



RINFORZO A TAGLIO DI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO

Affrontare nuovi problemi
con soluzioni conosciute



Versione 1.0
Ottobre 2024

INDICE DEI CONTENUTI

1. Introduzione e contesto.....	2
2. Panoramica del comportamento a taglio del calcestruzzo.....	3
3. Progettazione di elementi in calcestruzzo per il taglio	5
3.1 Principi generali	5
3.2 Progettazione senza armatura a taglio secondo la EN 1992-1-1 e la SIA 262:2013	5
3.3 Progettazione con armatura a taglio secondo la EN 1992-1-1 e la SIA 262:2013	5
4. Approcci per rinforzare le membrature carenti a taglio.....	8
4.1 Aumenta la larghezza e/o l'altezza della sezione	8
4.2 Aumentare la lunghezza del supporto	9
4.3 Aumentare la resistenza alla flessione	9
4.4 Aumentare la resistenza al taglio con i laminati	10
4.5 Armatura post-installata per aumentare la resistenza al taglio	10
4.6 Soluzioni e combinazioni speciali	11
5. Panoramica della qualificazione dell'armatura a taglio post-installata.....	12
6. Progettazione e approccio al dettaglio con barre filettate Hilti HAS / HAS-U.....	13
6.1 Verifica dei puntoni di compressione	13
6.2 Verifica dei puntoni di compressione	15
6.3 Requisiti per il dettaglio dell'armatura di rinforzo	16
7. Esempio di progettazione.....	19
8. Panoramica del modulo di rinforzo a taglio di PROFIS engineering.....	21
9. Soluzioni Hilti per il rinforzo a taglio	22
10. Riepilogo	22
11. Riferimenti	23

1. INTRODUZIONE E CONTESTO

Negli ultimi due decenni, il settore edile è stato sottoposto a un crescente controllo con l'obiettivo di ridurre l'impronta ambientale, nonché a diverse pressioni per riutilizzare il patrimonio edilizio esistente e soddisfare le crescenti esigenze socioeconomiche. Questo fenomeno è più diffuso negli ambienti urbani, dove una parte sostanziale degli edifici e dei ponti con struttura in calcestruzzo armato sta per terminare la propria vita utile e deve essere ristrutturata o demolita. Inoltre, la necessità di rinforzare le strutture può derivare da diversi altri fattori: un cambio di destinazione d'uso o di classe di occupazione, l'espansione dell'impronta dell'edificio, l'introduzione di nuove norme edilizie, la presenza di errori o altre carenze durante l'esecuzione iniziale e la necessità di contrastare altri problemi di durabilità causati da rischi noti come incendi e terremoti.

A seconda delle esigenze del cliente, dello stato attuale della struttura e della sua importanza sociale, culturale e storica, l'ingegnere può ritenere che il rinforzo di un edificio o di un ponte esistente sia la scelta migliore rispetto alla demolizione e alla ricostruzione, con prove che suggeriscono un tempo di ripristino dal 15 al 70% più rapido – il tempo che intercorre tra l'interruzione dell'attività nell'edificio o sul ponte e il suo ritorno in servizio – rispetto alla costruzione di una nuova struttura. Questo vantaggio si aggiunge a una riduzione del 10-75% del carico di risorse grazie al risparmio di manodopera e materiali [1].

Dopo una valutazione locale e globale della struttura esistente, l'ingegnere deve scegliere tra più metodi di rinforzo per risolvere le carenze di trazione, compressione, flessione, taglio, taglio per punzonamento, torsione, ecc. e soddisfare i requisiti di funzionalità. Il rinforzo a livello globale è possibile, ad esempio, utilizzando l'involucro del telaio (ad esempio, pareti di taglio aggiuntive), installando micropali, o installando dispositivi di isolamento della base o di dissipazione dell'energia in caso di carico sismico. Al contrario, il rinforzo di elementi locali e individuali include sovrapposizioni in calcestruzzo, rivestimenti in calcestruzzo, acciaio o polimero rinforzato con fibra (FRP), FRP montato esternamente o vicino alla superficie, post-tensionamento esterno o armatura in acciaio applicata internamente (post-installata) [2]. La maggior parte dei progetti di rinforzo prevede di solito tecniche multiple per resistere efficacemente ai carichi aggiuntivi e trasferirli dal punto di azione alle fondazioni.

In molte parti del mondo, una larga maggioranza degli edifici esistenti e delle infrastrutture civili è attualmente oggetto di rinforzo o è prevista per essere rinforzata, richiedendo quindi una valutazione accurata nell'adozione delle tecniche di intervento più appropriate. Il presente documento fornisce una panoramica sul taglio nel calcestruzzo, riassume i metodi o gli interventi esistenti tipicamente impiegati per rinforzare i singoli elementi in calcestruzzo e presenta la più recente soluzione di rinforzo Hilti, che impiega barre filettate post-installate che si comportano come armature a taglio, che nel 2024 ha ottenuto il permesso generale di costruzione (**aBG**) dal Deutsches Institut für Bautechnik (**DIBt**).

2. PANORAMICA DEL COMPORTAMENTO A TAGLIO DEL CALCESTRUZZO

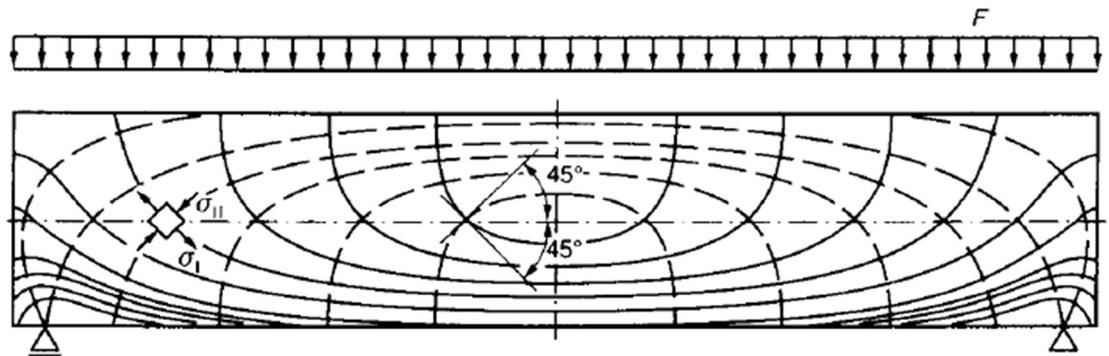


Figura 1: Rappresentazione delle sollecitazioni di trazione e compressione in una trave sotto un carico uniformemente distribuito, rappresentate rispettivamente dalle linee continue e tratteggiate [3].

Una tipica trave, caricata uniformemente lungo la sua lunghezza, genera sollecitazioni di compressione che, a partire dagli appoggi, formano un arco (linee tratteggiate), mentre le sollecitazioni di trazione si distribuiscono secondo una catenaria o una catena sospesa (linee continue). Queste due sollecitazioni principali, indicate con σ_I e σ_{II} , agiscono perpendicolarmente su un elemento quadrato rappresentativo nella Figura 1, generando una sollecitazione di «taglio» lungo i lati dell'elemento se questo viene ruotato in modo che i suoi lati siano paralleli alle direzioni longitudinali e trasversali della trave. La sollecitazione di taglio risultante allunga e comprime gli angoli opposti. La sollecitazione di taglio è massima al centro della profondità della trave, dove è inclinata di $\pm 45^\circ$ rispetto a entrambe le sollecitazioni, e si riduce a zero in prossimità delle superfici superiore e inferiore, dove predominano le sollecitazioni di compressione e trazione.

Poiché il calcestruzzo ha un'elevata resistenza alla compressione ma una bassa resistenza a trazione, ad un certo carico si fessurerà perpendicolarmente alle sollecitazioni di trazione. Per preservare ulteriormente l'integrità della trave, vengono posizionate delle armature per contenere le crepe entro limiti accettabili. Allo stato fessurato, la trave resiste grazie alla combinazione di: (1) calcestruzzo non crepato nella zona di compressione; (2) azione di tassellatura dell'armatura longitudinale eventualmente presente; (3) incastro degli aggregati attraverso le fessure di tensione. Tuttavia, la natura aleatoria di questi tre effetti che agiscono simultaneamente non genera una resistenza a trazione sufficientemente grande da impedire al calcestruzzo di fessurarsi sotto una componente di trazione relativamente piccola dello sollecitazione di taglio, portando a fessure che si sviluppano diagonalmente vicino agli appoggi, dove una spinta significativa verso l'alto esercitata attraverso l'anima della trave resiste al carico applicato verso il basso. Per resistere efficacemente al taglio è necessaria l'aggiunta di un'armatura specifica per il taglio, nota come staffe, collegamenti o tiranti, che si attiva dopo la formazione delle prime crepe diagonali per ridurne l'ampiezza entro limiti accettabili [4].

Insieme all'armatura longitudinale, una trave contenente anche l'armatura di taglio presenta quindi quattro elementi, illustrati dalla Figura 2:

1. Una corda compressa in calcestruzzo a causa della flessione,
2. Una corda di tensionamento di armatura in acciaio sottoposta a tensione a causa della flessione,
3. Puntoni in calcestruzzo in compressione tra le crepe inclinate causate dal taglio, e
4. Tiranti di tensione verticali che collegano le corde di compressione e di tensione.

Questo forma un'analogia travatura composta da puntoni e tiranti, che insieme al modello del campo di sollecitazione fu sviluppata per la prima volta da Mörsch [5] e Ritter [3] all'inizio del 1900, sulla base dei modelli di crepe osservati durante le prove di carico su travi in calcestruzzo armato, e aiuta i progettisti a visualizzare i percorsi di carico.

Più tardi, negli anni '60, la teoria della plasticità ha fornito una base teorica per la progettazione con modelli «a puntoni e tiranti». Secondo questa teoria, qualsiasi stato di equilibrio in un elemento che non

violi le condizioni di plasticità, le quali richiedono deformazioni plastiche fino al cedimento dell'armatura, fornisce una stima inferiore della resistenza reale. Il modello a travatura è uno di questi stati di equilibrio tra i carichi applicati e le reazioni di supporto. Ciò si traduce in una stima conservativa e costituisce una solida base per la progettazione di elementi con armatura a taglio in tutti i moderni codici di progettazione del calcestruzzo.

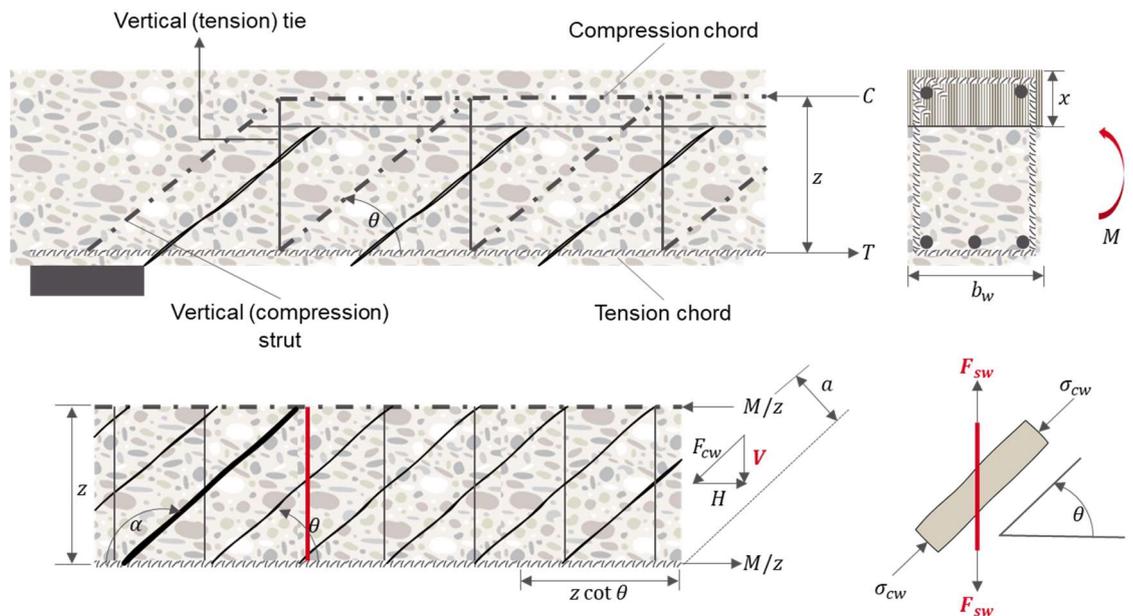


Figura 2: Trave in calcestruzzo con armatura a taglio, rappresentata da una travatura Mörsch-Ritter contenente corde di compressione e di tensione, puntone di compressione inclinato e tirante verticale [5] e [6].

Affinché il modello di travatura funzioni in modo affidabile per il taglio, l'armatura di taglio deve racchiudersi (o agganciarsi) intorno alla corda di compressione come un tirante di tensione per consentire il trasferimento delle forze nel nodo. Nella pratica, questo requisito può essere raggiunto tramite aderenza, la resistenza a trazione del calcestruzzo o, più comunemente, tramite appoggi diretti in cui l'armatura a taglio si piega con o senza la presenza di armature longitudinali nella zona di compressione [7].

3. PROGETTAZIONE DI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO PER IL TAGLIO

3.1 Principi generali

La progettazione distingue tra elementi in calcestruzzo con e senza armatura a taglio, dove questi ultimi sono lastre con carichi leggeri e alcune fondazioni che di solito hanno una sezione trasversale più ampia e non sono soggette a carichi concentrati. Per entrambi i tipi di elementi, il progettista dovrebbe innanzitutto verificare il requisito di armatura a taglio utilizzando formulazioni derivate empiricamente.

3.2 Progettazione senza armatura a taglio secondo la EN 1992-1-1 e la SIA 262:2013

La progettazione della resistenza a taglio degli elementi in calcestruzzo senza armatura a taglio consiste in equazioni empiriche che derivano da decenni di test approfonditi condotti da esperti di tutto il mondo, a loro volta derivati dalle tradizioni nazionali e dai test locali. Sebbene ciò comporti l'assenza di un modello fisico unificato e consolidato in tutte le norme pertinenti, i risultati sono generalmente comparabili nella maggior parte delle condizioni. Nel suo testo comune, ad esempio, la norma EN 1992-1-1:2004 raccomanda la seguente espressione per la resistenza delle membrature in calcestruzzo senza armatura a taglio, con modifiche a parametri specifici, come $C_{Rd,c}$ e k , contenuti nei diversi allegati nazionali:

- Resistenza al taglio senza armatura a taglio: $V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w \cdot d$ (1)

Nella norma SIA 262:2013, la resistenza delle membrature in calcestruzzo senza armatura a taglio presenta differenze minime:

- Resistenza al taglio senza armatura a taglio: $V_{Rd} = k_d \tau_{cd} d_v b_w$ (2)

3.3 Progettazione con armatura a taglio secondo la EN 1992-1-1 e la SIA 262:2013

Una caratteristica fondamentale delle moderne norme di progettazione stabilisce che, quando il calcestruzzo non è in grado di resistere da solo a tutte le sollecitazioni di taglio, l'armatura di taglio prevista, come quella mostrata in Figura 2, deve resistere esclusivamente a tutte le sollecitazioni. Pertanto, come per gli elementi diagonali di compressione di una travatura a forma aperta, variando l'angolo di inclinazione si può ottenere un'inclinazione maggiore, θ , avrà un ruolo significativo nel determinare la resistenza massima del puntone di compressione in calcestruzzo prima che si schiacci, $V_{Rd,max}$ a resistenza dell'armatura a taglio prima che ceda, $V_{Rd,s}$, con il minore dei due che governa la resistenza totale al taglio, V_{Rd} . Quando il progetto richiede un'armatura a taglio, tre criteri determinano la quantità di armatura a taglio necessaria:

1. Una quantità minima per evitare lo snervamento dell'armatura di taglio quando si verificano le prime crepe di taglio, $A_{sw,min}$
2. Armatura a taglio effettiva necessaria per sostenere il carico di progetto, A_{sw} .
3. Il rapporto tra l'armatura a taglio e la sezione del calcestruzzo, ρ_w che induce lo snervamento dell'armatura a taglio e impedisce una rottura fragile del calcestruzzo sotto compressione.

Le norme di progettazione, come la EN 1992-1-1:2004 e la SIA 262:2013, determinano la quantità di armatura a taglio con il modelli «a puntoni e tiranti» o «a campo di sollecitazione» illustrato nella Figura 3 utilizzando una formula di progettazione coerente con solo una piccola variazione dei limiti dell'angolo del puntone, θ . Così:

- Forza di snervamento per staffa: $F_{wi} = A_{sw} \cdot f_{ywd}$ (3)

- Numero di staffe all'interno Δx : $n = \frac{z \cdot \cot(\alpha)}{s}$ (4)

- Forze in tutte le staffe entro Δx : $V_{Rd,s} = f_{ywd} \cdot A_{sw} \cdot \frac{z \cdot \cot \theta}{s}$ (5)

• Se le staffe sono inclinate ($\alpha \neq 90^\circ$):
$$V_{Rd,s} = f_{ywd} \cdot \frac{A_{sw} \cdot z}{s} \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha \quad (6)$$

○ La norma EN 1992-1-1:2004, l'inclinazione della staffa è: $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

○ La corrispondente armatura minima a taglio:
$$\rho_{w,min} = 0,08 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (7)$$

○ Per la norma SIA 262:2013 l'inclinazione della staffa è: $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$

○ La corrispondente armatura minima a taglio:
$$\rho_{w,min} = 0,001 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{30}} \cdot \frac{500}{f_{sk}} \quad (8)$$

Resistenza massima al taglio limitata dallo schiacciamento del puntone di compressione:

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (9)$$

Dallo stesso modello, la quantità massima di armatura a taglio *efficace* viene calcolata utilizzando la seguente espressione (assumendo che $\cot\theta = 1$):

$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \quad (10)$$

Assumendo un'inclinazione variabile del puntone:
$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{max} \leq \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{f_{ywd}} \cdot b_w \cdot \sin^2\theta \quad (11)$$

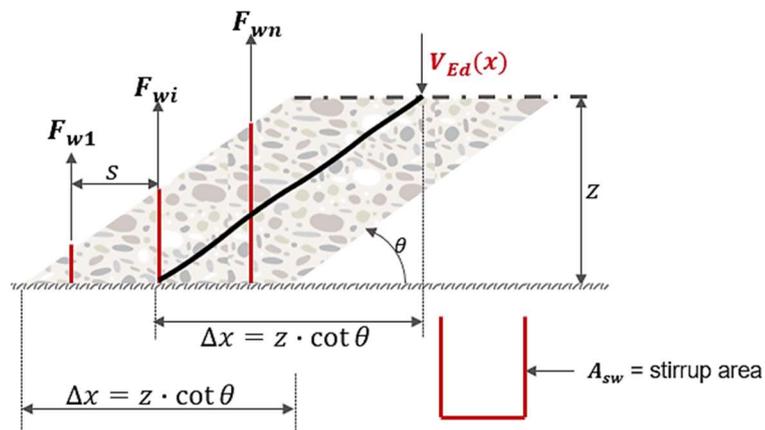
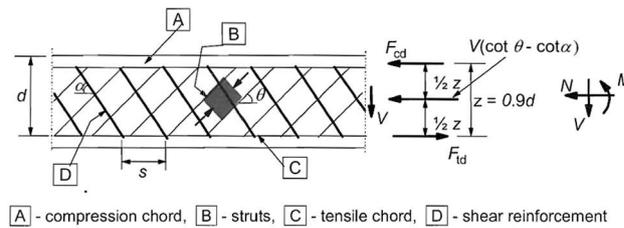
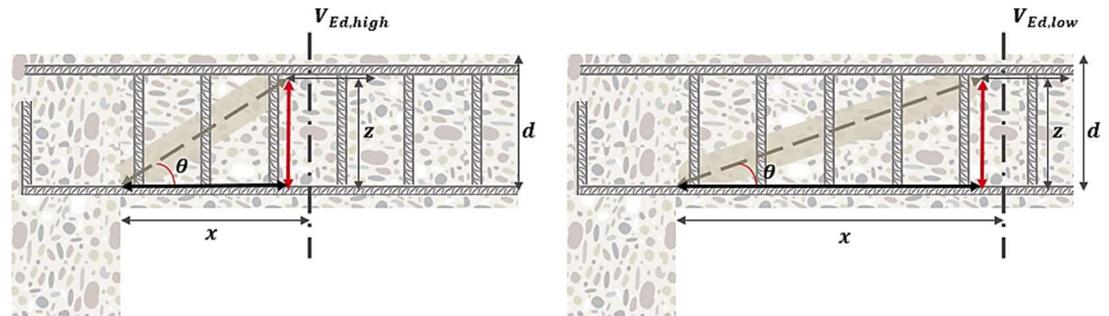


Figura 3: Modello di progetto per la resistenza al taglio con armatura a taglio: (in alto) modelli a puntone e tiranti da EN 1992-1-1:2004 [8]; (in fondo) schizzo con staffe verticali

L'angolo di inclinazione, θ , aumenta proporzionalmente all'entità della forza di taglio applicata su un elemento in calcestruzzo e la progettazione a taglio secondo i moderni standard di progettazione consente all'ingegnere strutturale di scegliere, tra un intervallo specifico, un'inclinazione maggiore del puntone che aumenta la resistenza del puntone per far fronte a forze di taglio più elevate, V_{Ed} . Questo riduce il contributo dell'armatura a taglio e richiede quindi una maggiore quantità di armatura per soddisfare la domanda, come illustrato nella Figura 4.



- $\theta_{max} = 45^\circ \rightarrow V_{Ed,high}$ carried by 3 stirrups
 - Largest possible $V_{Rd,max}$
 - Smallest possible $V_{Rd,s}$ & ΔF_{td}
- $\theta_{min} = 21,8^\circ \rightarrow V_{Ed,low}$ carried by 5 stirrups
 - Smallest possible $V_{Rd,max}$
 - Largest possible $V_{Rd,s}$ & ΔF_{td}

Figura 4: Rappresentazione schematica dell'impatto dell'inclinazione del puntone sulla resistenza a compressione del puntone e dell'armatura a taglio: (a sinistra) inclinazione massima e (a destra) inclinazione minima consentita

Al contrario, ottimizzare il progetto di taglio riducendo l'inclinazione del puntone, θ per un determinato carico di taglio, V_{Ed} , porta a:

- a) Una forza maggiore nel puntone inclinato che porta alla frantumazione del calcestruzzo con un carico di taglio inferiore, V_{Ed} . Il carico di taglio sotto il quale il calcestruzzo si frantuma, $V_{Rd,max}$ a massima resistenza al taglio di una sezione e, grazie a un'armatura aggiuntiva, offre una maggiore resistenza, $V_{Rd,s}$, diventa superfluo. Quantità maggiori spostano la modalità guasto verso la frantumazione dei puntoni in calcestruzzo.
- b) Una distribuzione più ampia degli elementi di tensione verticali significa che più staffe possono resistere al carico di taglio, V_{Ed} e ciò comporta una minore quantità di armatura a taglio necessaria.
- c) Una maggiore forza di trazione ha imposto l'armatura longitudinale, ΔF_{td} che richiede l'ancoraggio ai supporti.

4. APPROCCI PER RINFORZARE LE MEMBRATURE CARENTI A TAGLIO

Dalle due norme di progettazione citate, la resistenza a taglio di un elemento in calcestruzzo dipende da questi parametri:

- a) Resistenza del calcestruzzo, f_{ck}
- b) Larghezza della sezione, b_w e altezza, h
- c) Profondità effettiva dell'armatura a flessione dalla sommità della fibra di compressione, d
- d) Lunghezza del supporto, a_v
- e) La quantità di armatura longitudinale, A_{sl}
- f) La quantità di armatura a taglio (detta anche armatura trasversale), A_{sw}

I metodi o gli interventi esistenti, tipicamente impiegati per rinforzare i singoli elementi in calcestruzzo, migliorano la resistenza al taglio degli elementi stessi, ma comportano un compromesso in termini di invasività, costo, disponibilità e altri parametri. Sebbene il miglioramento di uno o più di questi parametri aumenti la resistenza al taglio, in una struttura esistente la resistenza del calcestruzzo (a) non può essere modificata *a posteriori*, e l'aggiunta di più supporti riduce la snellezza dell'elemento, come l'aggiunta di colonne alle travi o di travi alle lastre. Tuttavia, questi supporti aggiuntivi dovranno trasferire il carico alle fondazioni. A seconda dei requisiti funzionali, è possibile migliorare uno o più parametri da (b) a (f) utilizzando interventi diversi, come illustrato nei paragrafi seguenti. In genere, solo una parte degli interventi di rinforzo viene eseguita con prodotti proprietari e, più spesso, le soluzioni sono adattate al progetto specifico.

4.1 Aumenta la larghezza e/o l'altezza della sezione

La larghezza e la profondità effettiva di una sezione in calcestruzzo possono essere aumentate utilizzando un rivestimento in calcestruzzo per gli elementi planari, come lastre, fondazioni e pareti, o un rivestimento in calcestruzzo armato per gli elementi lineari, come travi e colonne. Illustrati nella Figura 5 e nella Figura 6, entrambi gli approcci migliorano contemporaneamente la resistenza alla flessione e la rigidità, riducendo la deflessione. Questi metodi sono particolarmente utili quando la resistenza al taglio non rappresenta l'unica carenza da affrontare. Negli scenari in cui gli elementi devono essere rinforzati esclusivamente per il taglio, entrambi gli approcci possono presentare notevoli svantaggi:

1. La sovrapposizione o il rivestimento in calcestruzzo aggiungono un peso aggiuntivo sostanziale che influisce sugli altri elementi del percorso di carico, compresa la fondazione.
2. Inoltre, l'aumento della profondità effettiva risulta essere addirittura inferiore allo spessore della sovrapposizione, con la profondità effettiva che si colloca al centro di gravità di tutte le armature di tensione del calcestruzzo esistente e della sovrapposizione, cioè al di sotto dell'armatura di tensione della sovrapposizione.
3. L'armatura si concentra in prossimità degli appoggi, dove il taglio è maggiore.

Esempi di soluzioni brevettate nel settore:

Serie Hilti HCC: HCC-HUS4, HCC-U, HCC-K e HCC-B

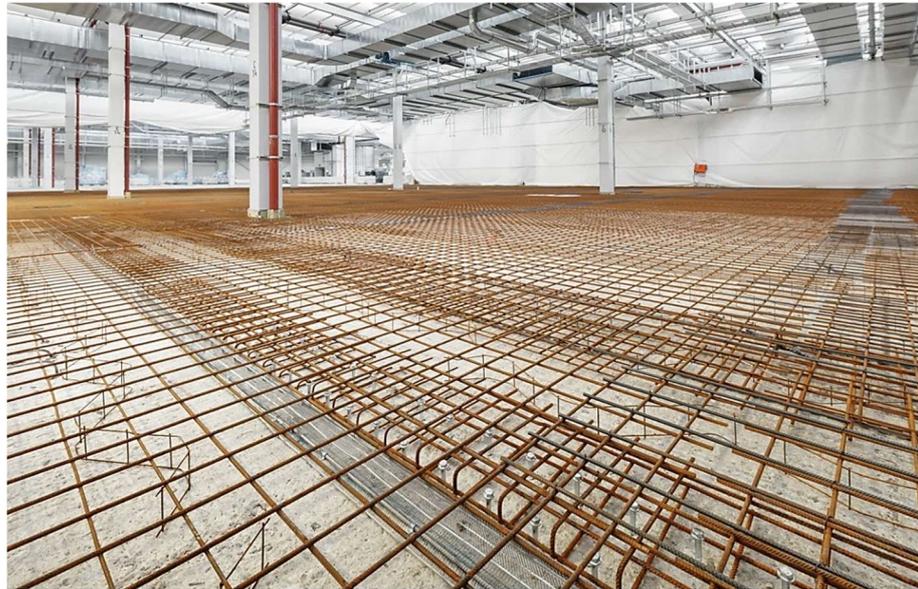


Figura 5: Esempio di armatura post-installata utilizzata in sovrapposizioni di calcestruzzo

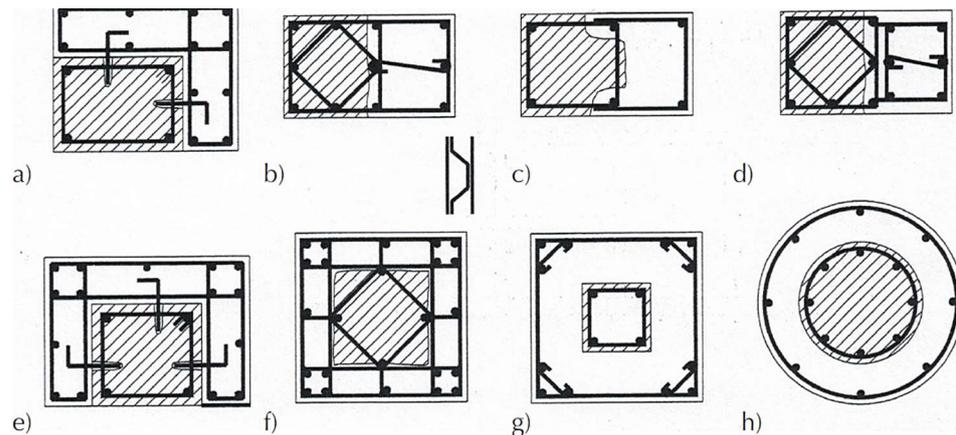


Figura 6: Esempi di rivestimento in calcestruzzo, riprodotti da [2]

4.2 Aumentare la lunghezza del supporto

Aumentando le dimensioni della colonna o dell'appoggio si distribuisce il carico di taglio su un'area più ampia, riducendo così la sollecitazione di taglio media spostando la faccia del supporto più vicino al punto medio della trave o della lastra. Si possono adottare diverse soluzioni:

Esempi di soluzioni nel settore: puntone o montante in acciaio post-installato; prolungamento dei supporti in calcestruzzo (ad esempio, mensole).

4.3 Aumentare la resistenza alla flessione

L'aumento della quantità di armatura a flessione aumenta la duttilità complessiva, la rigidità della sezione e riduce la larghezza delle crepe migliorando l'incastro degli aggregati sulle fessure, il che a sua volta aumenta la resistenza al taglio. I miglioramenti all'armatura flessionale sono possibili applicando laminati incollati o installando armatura montata vicino alla superficie nei supporti e nel punto medio delle sezioni in cui la domanda di flessione è più elevata, con l'armatura costituita da polimeri rinforzati con fibra o lamiere di acciaio.

L'aumento della resistenza a flessione ha un effetto «sottoproporzionale» sulla resistenza a taglio; ad esempio, raddoppiando la quantità di armatura a flessione secondo l'equazione 6.2a della EN 1992-1-1, la resistenza a taglio, $V_{Rd,c}$, aumenta di non più del 25%.

Esempi di soluzioni nel settore: Laminati CFK, laminati in acciaio a memoria, barre in acciaio a memoria, armatura montata vicino alla superficie.

4.4 Aumentare la resistenza al taglio con i laminati

Come esemplificato dalla Figura 7, il rinforzo di elementi carenti a taglio, come le travi, è possibile anche incollando i laminati sui lati perpendicolari alla lunghezza della trave o inclinati. In genere, questo metodo è considerato molto efficace, ma l'ancoraggio finale dei laminati può rappresentare una sfida quando sono soggetti a carichi elevati.

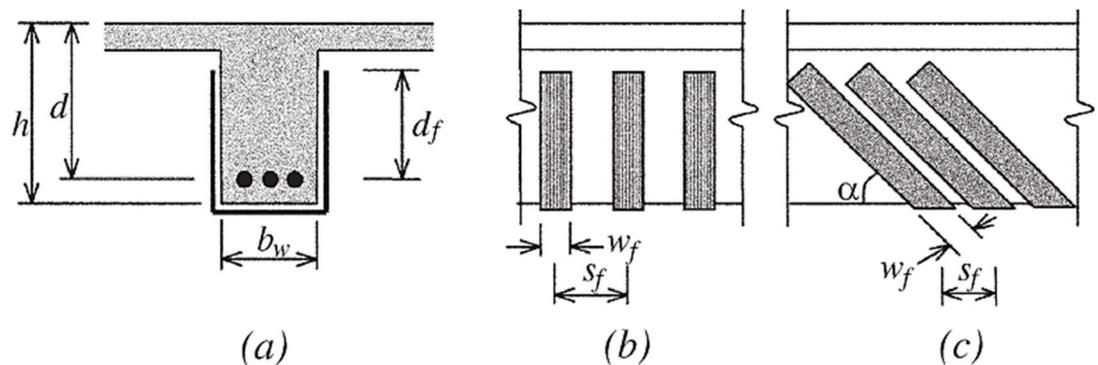


Figura 7: Uso di laminati di FRP perpendicolari o inclinati rispetto alla lunghezza della trave, riprodotto dalla Figura 11.4 [9]

4.5 Armatura post-installata per aumentare la resistenza al taglio

In alternativa, una soluzione più semplice prevede la realizzazione di fori attraverso l'elemento in calcestruzzo su entrambi i lati e il fissaggio di barre filettate in acciaio con dado e rondelle, detto anche «bullonatura passante». Il riempimento dello spazio anulare tra la barra filettata e il foro con una malta adeguata è essenziale per attivare l'armatura mentre il calcestruzzo si fessura. Ciò contribuisce a mantenere l'ampiezza delle crepe entro i limiti di utilizzabilità e previene la corrosione dell'armatura, fondamentale per garantire la durata progettata della struttura. Come per l'armatura post-installata, la perforazione dell'elemento in calcestruzzo comporta il rischio di tagliare o danneggiare l'armatura longitudinale, che è particolarmente densa in prossimità degli appoggi (tipicamente appoggi rigidi), dove le richieste di flessione sono elevate. Per ridurre questo rischio, è possibile utilizzare dei ferro-scanner che aiutano a rilevare l'armatura a flessione su entrambi i lati dell'elemento prima della perforazione.

Nella maggior parte degli scenari, tuttavia, la perforazione della lastra non è possibile o non è desiderata, il che porta a un'installazione parzialmente incassata degli elementi di rinforzo da un lato. Questo approccio è meno invasivo rispetto alla perforazione dell'intera lunghezza della sezione di calcestruzzo, ma prevede una condizione: le regole di dettaglio in tutte le norme moderne, come la Sezione 9.2.2 della EN 1992-1-1, richiedono che le armature a taglio standard, come le staffe, racchiudano e “confinino” l'armatura longitudinale o, almeno, si ancorino in corrispondenza o oltre gli strati di armatura longitudinale. Ciò significa che l'unico cedimento possibile è quello dell'acciaio. Tuttavia, tale ancoraggio potrebbe non essere possibile in questo caso e, pertanto, richiede una verifica dell'ancoraggio e dell'installazione, in generale basata su test specifici, ove possibile.

Soluzioni Hilti attualmente disponibili: la Figura 8 mostra tre diverse opzioni di utilizzo di **barre filettate HZA-P e HAS(-U)** incassate parzialmente (HZA-P e HAS(-U)) e con bulloni passanti (solo HAS(-U)).

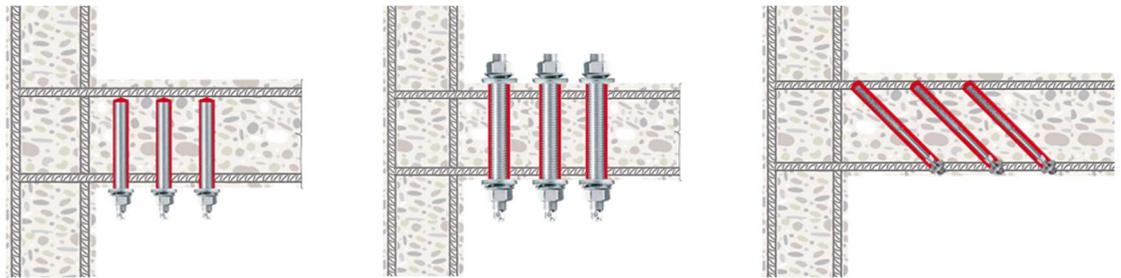


Figura 8: Aumento dell'armatura a taglio utilizzando: (a) barre HAS(-U) parzialmente incassate installate perpendicolarmente alla lunghezza della trave; (b) barre HAS(-U) passanti installate perpendicolarmente alla lunghezza della trave; e (c) HZA-P parzialmente incassato inclinato rispetto alla lunghezza della trave

Esempi di soluzioni nel settore: laminati in CFRP a L, bulloni passanti, viti per calcestruzzo installate da un lato, tasselli adesivi / sottosquadro installati da un lato.

4.6 Soluzioni e combinazioni speciali

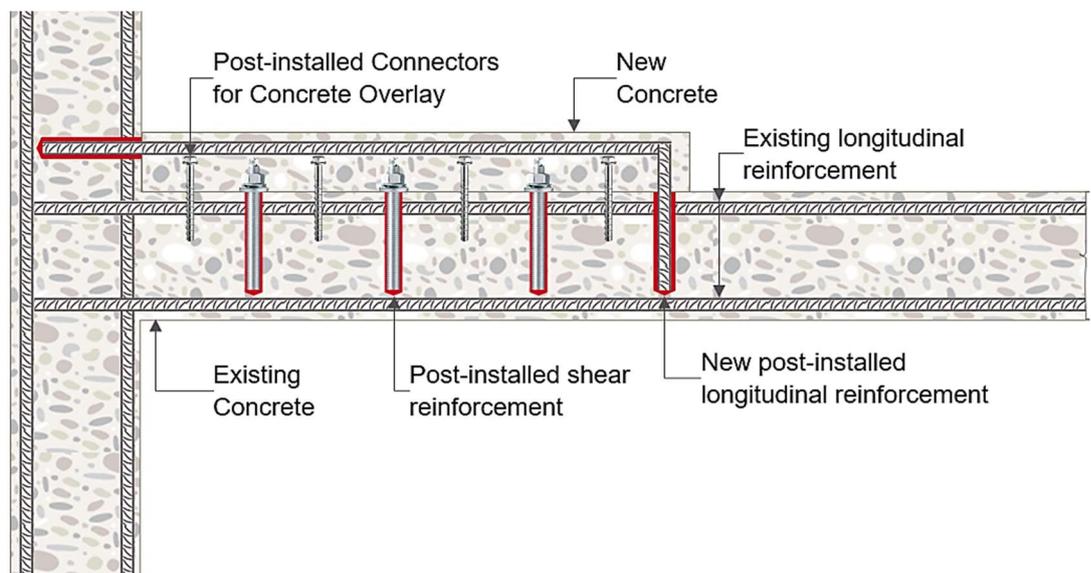


Figura 9: Esempio di soluzione speciale che combina l'armatura a taglio post-installata con un rivestimento in calcestruzzo (il rivestimento può anche estendersi sull'intera lunghezza dell'elemento esistente)

Quando i carichi sono eccezionalmente elevati, si possono applicare soluzioni speciali o combinazioni delle soluzioni precedentemente menzionate. Un esempio di soluzione speciale è un laminato in fibra di carbonio che viene installato attraverso due fori inclinati e precompresso, a differenza di un'installazione normale senza fori appositamente creati.

La Figura 9 illustra un altro esempio che può migliorare significativamente la resistenza al taglio, combinando un'armatura a taglio post-installata con un rivestimento in calcestruzzo. Altre combinazioni che non possono aumentare lo spessore dell'elemento in calcestruzzo possono combinare laminati di fibre con armature a taglio post-installate per soddisfare i rispettivi requisiti di flessione e taglio.

5. PANORAMICA DELLA QUALIFICAZIONE DELL'ARMATURA A TAGLIO POST-INSTALLATA

Sebbene i sistemi di armatura a taglio gettati in opera trovino ampia applicazione nel settore edile, l'uso di elementi in acciaio *post-installati* per il rinforzo di elementi in calcestruzzo carenti a taglio non è attualmente contemplato da alcun Documento di valutazione europeo (European Assessment Document, EAD) né armonizzato da una norma europea (hEN). Tali sistemi, pertanto, richiedono un'adeguata qualificazione per valutare le performance di progettazione e l'utilizzo per la resistenza al taglio. In questi scenari, l'Allegato D della norma EN 1990:2002 [10] fornisce una guida all'avanguardia per calibrare, mediante una combinazione di prove e modelli, un'equazione di progettazione coerente con i livelli di affidabilità previsti dalla norma EN 1990.

Secondo la Valutazione Tecnica Europea (ETA)-20/0541 [11], la combinazione di malta epossidica HIT-RE 500 V4 e delle barre HAS(-U) in acciaio al carbonio e acciaio inox con il set di riempimento Hilti è stata valutata e qualificata per l'uso come elemento di fissaggio nel calcestruzzo. Tuttavia, il suo utilizzo come sistema di rinforzo installato perpendicolarmente all'asse longitudinale degli elementi in calcestruzzo per aumentarne la resistenza al taglio non è stato studiato in precedenza. Pertanto, è stato recentemente condotto un piano di test completo per valutare il comportamento di questa innovativa soluzione di rinforzo a taglio e determinare l'influenza dei principali parametri di regolazione, quali: (1) il diametro, la distanza e la lunghezza di installazione delle barre; (2) la profondità dell'elemento in calcestruzzo; (3) la resistenza del calcestruzzo.

Ulteriori test hanno valutato la robustezza del sistema in scenari pratici che prevedono condizioni di installazione sfavorevoli, tra cui, ma non solo, l'eccentricità trasversale e l'inclinazione accidentale durante l'installazione delle barre, nonché la presenza di crepe esistenti sotto carichi di esercizio. Questa vasta campagna sperimentale ha permesso di calibrare un modello di resistenza al taglio coerente con la procedura di valutazione dell'affidabilità delineata nell'Allegato D della norma EN 1990, ottenendo un'equazione di progettazione conforme alla norma EN 1992-1-1, descritta in dettaglio nella sezione seguente.

L'intera campagna sperimentale condotta presso la Ruhr Universität Bochum (RUB) è stata valutata e verificata per la sua idoneità all'applicazione dal DIBt, che ha concesso al sistema un permesso generale di costruzione, o *aBG Z-15.5-383*, soddisfacendo così il requisito nazionale per i lavori di costruzione ai sensi del *MVV TB*, o *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen*. L'MVV TB funge da modello per le Disposizioni amministrative – Regole tecniche per l'edilizia, che vengono implementate a livello federale in Germania.

6. PROGETTAZIONE E APPROCCIO AL DETTAGLIO CON BARRE FILETTATE HILTI HAS / HAS-U

Oltre alla soluzione di armatura adesiva HZA, una nuova soluzione Hilti per il rinforzo a taglio prevede l'uso della malta HIT-RE 500 V4 e delle barre filettate HAS o HAS-U con set di riempimento, dadi e rondelle Hilti. La soluzione è installata in modo simile a quella di un ancoraggio incollato: vale a dire, la perforazione ad una profondità fissa della posa perpendicolare alla superficie del calcestruzzo, la pulizia accurata dei detriti dai fori, l'iniezione della malta e poi l'inserimento delle barre. Una volta che la malta si è indurita, i dadi vengono serrati a un valore fisso. La soluzione è dotata di un permesso generale di costruzione (*aBG*) **Z-15.5-383** da parte del DIBt e utilizza le disposizioni per la **Progettazione assistita da prove** contenute nell'**Allegato D della norma EN 1990**. Questa sezione contiene una panoramica sulla valutazione, la progettazione e l'installazione di barre filettate post-installate come armatura negli elementi in calcestruzzo carenti a taglio.

Il modello di resistenza adottato è del tutto conforme alle disposizioni di progettazione della DIN EN 1992-1-1/NA [12] e della DIN EN 1992-2/NA [13]. Le verifiche richieste assomigliano alle equazioni (6.8) e (6.9) della norma DIN EN 1992-1-1/NA, rispettivamente per la resistenza dell'armatura in acciaio e per la resistenza massima del puntone; la sezione 4 del presente documento illustra il contesto di queste equazioni. Questo modello di resistenza utilizza anche il metodo dell'inclinazione variabile del puntone, che consente di regolare l'angolo di inclinazione del puntone di compressione per bilanciare le forze tra il puntone di compressione e gli elementi di rinforzo, consentendo potenzialmente di realizzare economie nella progettazione grazie a un minor numero di barre necessarie.

L'uso diretto di entrambe le equazioni, tuttavia, non è possibile senza le modifiche che derivano dai risultati della procedura di qualificazione e, complessivamente, la verifica deve soddisfare il seguente controllo dei puntoni di compressione e delle barre di rinforzo allo stato limite ultimo per una data forza di taglio di progetto, V_{Ed} :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}, V_{Rd,s}) \quad (12)$$

6.1 Verifica dei puntoni di compressione

Quando le barre di rinforzo a taglio post-installate sono installate perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'elemento in calcestruzzo, l'angolo di installazione è $\alpha = 90^\circ$ e la resistenza del puntone di compressione secondo l'equazione (6.9) della DIN EN 1992-1-1 in combinazione con la DIN EN 1992-1-1/NA, *NCl a 6.2.3(1)* è:

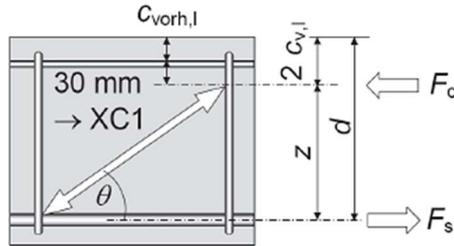
$$V_{Rd,max} = \frac{b_{w,eff} \alpha_{cw} z v_1 f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (13)$$

In questo caso, la larghezza effettiva della sezione rinforzata, $b_{w,eff}$, sostituisce la larghezza complessiva della sezione, b_w , con un parametro di eccentricità trasversale, e_{inst} , che aumenta fino a un massimo di **50 mm** o $\frac{b_w}{6}$ rispetto al centro di massa della trave, a seconda del posizionamento dell'armatura durante l'installazione. Da notare, tuttavia, che questa eccentricità **si applica solo a una singola fila di armature** poiché un singolo vincolo di tensione eccentrico nel modello di travatura induce una torsione nell'elemento strutturale proporzionale alla forza di taglio applicata. Così:

$$b_{w,eff} = b_w - \min\left(50 \text{ mm}, \frac{b_w}{6}\right) \quad (14)$$

Gli altri parametri dell'equazione non sono diversi da quelli contenuti nella norma DIN EN 1992-1-1/NA:

- Braccio di leva $z = 0,9d$, con un limite superiore di $z = \max(d - 2c_{v,l}; d - c_{v,l} - 30 \text{ mm})$. In questo caso, la profondità effettiva della sezione rispetto all'armatura a flessione è d , e $c_{v,l}$ è il coprifermo dell'armatura longitudinale nella zona di compressione, illustrato in Figura 10:


 Figura 10: Definizione del braccio di leva interno, z , riprodotto dalla Figura H6-11 [7]

Nota: Quando $V_{Ed} \leq V_{Rd,cc}$, l'espressione

$$\frac{1,2+1,4\sigma_{cp}/f_{cd}}{1-V_{Rd,cc}/V_{Ed}}$$

che rappresenta il limite superiore di $\cot \theta$ diventa negativo e supera i limiti superiore e inferiore prescritti; in tali scenari, $\cot \theta = 3,0$.

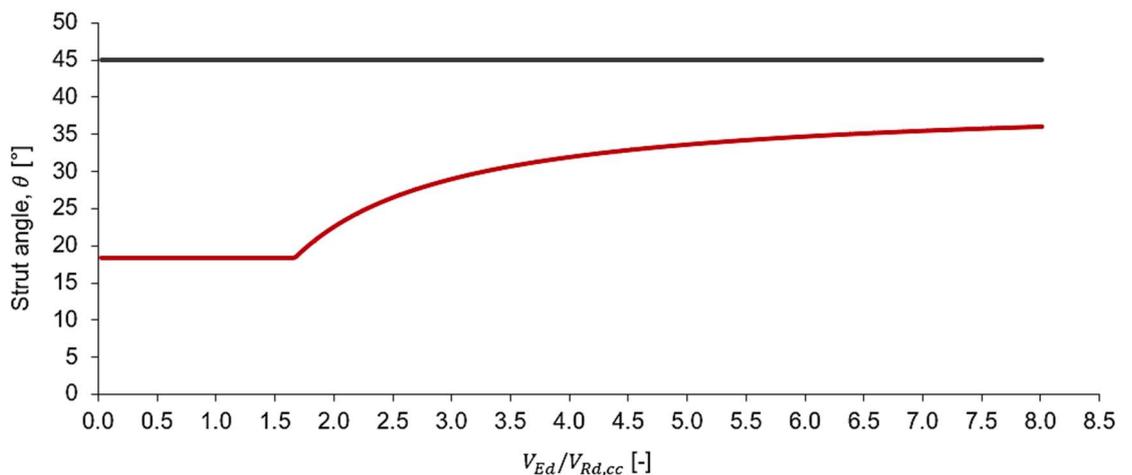
- Il fattore adimensionale $\alpha_{cw} = 1$ tiene conto dello stato di sollecitazione nella corda di compressione
- Il fattore di riduzione della resistenza per il calcestruzzo fessurato a taglio, $v_1 = 0,75$
- La resistenza a compressione di progetto del calcestruzzo, $f_{cd} = \alpha_{cc}f_{ck}/\gamma_c$, dove $\alpha_{cc} = 0,85$ e $\gamma_c = 1,5$
- L'angolo del puntone, θ , è vincolato dall'equazione (6.7aDE), DIN EN 1992-1-1/NA:

$$1 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2+1,4\sigma_{cp}/f_{cd}}{1-V_{Rd,cc}/V_{Ed}} \leq 3,0 \quad (15)$$

- In equazioni (15), $V_{Rd,cc} = 0,5 \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{1/3} \left(1 - 1,2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \cdot b_{w,eff} \cdot z$, (16)
- Nella progettazione secondo la norma DIN EN1992-2/NA, l'angolo del puntone è limitato dall'equazione (6.107aDE):

$$1 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2+1,4\sigma_{cp}/f_{cd}}{1-V_{Rd,cc}/V_{Ed}} \leq 1,75 \quad (17)$$

Poiché $V_{Ed} > V_{Rd,cc}$, questa espressione continuerà a dare come risultato $\cot \theta > 3,0$ finché una forza di taglio sufficientemente grande $V_{Ed} \gg V_{Rd,cc}$ non ridurrà $\cot \theta < 3,0$. Questo nuovo limite superiore *calcolato* corrisponde all'inclinazione massima del puntone di compressione per gli elementi con un'armatura a taglio minima, con una corrispondente resistenza ridotta nel puntone. La Figura 11 illustra uno scenario in cui una forza di taglio crescente aumenta a sua volta l'angolo del puntone calcolato dall'equazione (6.7aDE), DIN EN 1992-1-1/NA.


 Figura 11: Relazione rappresentativa tra il rapporto $V_{Ed}/V_{Rd,cc}$ con l'angolo di puntone calcolato (la linea orizzontale a 45° rappresenta l'angolo di puntone massimo)

Nota: come buona prassi, questa verifica non dovrebbe essere ignorata durante il rinforzo delle strutture esistenti.

Sebbene non sia esplicitamente richiesto per la verifica della resistenza dell'acciaio o del puntone, il taglio di progetto, V_{Ed} , genera un'ulteriore forza di trazione, ΔF_{td} nell'armatura longitudinale che aumenta quando l'inclinazione del puntone diminuisce, secondo la norma EN 1992-1-1, 6.2.3(7). Questa forza si aggiunge alla tensione imposta all'armatura longitudinale dalla flessione, richiedendo un controllo separato per il potenziale snervamento e la rottura dell'ancoraggio di queste barre. In una struttura di nuova costruzione,

questa verifica per la tensione aggiuntiva potrebbe non essere necessaria se la massima flessione lungo l'elemento in calcestruzzo, $M_{Ed,max}$ stato utilizzato per progettare l'armatura e il suo ancoraggio.

6.2 Verifica dei puntoni di compressione

Con le barre di rinforzo post-installate installate ortogonalmente all'asse longitudinale dell'elemento in calcestruzzo, l'angolo di installazione $\alpha = 90^\circ$ e la resistenza delle barre di acciaio secondo DIN EN 1992-1-1/NA è:

$$V_{Rd,s} = k_{pi} \cdot k_s \cdot f_{ywd} \cdot a_{sw} \cdot z \cdot \cot \theta \quad (18)$$

Mentre i parametri per il braccio di leva, z e l'angolo del puntone, θ non cambiano rispetto alla verifica del puntone di compressione, il valore di f_{ywd} deriva dalla valutazione ed è pari a 390 MPa sia per le barre in acciaio inox A4 che per quelle in acciaio al carbonio 8.8. L'area sollecitata delle barre di rinforzo post-installate, a_{sw} per unità di lunghezza dell'elemento in calcestruzzo combina il numero di file di barre in direzione trasversale, n_{swt} , la spaziatura in direzione longitudinale, s_{wl} e l'area della sezione trasversale sollecitata di ciascuna asta, A_{sw} , fornito di seguito in:

$$a_{sw} = \frac{n_{swt} \cdot A_{sw}}{s_{wl}} \quad (19)$$

Materiale	Dimensione della barra	Valore di progetto del carico di rottura f_{ywd} [MPa]	Area della sezione trasversale sollecitata di una barra filettata A_{sw} [mm ²]
HAS 8.8, HAS-U 8.8, HAS A4, HAS-U A4	M12	390	84.3
	M16		157
	M20		245
	M24		353

Tabella 1: Parametri geometrici e dei materiali da utilizzare nelle equazioni (18) e (19)

Questa espressione introduce due nuovi parametri che derivano dalla valutazione:

- Coefficiente dipendente dalla dimensione k_s in funzione del braccio di leva, z (in metri), per gli spessori degli elementi, h tra 200-2200 mm, con un braccio di leva più grande che riduce questo coefficiente:

$$k_s = \begin{cases} 1,0 & \text{quando } z \leq 0,75m \\ 1,15 - 0,20 \cdot z & \text{quando } z > 0,75m \end{cases} \quad (20)$$

- Coefficiente per il rinforzo del taglio post-installato, k_{pi} , che assume un valore fisso che si combina:
 - Un fattore di **affidabilità** derivato statisticamente che confronta le barre di rinforzo con l'armatura gettata in opera,
 - Un fattore di durabilità che tiene conto degli effetti a lungo termine sulla forza di adesione della malta,
 - Un fattore di sensibilità e tolleranze di installazione,
 - Un fattore che tiene conto della presenza di crepe a flessione e a taglio nella zona di ancoraggio delle barre rispetto alla direzione di installazione. Come illustrato di seguito, questo coefficiente è costante per tutte le dimensioni delle barre.

Barre di rinforzo a taglio Hilti	Dimensione della barra	Installazione su un solo lato (configurazione A)	Installazione su un solo lato (configurazione B)
Coefficiente per il rinforzo a taglio post-installato, k_{pi}	M12	0.735	0.588
	M16		
	M20		
	M24		

Tabella 2: Parametro di prestazione k_{pi} utilizzato per la verifica delle barre di rinforzo

Sebbene il sistema di rinforzo consenta l'installazione sia dal lato della tensione che da quello della compressione di un elemento in calcestruzzo, due aspetti influiscono sulle prestazioni del sistema: (1) la presenza di crepe a flessione o di tensioni assiali intorno alle punte delle barre di rinforzo e (2) la possibilità che le fessure a taglio passino sotto le estremità delle barre di rinforzo. Il primo aspetto riduce l'efficacia del sistema quando le barre sono installate da entrambe le direzioni in presenza di fessure da flessione, mentre la possibilità di riduzione dell'efficacia per il secondo aspetto si verifica solo quando l'installazione avviene dal lato della compressione.

Illustrata nella Figura 12 e nella Figura 13, la **Configurazione A** rappresenta le condizioni in cui le barre sono installate dal lato della tensione di un elemento in calcestruzzo e passano chiaramente attraverso le crepe di taglio, ma non sono interessate dalle fessure di flessione che sono comuni nelle condizioni di semplice supporto. Al contrario, lo scenario della **Configurazione B** si verifica quando le barre sono installate sul lato di compressione di un elemento in calcestruzzo semplicemente supportato, o su entrambi i lati di un supporto fisso soggetto a grandi momenti di cerniera (negativi) e ad elevate forze di taglio.

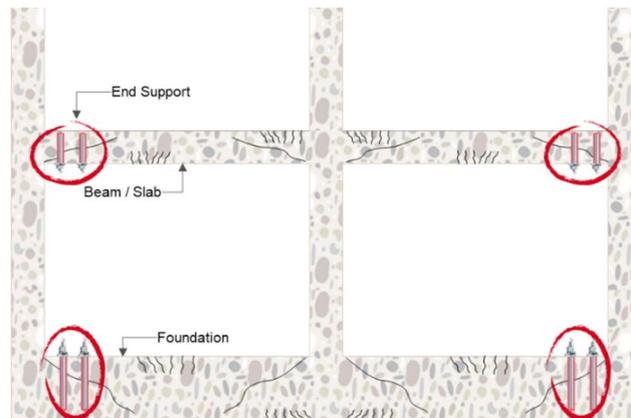


Figura 12: Configurazione A, in cui l'installazione avviene dal lato della tensione dell'elemento senza l'impatto delle crepe a flessione

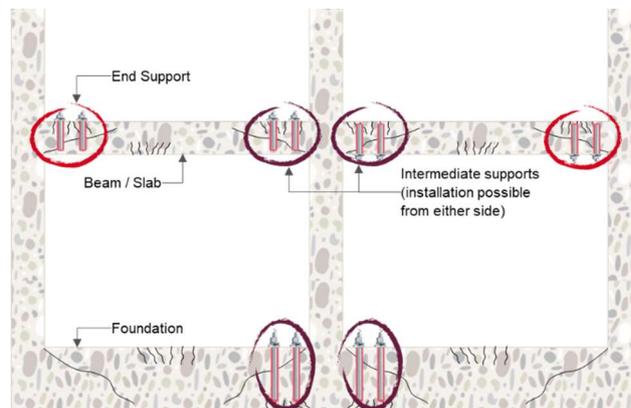


Figura 13: Configurazione B, in cui l'installazione avviene dal lato di compressione dell'elemento installato o su entrambi i lati, dove si sviluppano crepe di flessione insieme a fessure di taglio

6.3 Requisiti per il dettaglio dell'armatura di rinforzo

Lunghezza di installazione, l_{sw}

Come evidenziato dalle equazioni (14) e (19) per il rinforzo a taglio post-installato, il modello di progettazione non richiede una considerazione esplicita della lunghezza di installazione, l_{sw} nelle verifiche, poiché è una funzione dell'altezza della sezione, h e la copertura "residua", c_{res} , vedere Figura 14. Dal punto di vista dell'installazione, la copertura residua previene l'esplosione del calcestruzzo o la scheggiatura della superficie opposta alla perforazione, e non richiede la conoscenza della posizione dell'armatura longitudinale vicina a quella superficie.

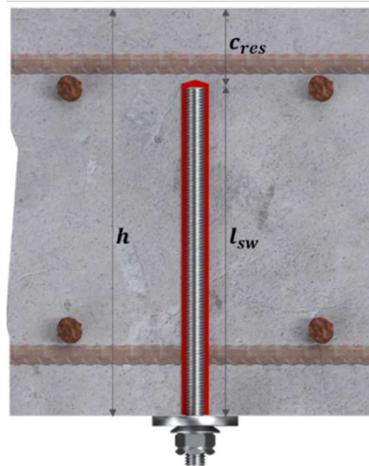


Figura 14: Schema semplificato dell'installazione, da [14].

Dal punto di vista progettuale, una lunghezza di installazione fissa garantisce che l'armatura a taglio sia ancorata alla corda di compressione dell'elemento, consentendo la formazione del modello di travatura. Come menzionato in precedenza nella Sezione 2 del presente documento, il modello di travatura su cui si basa la progettazione a taglio prevede che l'armatura a taglio sia racchiusa, o agganciata, attorno alla corda di compressione come un vincolo di tensione per consentire il trasferimento delle forze nel nodo. A tal fine, la combinazione di armature di rinforzo di grande diametro, come le barre M24, in lastre più sottili, ad esempio da 200 mm, può portare a scenari potenzialmente pericolosi in cui la copertura residua, c_{res} , di 60 mm, lascia la lunghezza di installazione, l_{sw} , a soli 140 mm, valore insufficiente per ancorare efficacemente il meccanismo a puntoni e tiranti ai nodi. Tali combinazioni non sono pertanto consentite e si richiede una correlazione tra l'altezza della sezione e il diametro dell'armatura secondo la relazione riportata nella Tabella 3 [14].

	Diametro dell'armatura di rinforzo			
	M12	M16	M20	M24
Altezza minima della sezione, h_{min} [mm]	200	400	600	
c_{res} [mm]	35	40	45	60

Tabella 3: Correlazione tra altezza minima della sezione, copertura residua e diametro dell'armatura di rinforzo, dalla Tabella 3 di [14]

Spaziatura, s_{wl}

Oltre a facilitare la distribuzione uniforme degli aggregati di calcestruzzo durante il getto, la DIN EN 1992-1-1/NA non definisce una distanza minima tra le armature a taglio, come le staffe. Senza eccezioni, l'armatura post-installata richiede una distanza minima definita, per evitare la formazione di screpolature tra le barre e una potenziale riduzione della resistenza complessiva al taglio. La Tabella 4 sottostante riporta i minimi in direzione longitudinale e trasversale.

Diametro dell'armatura di rinforzo	Distanza minima longitudinale, $s_{wl,min}$ [mm]	Distanza trasversale minima, $s_{wl,min}$ [mm]
M12	120	120
M16	160	160
M20	200	200
M24	240	240

Tabella 4: Spaziatura minima da centro a centro per ciascun elemento di rinforzo, ricavata dalla Tabella 11 di [14]

Come si evince dalla Tabella 5 e dalla Tabella 6, i valori massimi di spaziatura in direzione longitudinale e trasversale seguono le disposizioni della DIN EN 1992-1-1/NA, *Tabelle NA.9.1 e NA.9.2* per gli elementi lineari e *NCI a 9.3.2 (4)* per gli elementi planari, utilizzando $V_{Rd,max}$ l'equazione (1) senza modifiche.

Rapporto tra forza di taglio e resistenza del puntone	Distanza massima longitudinale, $s_{wl,max}$ [mm]	Distanza massima trasversale, $s_{wt,max}$ [mm]
$V_{Ed}/V_{Rd,max} \leq 0,3$	$\min(0,7 h, 300 \text{ mm})$	$\min(h, 800 \text{ mm})$
$0,3 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,6$	$\min(0,5 h, 300 \text{ mm})$	$\min(h, 600 \text{ mm})$
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} > 0,6$	$\min(0,25h, 200 \text{ mm})$	

Tabella 5: Distanza minima da centro a centro lineare (ad esempio, travi), riportata nelle tabelle NA.9.1 e NA.9.2 di [12]

Rapporto tra forza di taglio e resistenza del puntone	Distanza longitudinale massima, $s_{wl,max}$ [mm]	Distanza trasversale massima, $s_{wt,max}$ [mm]
$V_{Ed}/V_{Rd,max} \leq 0,3$	$0,7h$	h
$0,3 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,6$	$0,5h$	
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} > 0,6$	$0,25h$	

Tabella 6: Distanza massima da centro a centro negli elementi planari (ad es. lastre), riportata da NCI al punto 9.3.2 (4) di [12]

Distanza dal bordo, c_{wt}

L'impostazione di una distanza minima tra la posizione delle barre di rinforzo e qualsiasi bordo del calcestruzzo riduce il rischio di screpolatura, con tale minimo valutato nella valutazione della malta ETA 20/0541 [11]. La base minima viene aumentata di una percentuale della lunghezza di installazione che tiene conto dell'inclinazione massima consentita del foro (5°) perpendicolare alla superficie del calcestruzzo. Sebbene non sia definito nella DIN EN 1992-1-1/NA [12] per le armature a taglio tradizionali come le staffe, le barre di rinforzo post-installate richiedono anche una distanza massima dai bordi per generare almeno una o più file di elementi di rinforzo in sezioni più larghe ($b_w \geq 350 \text{ mm}$), vedete Tabella 7.

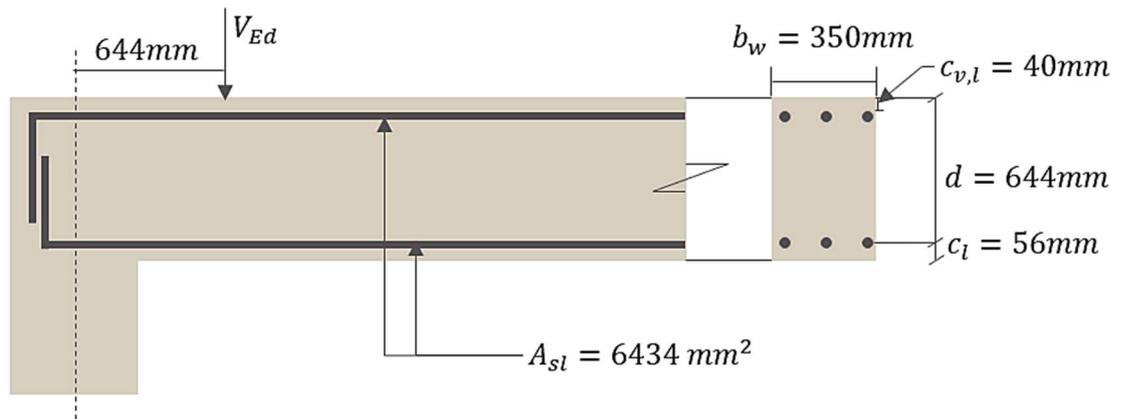
Sistema di perforazione	Dimensione della barra	Distanza minima dai bordi, $c_{wt,min}$ [mm]		Distanza massima dai bordi, $c_{wt,max}$ [mm]	
		Senza aiuto alla foratura	Con aiuto alla foratura	Elementi lineari	Elementi planari
Perforazione a percussione con o senza punte cave Hilti	M12	$45 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$45 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	175 mm	$\max(175 \text{ mm}, 0,5h)$
	M16	$50 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$50 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$		
	M20	$55 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$55 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	250 mm	$\max(250 \text{ mm}, 0,5h)$
	M24	$60 \text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$60 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$		
Perforazione pneumatica (CA)	M12	$50 \text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$50 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	175 mm	$\max(175 \text{ mm}, 0,5h)$
	M16				
	M20	$55 \text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$55 \text{ mm} + 0,02l_{sw}$	250 mm	$\max(250 \text{ mm}, 0,5h)$
	M24				

Nota: a meno che non sia esplicitamente considerato nella progettazione, la perforazione e il taglio attraverso l'armatura a flessione dovrebbero essere evitati ove possibile per prevenire un impatto negativo sulla struttura. Se non è possibile evitarlo, ad esempio per facilitare la perforazione in aree densamente armate, sono necessarie misure aggiuntive con l'esplicito accordo dell'ingegnere responsabile della progettazione per compensare la perdita di armatura a flessione.

Tabella 7: Distanze minime e massime dai bordi in base ai metodi di perforazione e alle tolleranze, riprodotte dalla Tabella 14 di [14]

7. ESEMPIO DI PROGETTAZIONE

Una trave esistente a semplice appoggio con sezione trasversale 350 mm x 700 mm di grado C30/37 ha una lunghezza di 8,0 metri ed è caricata da un carico uniformemente distribuito di 142 kN/m allo stato limite ultimo. La copertura libera per l'armatura longitudinale superiore e inferiore è di 40 mm, con la sezione trasversale a flessione in acciaio, $A_{sl} = 6434 \text{ mm}^2$ da 8H32. La resistenza dell'elemento esistente è verificata secondo la norma DIN EN 1992-1-1/NA ed è rinforzata in conformità con l'*aBG Z-15.5-383*.



Carico limite totale sulla trave, $w = 142 \cdot 8.0 = 1136 \text{ kN}$

Reazione di supporto, $R = \frac{1136}{2} = 568 \text{ kN}$

6.2.1 (8) [8] Taglio a distanza d dal supporto, $V_{Ed} = 568 - (142 \cdot 0.644) = 477 \text{ kN}$

6.2.1 (5) [8] Verifica della sezione esistente, $V_{Rd,c} \geq V_{Ed}$

Eq. 3.15 [12] Resistenza a compressione di progetto del calcestruzzo, $f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \cdot 30}{1,5} = 17 \text{ MPa}$

Eq. 6.2.a [8] Resistenza al taglio della sezione esistente, $V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq V_{Rd,c,min}$

6.2.2 (1) [8] Rapporto di armatura longitudinale, $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} = \frac{6434}{350 \cdot 644} = 0.0285 \geq 0.02$

6.2.2 (1) [8] Coefficiente dipendente dall'altezza dell'elemento, $k = 1 + \sqrt{200/644} = 1.557 \leq 2.0$

NDP Zu 6.2.2 (1) [12] Sollecitazione di taglio minima di progetto (con interpolazione $600 \text{ mm} < d \leq 800 \text{ mm}$),

$$v_{min} = \begin{cases} \frac{0,0525}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} & \text{if } d \leq 600 \text{ mm} \\ \frac{0,0375}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} & \text{if } d > 800 \text{ mm} \end{cases} = \frac{0,0492}{1,5} \cdot (1,557)^{\frac{3}{2}} \cdot (30)^{\frac{1}{2}} = 0.349 \text{ N/mm}^2$$

Eq. 6.2.b [8] Resistenza minima al taglio di progetto, $V_{Rd,c,min} = v_{min} b_w d = 0.349 \cdot 350 \cdot 644 = 78.7 \text{ kN}$

Sistenza al taglio di progetto, $V_{Rd,c} = \left[0.1 \cdot 1.557 \cdot (100 \cdot 0.02 \cdot 30)^{\frac{1}{3}} \right] 350 \cdot 644 = 137.4 \text{ kN}$

$\therefore V_{Rd,c} \leq V_{Ed}$, rinforzo richiesto!

- 6.2.1 (5) [8] Verifica della sezione rinforzata, $V_{Rd} = \min(V_{Rd,s}; V_{Rd,max}) \geq V_{Ed}$
- NCI Zu 6.2.3 (1) [12] Braccio della leva, $z = \min(0.9 \cdot 644; \max(644 - 2 \cdot 40; 644 - 40 - 30)) = 574 \text{ mm}$
- NDP Zu 6.2.3 (2) [12] L'angolo del puntone è determinato da: $1.0 \leq \cot \theta \leq \frac{1.2 + 1.4 \sigma_{cp} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,cc} / V_{Ed}} \leq 3.0$

Eq. 6.7bDE [12] Dove $V_{Rd,cc} = 0.5 \cdot 0.48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \left(1 - 1.2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \cdot b_{w,eff} \cdot z = 0.5 \cdot 0.48 \cdot \sqrt[3]{30} \cdot 350 \cdot 574 = 149.8 \text{ kN}$

Pertanto, l'angolo minimo del puntone, $\theta = \cot^{-1}\left(\frac{1.2}{1 - 149.8/477}\right) = 29.75^\circ$ (utilizzate $\theta = 30^\circ$ per la progettazione)

Eq. 2.1 [14] Resistenza del puntone di compressione, $V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 350 \cdot 574 \cdot 0.75 \cdot 17}{\cot(30) + \tan(30)} = 1109.2 \text{ kN}$

Eq. 6.17 [8] Forza di trazione aggiuntiva da taglio, $\Delta F_{td} = 0.5 \cdot 477 \cdot \cot(30) = 413.1 \text{ kN}$

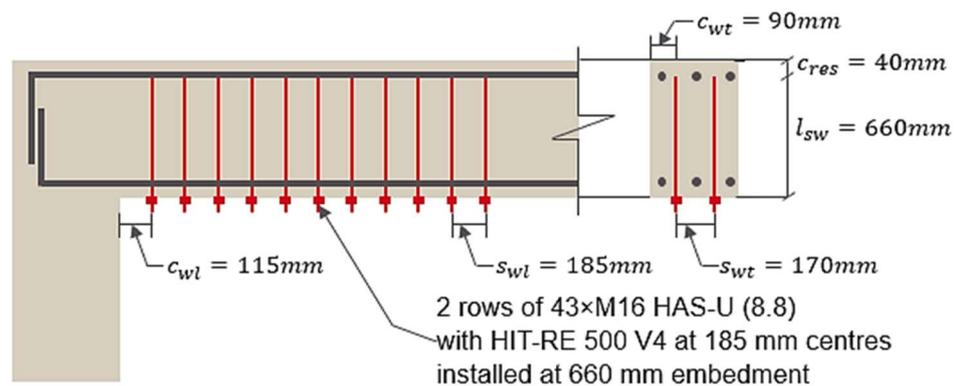
Ipotizzando l'installazione di **due** file di M16 ($A_{sw} = 157 \text{ mm}^2$) distanziate a **185 mm** centri lungo la lunghezza della trave dal lato della tensione, $k_{pi} = 0.735$, l'area sollecitata delle barre di rinforzo post-installate per metro di lunghezza:

2.2.3 [14] $a_{sw} = \frac{n_{swt} \cdot A_{sw}}{s_{wl}} = \frac{2 \cdot 157}{185} \cdot 10^3 = 1697.3 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Eq. 2.3 [14] Resistenza di progetto al taglio mediante armatura a taglio post-installata:

$$V_{Rd,s} = k_{pi} \cdot k_s \cdot f_{ywd} \cdot a_{sw} \cdot z \cdot \cot \theta = 0.735 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 1.6973 \cdot 574 \cdot \cot(30) = 483.7 \text{ kN} > 477 \text{ kN}$$

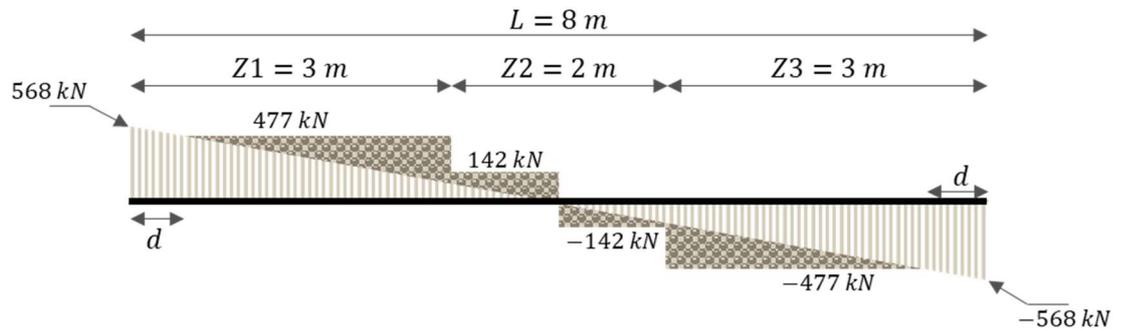
$\therefore V_{Rd} > V_{Ed}$, progettazione soddisfatta!



Specifiche: Installate 2 file di 43xM16 HAS-U 8.8 con HIT-RE 500 V4 distanziate di 185 mm lungo la lunghezza della trave con una profondità di inserimento di 660 mm, con le file distanziate di 170 mm.

Leve per l'ottimizzazione

Per un carico uniformemente distribuito, utilizzato nell'esempio di lavoro precedente, la forza di taglio, V_{Ed} , si riduce nella sezione centrale di un elemento strutturale, dividendo di fatto la trave in tre zone. La Tabella 8 riassume i risultati della stessa procedura di calcolo per l'esempio precedente, ma con un diagramma di taglio a gradini mostrato nella Figura 15 che dimostra una **riduzione** del numero complessivo di elementi necessari **da 86 a 71**.


 Figura 15: Diagramma della forza di taglio a gradini dopo aver sezionato la trave in tre zone (la zona 2 è una zona comune per $V_{Ed} = \pm 142 \text{ kN}$)

Zona	n_{wt} [-]	s_{wl} [mm]	θ [°]	a_{sw} [mm/m]	$V_{Rd,max}$ [kN]	$V_{Rd,s}$ [kN]	Elementi di rinforzo / zona
Z1	2	185	30	1697	1109.2	483.7	32
Z2	1	$s_{wl,max} = 300$	30	523	1109.2	149.1	7
Z3	2	185	30	1697	1109.2	483.7	32

Tabella 8: Sintesi del progetto con tre zone (la spaziatura massima nella zona 2 non supera i limiti prescritti in [12]).

8. PANORAMICA DEL MODULO DI RINFORZO A TAGLIO DI PROFIS ENGINEERING

Come nel caso della progettazione di armature a taglio, come le staffe gettate all'interno di elementi in calcestruzzo, trovare manualmente la soluzione di rinforzo ottimale può essere un esercizio molto ripetitivo e dispendioso in termini di tempo, dato il numero di scelte diverse in termini di diametro, spaziatura e posizionamento. Il **software di progettazione basato su cloud** PROFIS Engineering di Hilti include un **modulo dedicato** alla valutazione e al rinforzo degli elementi in calcestruzzo carenti a taglio, che assiste gli ingegneri strutturali nella valutazione della resistenza degli elementi esistenti e nel loro rinforzo, garantendo così un flusso di lavoro più sicuro ed efficiente. Tra i principali vantaggi dell'utilizzo del modulo di rinforzo a taglio di PROFIS Engineering vi sono:

- Selezione dell'elemento lineare e planare in calcestruzzo.
- Definizione del tipo, della geometria e dei parametri del materiale dell'elemento in calcestruzzo esistente per verificare la necessità di rinforzo sotto una nuova forza di taglio.
- Suddivisione dell'elemento in calcestruzzo in diverse zone per consentire l'inserimento dei carichi secondo un diagramma di forze di taglio a gradini.
- Definizione del diametro del rinforzo, della spaziatura e dell'angolo ottimale del puntone di compressione.
- PROFIS Engineering genera il layout e calcola il totale degli elementi di rinforzo necessari in base agli input definiti in precedenza.
- PROFIS Engineering visualizza i rapporti di utilizzo per la verifica del calcestruzzo esistente, la resistenza dell'acciaio dell'armatura di rinforzo a taglio e la resistenza massima a compressione del puntone.
- Per la documentazione, PROFIS Engineering produce un report di progettazione dettagliato che include le fasi di calcolo e fornisce le informazioni necessarie per la progettazione dell'armatura.

9. SOLUZIONI HILTI PER IL RINFORZO A TAGLIO

Le nuove soluzioni Hilti per il rinforzo a taglio, approvate con **DIBt aBG Z15.5-383**, sono riassunte di seguito.

Malta HIT-RE 500 V4 + successiva armatura di rinforzo:

- Barre HAS(-U) A4: M12, M16, M20 e M24
- Barre HAS(-U) 8.8: M12, M16, M20 e M24
- Set di riempimento Hilti (8.8 & A4): M12, M16, M20 e M24

Design Software:
PROFIS Engineering Suite

Installation tools:

- Injection dispenser
- Automated torque

Mortar:

- HIT-RE 500 V4

Steel elements:

- HAS (cut or meter) & HAS-U both in A4 & 8.8 with filling set

Installation tools:

- Drill machine
- Hammer drill bit
- Hollow drill bit
- Setting tool

10. RIEPILOGO

La trasformazione e il riutilizzo di vecchie strutture possono offrire numerosi vantaggi rispetto alle nuove costruzioni, ma ogni struttura richiede il raggiungimento di obiettivi specifici quando viene rinforzata. In base alla filosofia progettuale scelta, l'ingegnere strutturale può risolvere le carenze di taglio negli elementi lineari o planari in calcestruzzo utilizzando vari metodi, alcuni dei quali sono meno invasivi di altri. L'uso di armatura a taglio post-installata, come la soluzione di Hilti con barre filettate HAS(-U) e malta HIT-RE 500 V4, è un esempio innovativo di un metodo minimamente invasivo che può migliorare significativamente la resistenza a taglio di un elemento strutturale.

Dopo la valutazione e l'ottenimento del permesso generale di costruzione (*aBG*) come sistema da parte del DIBt, gli ingegneri possono utilizzare un approccio progettuale basato sull'Eurocodice 2, integrato nel PROFIS Engineering Suite di Hilti, per giungere a una soluzione fattibile, scegliendo tra i parametri chiave di progettazione del diametro, della spaziatura e del puntone inclinato variabile. Grazie a un'interfaccia intuitiva, il nuovo modulo di rinforzo a taglio aiuta gli ingegneri a risparmiare tempo durante la fase di progettazione, apportando valore ai clienti e contribuendo a un ambiente costruito più sicuro e resiliente.

11. RIFERIMENTI

- [1] N. Addy, "Making sustainable refurbishment of existing buildings financially viable," in *Sustainable Retrofitting of Commercial Buildings - Cool Climates*, S. Burton, Ed., Abingdon, Routledge, 2015, pp. 57-73.
- [2] fib Task Group 8.1, "fib Bulletin 103 - Guide to Strengthening of Concrete Structures," Fédération internationale du béton (fib), Lausanne, 2022.
- [3] W. Ritter, "Die Bauweise Hennebique," *Schweizerische Bauzeitung*, vol. 17, pp. 41-43, 49-52 und 59-61, 1899.
- [4] ASCE-ACI Committee 445, "Recent approaches to shear design of structural concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 12, pp. 1375-1417, 1998.
- [5] E. Mörsch, *Der Eisenbetonbau – Seine Theorie und Anwendung*, 1 ed., vol. 1, Stuttgart: Verlag Konrad Wittwer, 1922.
- [6] P. Kotes, *Concrete Structures - Part II*, Zilina: University of Zilina, 2008, p. 92.
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, "Teil 1: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Heft 600)," Beuth, Berlin, 2020.
- [8] EN 1992-1-1:2004: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels: CEN, 2004.
- [9] ACI Committee 440, "ACI PRC-440.2-23: Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Stengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023.
- [10] CEN, "EN 1990:2002+A1:2005 - Basis of structural Design," CEN, Brussels, 2005.
- [11] Hilti, "ETA-20/0541: Injection system Hilti HIT-RE 500 V4," DIBt, Berlin, 05.05.2023.
- [12] DIN EN 1992-1-1/NA: National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Berlin: DIN, 2013.
- [13] EN 1992-2:2018: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 2: Concrete bridges - Design and detailing rules, Brussels: CEN, 2018.
- [14] Deutsches Institut für Bautechnik, "Z-15.5-383 - Hilti Querkraft-Verstärkungssystem mit Hilti HIT-RE 500 V4," DIBt, Berlin, 2024.



Hilti (Schweiz) AG
Kalchbühlstrasse 22, 8038 Zürich
Tel.: 0844 84 84 85

www.facebook.com/hiltigroup
www.hilti.group