scabrezza superficiale. Nel esempio, la connessione tra i due strati di calcestruzzo viene eseguito con il connettore post-installato Hilti HCC-B in combinazione con il sistema di iniezione Hilti HIT-RE 500 V4. Il sistema è provvisto di documento di valutazione Europeo (ETA).

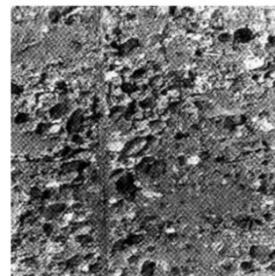
Modificando la classificazione del giunto da "liscio" a "scabro", la resistenza a taglio del giunto approssimativamente raddoppia passando da $0,21 \text{ N/mm}^2$ a $0,41 \text{ N/mm}^2$. Per la classificazione "molto ruvido" del giunto, la resistenza a taglio calcolata del giunto è più di quattro volte la resistenza al taglio originale ("molto liscio").



a) Esempio di variazione della resistenza a taglio nel giunto rinforzato in funzione della scabrezza



b) Getti d'acqua 1500 bar
 $\rightarrow R_t = 3,3 \text{ mm}$ (molto ruvido)



c) Getti d'acqua 1500 bar
 $\rightarrow R_t = 0,8 \text{ mm}$ (liscio)

Figura 18. Resistenza a taglio del giunto composito rinforzato in funzione della scabrezza della superficie e delle diverse profondità di scabrezza con metodi di irruvidimento identici (getti d'acqua).

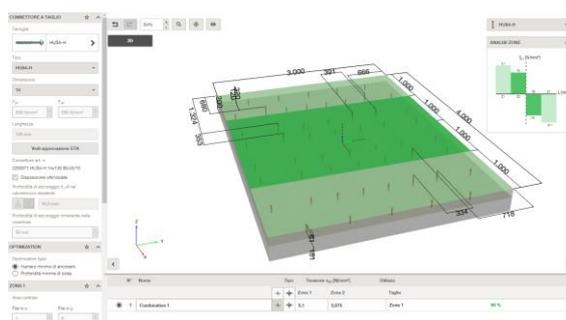
Ovviamente per avere un impatto importante nella resistenza ci si deve assicurare che la scabrezza sia quella necessaria. Sfortunatamente, la specifica del metodo di lavorazione non è necessariamente sufficiente per garantire la profondità di scabrezza richiesta. Le Figure 18a e 18b mostrano i risultati della profondità di scabrezza per metodi di irruvidimento identici. Di conseguenza, si può affermare che, non il metodo, ma la profondità di scabrezza R_t dovrebbe essere specificata come parametro decisivo.

6 Consigli pratici sulla progettazione: le differenze principali tra EN 1992-1-1 e EOTA TR 066

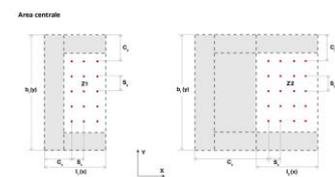
Non tutti i connettori post-installati possono essere usati per tutte le condizioni progettuali, vedere Figura 7. Scegliere il prodotto giusto può essere difficile. Il modo più semplice per fare la scelta giusta è quello di utilizzare il software di progettazione PROFIS Engineering di Hilti, disponibile sia nella versione standard gratuita che in quella premium, in combinazione con il modulo Overlay - sovrapposizione di strati di calcestruzzo.

In questo software, le esigenze specifiche del progetto possono essere inserite nel giusto contesto insieme ai requisiti di progettazione conformi a EOTA TR 066 [2] e ai prodotti tecnicamente corretti. Inoltre, PROFIS Engineering offre i seguenti vantaggi aggiuntivi per la progettazione della sovrapposizione del calcestruzzo secondo EOTA TR 066 [2]:

- PROFIS Engineering ottimizza automaticamente i risultati. È possibile stabilire se ottimizzare il progetto per quanto riguarda il numero minimo di connettori o la loro profondità di posa minima.
- PROFIS Engineering tiene conto delle azioni statiche, delle azioni di fatica e delle azioni sismiche secondo EOTA TR 066 [2].
- PROFIS Engineering fornisce un report di progettazione chiaro e comprensibile e informazioni sulla posizione dei connettori post-installati in forma tabellare.



a) Modulo sovrapposizione strati calcestruzzo di PROFIS Engineering



Nota
Le zone aggiuntive non sono mostrate, ma seguono la stessa logica rispetto alla zona in corso.

l_x : Interasse in direzione x tra 2 connettori per una ripetuta zona
 l_y : Interasse in direzione y tra 2 connettori per una ripetuta zona
 l_{x1} : Distanza dal bordo in direzione x per una ripetuta zona
 l_{x2} : Distanza dal bordo in direzione y per una ripetuta zona
 l_{x3} : Lunghezza di una ripetuta zona
 l_{x4} : Larghezza di una ripetuta zona

Zona	Larghezza zona l_x (mm)	Lunghezza zona l_y (mm)	Distanziamento in direzione x l_{x1} (mm)	Distanziamento in direzione y l_{y1} (mm)	Distanza massima in direzione x l_{x2} (mm)	Distanza massima in direzione y l_{y2} (mm)	Numero di connettori
Z1	1.000	1.000	0	350	650	650	6
Z2	1.000	1.000	350	350	650	750	10
Z3	1.000	1.000	0	350	650	650	6
Z4	1.000	1.000	350	350	650	750	10
Numero totale di							32

b) Report di progettazione (estratto)

Figura 19. Implementazione di EOTA TR 066 [2] in PROFIS Engineering.

Ottieni l'accesso al software gratuito – [PROFIS Engineering](#)

Mentre la norma EN 1992-1-1 (EC2) [1] considera solo la coesione, le sollecitazioni esterne e l'attrito, il nuovo rapporto EOTA TR 066 [2] considera anche l'effetto spinotto dei connettori post-installati.

Inoltre, la norma EN 1992-1-1 (EC2) [1] presuppone un'armatura che attraversa l'interfaccia (compresa l'ordinaria armatura a taglio se presente) sufficientemente ancorata ad entrambi i lati dell'interfaccia. Per questo motivo lo snervamento dell'acciaio è considerato la modalità di cedimento determinante. Al contrario, EOTA TR 066 [2] considera le singole modalità di cedimento dei connettori post-installati. Di conseguenza, quando si applica la verifica a taglio, viene utilizzata la sollecitazione dell'acciaio σ_s calcolata dalla resistenza progettuale a trazione anziché la tensione di snervamento del connettore. La resistenza a trazione di progettazione è pari alla resistenza minore tra quelle valutate e calcolate tenendo conto di tutti i possibili tipi di rottura secondo EN 1992-4 [11]. Per progettare secondo EOTA TR 066 [2], i prodotti devono essere qualificati ETA secondo il relativo documento di valutazione Europea EAD.

In sintesi, il documento EOTA TR 066 [2] rappresenta lo stato d'arte per la progettazione di rinforzo strutturale tramite strati sovrapposti di calcestruzzo (overlay) con connettori a taglio post-installati.

7 Riepilogo

EOTA TR 066 [2] rappresenta l'approccio più appropriato per la progettazione a taglio di strati sovrapposti di calcestruzzo rinforzati con connettori post-installati.

L'EOTA TR 066 [2] considera i tre principali meccanismi di trasferimento del carico: coesione/ingranamento meccanico, attrito ed effetto spinotto per azione statica, quasi-statica, di fatica e sismica.

Il comportamento della capacità portante dei connettori post-installati è specifico del prodotto e non può essere determinato teoricamente. È determinato in conformità con il Documento di valutazione europeo in base al tipo di connettore da EAD 330232-00-0601 (ancorante a vite per calcestruzzo), EAD 330499-00-0601 (ancorante chimico) e EAD 332347-00-0601 (connettore a taglio). La qualificazione come elemento di fissaggio o ancorante non è quindi sufficiente per una progettazione secondo EOTA TR 066 ma serve anche quella specifica per connettori.

Per facilitare la progettazione di sovrapposizione di strati di calcestruzzo Hilti fornisce un apposito modulo con PROFIS Engineering. In questo software le esigenze specifiche del progetto possono essere inserite nel giusto contesto insieme ai requisiti di progettazione conformi a EOTA TR 066 [2] e ai prodotti tecnicamente corretti.

Fonti

- [1] EN1992-1-1:2020-01 - Eurocodice 2: Design of reinforced and prestressed concrete structures - Part 1-1: General design rules
- [2] EOTA TR 066: EOTA Technical Report, Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers, modificato nel 2020
- [3] FIB ModelCode for Concrete Structures 2010
- [4] EOTA TR 066: EOTA Technical Report, Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers, aprile 2019.
- [5] Birkeland, P.W. e Birkeland, H.W. - Connections in precast concrete construction, American Concrete Institute, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 63, N. 3, pp. 345-368, marzo 1966.
- [6] Mattock, A.H. e Hawkins, N.M. - Shear transfer in reinforced concrete - recent research, Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI Journal, Vol. 17, N. 2, pp. 55-75, marzo-aprile 1972.
- [7] Loov, R.E. - Design of precast connections, Paper presented at a seminar organized by Compa International Pte, Ltd, 8 p., Singapore, settembre 1978.
- [8] Randl, N.: Investigation of force transmission between old and new concrete at different joint roughnesses. Innsbruck, Leopold-Franzens-University Innsbruck, Tesi 1997
- [9] Zilch, K. e Reinecke, R. - Capacity of shear joints between high-strength precast elements and normal-strength cast-in-place decks, FIB International Symposium on High Performance Concrete, Orlando, Stati Uniti, 25-27 settembre 2000.
- [10] EN 1998-1: Eurocodice 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: Basic principles, seismic actions and rules for buildings; versione tedesca EN 1998-1:2004 + AC:2009
- [11] EN 1992-4: Eurocodice 2 - Design of reinforced and prestressed concrete structures - Part 4: Design of anchorage of fixings in concrete, 2019-04