

GUIDA TECNICA

Data di emissione: 03.11.2025

Da: Hilti Schweiz AG

Rinforzo a punzonamento con Hilti HIT-Punching Shear ai sensi di SIA 262:2017

1. Introduzione

Nel 2024-25, Hilti AG ha condotto un progetto di qualificazione per il sistema di rinforzo post-installato (PI) «HIT-Punching Shear» con HIT-RE 500 V4 finalizzato al rinforzo strutturale di solette e fondazioni in calcestruzzo armato (CA) carenti in resistenza a punzonamento. La qualificazione includeva test su larga scala e valutazioni con carichi statici e quasi statici. Questa vasta campagna sperimentale ha portato al rilascio dell'autorizzazione generale per la tecnica costruttiva (*allgemeine Bauartgenehmigung*) numero **aBG Z-15.5-387** valido in Germania per la nuova soluzione di rinforzo post-installata (PI) di Hilti.

L'**aBG Z-15.5-387** offre una procedura di progettazione basata su **DIN EN 1992-1-1:2011** integrata con l'Allegato Nazionale Tedesco **DIN EN 1992-1-1/NA:2013**. Tale procedura è stata sviluppata calibrando risultati sperimentali in conformità ai requisiti generali di affidabilità previsti dagli Eurocodici. Le equazioni di progettazione che ne risultano si allineano completamente al modello di resistenza al taglio da punzonamento adottato in **DIN EN 1992-1-1:2011**.

Sulla base di queste premesse, il presente documento funge da guida supplementare per l'utilizzo dell'aBG nella progettazione dell'intervento di rinforzo HIT-Punching Shear in Svizzera. Esso confronta le equazioni di progettazione relative alla soluzione post-installata descritte nell'**aBG Z-15.5-387** con i requisiti di **SIA 262:2017**, adattando, ove necessario, le equazioni o i parametri per soddisfare gli standard di sicurezza e le regole di dettaglio del calcestruzzo previste dalla norma svizzera di progettazione.

2. Differenze chiave tra DIN EN 1992-1-1/NA e SIA 262 per la progettazione nella verifica della resistenza a punzonamento

In **DIN EN 1992-1-1/NA:2013**, le equazioni di progettazione per gli elementi in calcestruzzo armato (CA) con armatura per la resistenza a punzonamento derivano da un modello analogo a quello adottato per la resistenza a taglio di travi e solette, in cui un coefficiente di resistenza, $C_{Rd,c}$, moltiplica un'espressione semi-empirica che tiene conto dei principali parametri influenti (ossia la profondità utile d , il rapporto di armatura a flessione ρ_l e la resistenza caratteristica del calcestruzzo f_{ck}). **SIA 262:2017** si basa invece sul modello meccanico, conosciuto come Critical Shear Crack Theory (teoria di fissurazione critica da taglio, CSCT), secondo il quale l'apertura della fessura critica da taglio determina in larga misura la resistenza al punzonamento, con ampiezza della fessura proporzionale al prodotto della rotazione della soletta e della profondità utile.

SIA 262:2017 offre ai progettisti la scelta tra metodi semplificati e metodi dettagliati per determinare la resistenza al punzonamento degli elementi in calcestruzzo con armatura per la resistenza a punzonamento. Questi metodi incorporano o si basano direttamente su diversi Livelli di Approssimazione dal **fib Model Code 2010**. Per un elemento con armatura per la resistenza al punzonamento, i contributi alla resistenza complessiva forniti dal calcestruzzo e dall'armatura in acciaio non sono costanti, a differenza di σ_c e σ_s , poiché all'aumentare della rotazione della soletta il contributo del calcestruzzo diminuisce rispetto a quello dell'acciaio.

3. Differenze nelle formulazioni di punzonamento in DIN EN 1992-1-1:2011 + NA e SIA 262:2017

In entrambi gli standard, la resistenza complessiva al punzonamento è data dalla somma dei contributi del calcestruzzo, $V_{Rd,c}$, e dell'armatura in acciaio, $V_{Rd,s}$; tuttavia, a differenza di **DIN EN 1992-1-1:2011**, la sezione di controllo utilizzata per le verifiche per il punzonamento in **SIA 262:2017** è più vicina al bordo dell'area caricata, cioè posta a $0,5d_{ef}$ invece di $2,0d_{ef}$, dove d_{ef} è la profondità utile della soletta.

Inoltre, l'influenza combinata dell'eccentricità (derivante dai momenti di flessione e dalla differenza tra il baricentro del pilastro e quello dell'area delimitata dalla sezione di controllo, u_{crit}) viene trattata diversamente nei due standard: in **DIN EN 1992-1-1:2011**, un fattore di incremento del carico β , amplifica la forza di taglio di progetto per il punzonamento, V_{Ed} ; in **SIA 262:2017**, il perimetro della sezione di controllo viene ridotto mediante il relativo fattore k_e . Entrambi i fattori aumentano efficacemente la tensione di taglio di progetto, τ_{Ed} . Per avere un quadro sintetico, la Tabella 1 riassume le formulazioni progettuali chiave nei due standard.

Tabella 1: Le espressioni chiave per la progettazione a punzonamento secondo DIN EN 1992-1-1/NA:2013 e SIA 262:2017

Standard di progettazione	DIN EN 1992-1-1/NA:2013	SIA 262:2017
Distanza della sezione di controllo u_{crit} , dall'area di carico è impostata su:	$2,0d_{ef}$	$0,5d_{ef}$
Fattore per la distribuzione eccentrica del taglio:	β	k_e
Perimetro di controllo ridotto per effetto della distribuzione eccentrica del taglio:	-	$u_{red} = k_e \cdot u_{crit}$
Forza di taglio di progetto per il punzonamento, V_{Ed} [kN]	$\beta \cdot V_{Ed}$	V_{Ed}
Resistenza a punzonamento senza armatura di punzonamento (solette) $V_{Rd,c}$ [kN]	$\left(\max \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}}, v_{\min} \right] + k_1 \sigma_{cp} \right) u_{crit} d_{ef}$	$k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u_{red}$
Resistenza al punzonamento senza armatura di punzonamento (fondazioni), $V_{Rd,c}$ [kN]	$\left(\max \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}}, v_{\min} \right] \cdot \frac{2d_{ef}}{a_{crit}} \right) u_{crit} d_{ef}$	$k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u_{red}$
Resistenza al punzonamento fornita dall'armatura $V_{Rd,s}$ [kN]	$1,5 \left(\frac{d_{ef}}{s_r} \right) \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd,ef}$	$\Sigma A_{sw} \cdot k_e \cdot \sigma_{swd}$
Resistenza combinata a punzonamento senza armatura di punzonamento, $V_{Rd,cs}$ [kN]	$0,75V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$	$V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$
Resistenza massima della biella compressa, $V_{Rd,max}$	$\begin{cases} k_{max} \cdot V_{Rd,c} \\ k_{max} = 1,4 \end{cases}$	$\begin{cases} 2,0 \cdot k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u_{red} \leq \\ 3,5 \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u_{red} \end{cases}$

4. Adattamenti a SIA 262:2017 da usare con il sistema di rinforzo HIT-Punching Shear

Poiché i risultati della campagna sperimentale mostrano una buona correlazione sia con la che con la, la progettazione secondo la con il sistema di rinforzo Hilti HIT-Punching Shear richiede solo modifiche minori, evidenziate in **rosso** in questa sezione.

4.1 Verifica della resistenza senza armatura di punzonamento

Le verifiche della resistenza a punzonamento in [4] vengono condotte valutando innanzitutto la resistenza senza armatura di punzonamento, ossia il contributo del calcestruzzo, sulla sezione di controllo, u , posta a $0.5 d_{ef}$ dalla faccia del supporto. Se il supporto non penetra nella soletta, come illustrato sulla [Figura 20](#) in [4], la profondità utile, d_v , e la sezione di controllo, u , riportate nell' [Equazione 57](#) [4] sono sostituite rispettivamente con d_{ef} e u_{red} come indicato nella Tabella 1.

$$V_{Rd,c} = k_d k_r \tau_{cd} d_{ef} u_{red} \quad (\text{kN}) \quad (\text{Eq. 1})$$

dove:

k_d : La riduzione della resistenza del calcestruzzo nel caso di utilizzo di elementi di rinforzo di diametro M16 in solette con profondità utile, $d_{ef} \leq 280 \text{ mm}$, è data da:

$$k_d = \begin{cases} 0.95, & \text{M16 and } d_{ef} \leq 280 \text{ mm} \\ 1.00, & \text{casi standard} \end{cases}$$

La riduzione della resistenza del calcestruzzo è attribuita ad un copriferro residuo maggiore, c_{res} , necessario per la barra M16 nelle solette più sottili - 40 mm anziché 35 mm - per evitare il distacco del calcestruzzo sul lato opposto durante la foratura (vedere Tabella 4). In tali casi, il copriferro residuo maggiore può aumentare la probabilità che la fessura di taglio critica attraversi facilmente la sommità della barra. Ciò ha un impatto anche sul secondo coefficiente, k_{pi} , durante la verifica della resistenza nella zona con armatura di punzonamento (vedere Sezione **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** di seguito).

$$\tau_{cd} = \frac{0.3 \eta_t \sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c}: \text{resistenza a taglio di progetto del calcestruzzo,} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{Eq. 3})$$

f_{ck} : resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo, in MPa, dalla [Tabella 3](#).

γ_c : Fattore di sicurezza parziale per il calcestruzzo, secondo la [Clausola 2.3.2.6](#).

η_t : il coefficiente di resistenza del calcestruzzo che tiene conto della durata dell'esposizione e dell'età. Secondo la [Clausola 4.2.1.3](#), questo valore può essere 0,85; 1,0 o 1,2.

$$k_r = \frac{1}{0.45 + 0.18 \cdot k_g \cdot \psi \cdot d_{ef}} \leq 2: \text{coefficiente che tiene conto della rotazione della soletta} \quad (\text{Eq. 58})$$

$$k_g = \frac{48}{16 + D_{max}}: \text{coefficiente per l'effetto dell'ingranamento degli aggregati}$$

D_{max} : dimensione massima dell'aggregato

$$\text{Coefficiente di rotazione della soletta (determinato per ciascun asse), } \psi = 1.5 \cdot \frac{r_s}{d_{ef}} \cdot \frac{f_{yd}}{E_s} \cdot \left(\frac{m_{sd}}{m_{Rd}} \right)^{3/2} (\text{rads}) \quad (\text{Eq. 59})$$

- r_s : Distanza dall'asse del supporto al punto di inflessione
- f_{yd} : resistenza a snervamento dell'armatura a flessione
- E_s : Modulo elastico dell'armatura a flessione
- m_{sd} : Momento flettente nella fascia di supporto

- m_{Rd} : Resistenza alla flessione nella fascia di supporto che, secondo la teoria rigido-plastica, può essere considerata come:

$$m_{Rd} = \rho \cdot d^2 \cdot f_{yd} (1 - 0.5 \rho \cdot f_{yd} / f_{cd}) \quad (\text{kNm/m}) \quad (\text{Eq. 19})$$

La rotazione della soletta [Eq. 59](#) può essere stimata per ogni direzione secondo uno dei tre Livelli di Approssimazione (LOA):

- **LOA 1** si applica alle solette con appoggi regolari con un rapporto tra le campate $0.5 \leq \frac{L_x}{L_y} \leq 2.0$ e senza grande redistribuzione plastica, $m_{sd}/m_{Rd} = 1.0$, e $r_s = 0.22L_x$ o $0.22L_y$ (L_x e L_y sono le lunghezze di campata rispettivamente nella direzione x e y).
- **LOA 2** segue gli stessi passaggi di LOA 1, tranne per il fatto che il momento flettente nella fascia di supporto, m_{sd} , è determinato dalle [Eq. 61, 62, 63 o 64](#). La larghezza della fascia di supporto è determinata da:

$$b_s = 1.5 \sqrt{r_{sx} \cdot r_{sy}} \leq l_{min}, \text{ where } l_{min} = \min(L_x; L_y) \quad (\text{mm}) \quad (\text{Eq. 60})$$

- **Il livello di approssimazione (LOA) 3** si applica a solette con geometrie complesse in cui il rapporto tra le campate $L_x/L_y < 0.5$ o $L_x/L_y > 2.0$, m_{sd} è determinato mediante [Eq. 61, 62, 63 o 64](#), ed r_s è determinato mediante analisi dettagliata, ad esempio utilizzando un modello agli elementi finiti. Il fattore 1.5 nell' [Eq. 59](#) è sostituito da 1.2. Per i pilastri di bordo e d'angolo, $r_{s,min} \geq 0.67b_{sr} \leq b_s$ con la [Figura 24](#).

4.2 Verifica della massima resistenza a punzonamento e della resistenza al di fuori della zona di armatura di punzonamento

Analogamente all' [Eq. 69](#), la massima resistenza al punzonamento è limitata alla seguente condizione per evitare lo schiacciamento delle bielle compresse di calcestruzzo in prossimità del supporto:

$$V_{Rd,max} = k_d \cdot (2.0 \cdot k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_{ef} \cdot u_{red}) \leq k_d \cdot (3.5 \cdot \tau_{cd} \cdot d_{ef} \cdot u_{red}) \quad 5)$$

L'estensione della zona con armatura di punzonamento viene determinata valutando la resistenza a punzonamento al di fuori della zona armata, che può essere determinata iterativamente oppure in base alla la seguente condizione:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c,out} = k_r \tau_{cd} d_{ef,out} u_{out} \quad (\text{kN}) \quad (\text{Eq. 6})$$

- $d_{ef,out}$: profondità utile della soletta o della fondazione al perimetro esterno, ridotta del copriferro residuo, c_{res} , analoga alla [Clausola 4.3.6.5.9](#) e [Figura 25](#).
 - Così, $d_{ef,out} = d_{ef} - c_{res}$
- u_{out} : perimetro esterno oltre il quale non è più richiesta armatura di punzonamento, definito a $0.5d_{ef}$ dal perimetro di armatura più distante dalla faccia del supporto, secondo la [Clausola 4.3.6.5.9](#) e la [Figura 25](#).
 - **Nota:** u_{out} in genere viene modificato da $k_{e,out}$, che tiene conto dell'eccentricità del perimetro esterno rispetto al baricentro del supporto.
 - Pertanto, $u_{out,mod} = u_{out}/k_{e,out}$, dove $k_{e,out}$ può essere determinato da $k_{e,out} = 1/(1 + e_u/2r_{out})$ e r_{out} è la distanza dal centro del supporto a u_{out} .
 - **Regole di dettaglio: Limiti al posizionamento e alla spaziatura massima e minima**

Le sezioni rinforzate con il sistema di rinforzo Hilti HIT-Punching Shear sono state progettate e dettagliate secondo, in cui la distanza del primo perimetro dell'armatura, s_0 , dalla faccia di supporto è posizionata tra $0.3d_{ef} \leq s_0 \leq 0.5d_{ef}$, dove il superamento del limite superiore dovrebbe generalmente essere evitato in quanto comporterebbe il rischio che la fessura critica possa svilupparsi completamente senza essere intercettata dagli elementi in acciaio post-installati (PI). La distanza tra i perimetri di armatura successivi, s_r , è in genere maggiore

o uguale a s_0 , ma non deve essere inferiore alla distanza minima tra due elementi di rinforzo, s_{min} come riportato nella Tabella 3.

Secondo, solo l'armatura di rinforzo, $\sum A_{sw}$, posizionata tra $0.35d_{ef}$ e $1.0d_{ef}$ contribuisce alla resistenza complessiva al punzonamento descritta dall' Eq. 2 del presente documento. Pertanto, in modo analogo a quanto riportato nella Figura 39 e nella Tabella 20 di, s_0 e s_r per il sistema di rinforzo HIT-Punching Shear sono collegati alla profondità utile, d_{ef} , della soletta o della fondazione nella Tabella 2.

Tabella 2: Distanza radiale minima e massima per solette e fondazioni nel sistema di rinforzo HIT-Punching Shear

Profondità statica utile, d_{ef} [mm]	Distanza dall'area caricata al primo perimetro di armatura, s_0	Distanza tra il primo, il secondo e i perimetri successivi, s_r
160-180	$0,35d_{ef} \leq s_0 \leq 0,5d_{ef}$	$s_{min} \leq s_r \leq 0.66d_{ef}$
181-340		$s_{min} \leq s_r \leq 0.75d_{ef}$
341-1100		$s_{min} \leq s_r \leq 200 + d_{ef}/6$

A parte la regola generale relativa all'interasse tra barre adiacenti per consentire una distribuzione uniforme del calcestruzzo e degli aggregati durante il getto del calcestruzzo, non è previsto un interasse minimo specifico, s_{min} ca all'armatura di punzonamento in e. Tuttavia, è necessario un interasse relativamente maggiore tra gli elementi di rinforzo post-installati adiacenti per evitare la fessurazione del calcestruzzo tra gli elementi, fenomeno emerso durante la campagna sperimentale e definito nella Tabella 3. Inoltre, sebbene l'interasse minimo si applichi anche all'interasse tangenziale, s_t , tra elementi di rinforzo adiacenti in ciascun perimetro di rinforzo, il massimo non deve superare i limiti definiti nella Tabella 3.

Tabella 3: Interasse radiale e tangenziale minimo e interasse tangenziale massimo per solette e fondazioni

Elemento di rinforzo	Interasse radiale e tangenziale minimo, s_{min}	Interasse tangenziale tra elementi adiacenti:	
		Nei primi due perimetri di rinforzo	Nel terzo perimetro e oltre
M12	72	$s_{min} \leq s_t \leq 1.5d_{ef}$	$s_{min} \leq s_t \leq 2.0d_{ef}$
M16	96		
M20	120		
M24	144		

La Tabella 20 di mette inoltre in relazione il diametro dell'armatura di punzonamento con la profondità utile, parametri che sono sostituiti dai limiti riportati nella Tabella 4 per il sistema di rinforzo Hilti HIT-Punching Shear. Inoltre, la Clausola 5.5.3.12 di prescrive un copriferro massimo di $c_v = d_v/6$ tra la sommità dell'armatura di punzonamento e la faccia compressa della soletta; tuttavia, se questa condizione non può essere soddisfatta, ad esempio a causa di un copriferro maggiore richiesto dalla classe di esposizione, le resistenze a punzonamento, $V_{Rd,c}$ e $V_{Rd,s}$, devono essere ridotte del 30%.

Per il sistema di rinforzo Hilti HIT-Punching Shear, c_v è indipendente dalla classe di esposizione ed è invece descritto da un valore fisso di c_{res} nella Tabella 4, che è necessario per evitare il distacco del calcestruzzo durante la foratura e mantenuto indipendentemente dallo spessore della sezione, h . La riduzione della resistenza al punzonamento non è richiesta poiché le prove sono state condotte in modo soddisfacente con la minima profondità utile ammissibile di $d_{ef} = 160 \text{ mm}$ che corrisponde al rapporto più grande di c_{res}/d_{ef} , per la condizione di installazione più critica, vale a dire a partire dalla faccia compressa della sezione.

Tabella 4: Copriferro residuo e profondità utile minima della sezione per ciascuna dimensione dell'elemento di rinforzo

Dimensione della barra filettata	M12	M16		M20	M24
Profondità utile minima, $d_{ef,min}$	160	160	280	350	420
Copriferro residuo, c_{res}	35	40	40	45	60

Un esempio pratico nell'allegato A riassume la procedura di progettazione utilizzando il [4] insieme a [1]. Per requisiti di progettazione specifici, utilizzare il modulo per il *rinforzo a punzonamento (Punching Shear strengthening)* di PROFIS Engineering o contattare il supporto di Hilti Engineering.

Allegato A: Esempio di progettazione di una soletta rinforzata con il sistema di rinforzo HIT-Punching Shear

1. Input

- Carico di progetto applicato: $g_d + q_d = 20 \text{ kN/m}^2$
- Reazioni vincolari (di appoggio) di progetto: $N_{Ed} = 1250 \text{ kN}$ e $V_{inst} = 500 \text{ kN}$
- Momenti di flessione di progetto: $M_{Ed,x} = 50 \text{ kN}$ & $M_{Ed,y} = 30 \text{ kN}$
- Dimensioni del pilastro ($C_x \times C_y$): $200 \times 600 \text{ mm}$
- Lunghezze di campata fino ai pilastri adiacenti ($L_x \times L_y$): $7000 \times 7000 \text{ mm}$
- Posizione – Pilastro **interno**: $k_e = 0.94$ (calcolata)
- Spessore soletta: $h = 350 \text{ mm}$
- Profondità utile in x e y : $d_x = 317 \text{ mm}$; $d_y = 301 \text{ mm}$
- Resistenza del calcestruzzo della soletta e dimensione massima degli aggregati:
 $f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$, $D_{max} = 32 \text{ mm}$
- Resistenza dell'acciaio dell'armatura a flessione: $f_{sk} = 500 \text{ N/mm}^2$, $\gamma_s = 1.15$, $E_s = 205 \text{ GPa}$
- Parametri del calcestruzzo:

$f_{cd} [\text{N/mm}^2]$	$\eta_t [-]$	$\eta_{fc} [-]$	$\gamma_c [-]$	$\tau_{cd} [\text{N/mm}^2]$	$f_{ctm} [\text{N/mm}^2]$	$f_{bd} [\text{N/mm}^2]$
20.59	0.85	0.91	1.50	0.931	2.90	2.703

Il rapporto di armatura longitudinale è assunto costante per metro di larghezza della soletta:

- Nella direzione x , $\rho_{l,x} = \frac{A_{sLx}}{1000 \cdot d_x} = \frac{2011}{1000 \cdot 317} = 0.634\%$ (da $\Phi 16 \text{ mm}$ a centri di 100 mm)
- Nella direzione y , $\rho_{l,y} = \frac{A_{sLy}}{1000 \cdot d_y} = \frac{2011}{1000 \cdot 301} = 0.668\%$ (da $\Phi 16 \text{ mm}$ a centri di 100 mm)

2. Definizioni perimetrali

Descrizione	Variabile	Proposta
Perimetro del pilastro	u_0	1600 mm
Profondità utile media	d_{ef}	309 mm
Perimetro di controllo a $0,5d_{ef}$ con riduzione dovuta all'apertura	u_{crit}	2571 mm
Riduzione dovuta alle aperture	Δu_{crit}	0 mm
Area contenuta all'interno del perimetro di controllo	A_{crit}	442191 mm ²
Perimetro di controllo resistente al taglio	u_{red}	2417 mm
Perimetro esterno dove non è richiesta l'armatura	u_{out}	4018 mm
Perimetro esterno modificato dove non è richiesta l'armatura	$u_{out,mod}$	4223 mm

3. Forza di taglio di progetto

La forza di taglio di progetto per il punzonamento viene calcolata in base al carico applicato all'interno del perimetro di controllo:

4.3.6.2.6

$$V_{Ed} = N_{Ed} - (g_d + q_d) \cdot A_c = 1250 - (20 \cdot 0.442) = 1241 \text{ kN}$$

4. Parametri di eccentricità del carico

- Eccentricità tra i baricentri della sezione di controllo e del pilastro in x , $\Delta e_x = 0 \text{ mm}$
- Eccentricità tra i baricentri della sezione di controllo e del pilastro in y , $\Delta e_y = 0 \text{ mm}$
- Eccentricità del carico in x , $|e_{u,x}| = \left| \frac{M_{Ed,x}}{V_{Ed}} - \Delta e_x \right| = \left| \frac{50 \cdot 10^6}{1241 \cdot 10^3} - 0 \right| = 40 \text{ mm}$
- Eccentricità del carico in y , $|e_{u,y}| = \left| \frac{M_{Ed,y}}{V_{Ed}} - \Delta e_y \right| = \left| \frac{30 \cdot 10^6}{1241 \cdot 10^3} - 0 \right| = 24 \text{ mm}$
- Eccentricità risultante, $e_u = \sqrt{e_{u,x}^2 + e_{u,y}^2} = \sqrt{40^2 + 24^2} = 47 \text{ mm}$

4.3.6.2.4

- Diametro di un cerchio con area equivalente a A_{crit} , $b = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_{crit}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 442191} = 750 \text{ mm}$

Eq. 56 [4]

- Parametro di eccentricità del carico: $k_e = \left(\frac{1}{1 + e_u/b} \right) = \left(\frac{1}{1 + 47/750} \right) = 0.94$

5. Rotazioni delle solette (calcolate con Livello di Approssimazione 2 per 4.3.6.4.2)

Distanza dal baricentro del pilastro al punto di inflessione (momento nullo):

4.3.6.4.4

$$r_{s,x} = 0.22L_x = 0.22 \cdot 7000 = 1540 \text{ mm}$$

$$r_{s,y} = 0.22L_y = 0.22 \cdot 7000 = 1540 \text{ mm}$$

Larghezza della fascia di supporto per un pilastro interno: $b_s = 1.5\sqrt{r_{s,x} \cdot r_{s,y}} \leq l_{min} = \min(L_x; L_y)$

$$b_s = 1.5\sqrt{1540 \cdot 1540} = 2310 \text{ mm} \leq \min(7000; 7000)$$



Eq. 60

Momento nella fascia di supporto nella direzione x ($b_{sr,x} = b_s$):

$$\text{Eq. 61} \quad m_{sd,x} = V_{Ed} \left(\frac{1}{8} + \frac{|e_{u,x}|}{2b_{sr,x}} \right) = 1241 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{8} + \frac{40}{2 \cdot 2310} \right) = \mathbf{166 \text{ kNm}}$$

Momento nella fascia di supporto nella direzione y ($b_{sr,y} = b_s$):

$$\text{Eq. 61} \quad m_{sd,y} = V_{Ed} \left(\frac{1}{8} + \frac{|e_{u,y}|}{2b_{sr,y}} \right) = 1241 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{8} + \frac{24}{2 \cdot 2310} \right) = \mathbf{162 \text{ kNm}}$$

Resistenza alla flessione nella fascia di supporto nella direzione x : $m_{Rd,x} = \rho_{l,x} \cdot d_x^2 \cdot f_{yd} \left(1 - 0.5 \rho_{l,x} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \right)$

$$\text{Eq. 18} \quad m_{Rd,x} = 0.00634 \cdot 317^2 \cdot 435 \left(1 - 0.5 \cdot 0.00634 \cdot \frac{435}{20.59} \right) = \mathbf{259 \text{ kNm}}$$

Resistenza alla flessione nella fascia di supporto nella direzione y : $m_{Rd,y} = \rho_{l,y} \cdot d_y^2 \cdot f_{yd} \left(1 - 0.5 \rho_{l,y} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \right)$

$$\text{Eq. 18} \quad m_{Rd,y} = 0.00668 \cdot 301^2 \cdot 435 \left(1 - 0.5 \cdot 0.00668 \cdot \frac{435}{20.59} \right) = \mathbf{245 \text{ kNm}}$$

Rotazione della soletta nella direzione x : $\psi_x = 1.5 \cdot \frac{r_{s,x}}{d_x} \cdot \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \left(\frac{m_{sd,x}}{m_{Rd,x}} \right)^{3/2}$

$$\text{Eq. 59} \quad \psi_x = 1.5 \cdot \frac{1540}{317} \cdot \frac{435}{205000} \cdot \left(\frac{166}{259} \right)^{3/2} = 0.00795 \text{ rads}$$

Rotazione della soletta nella direzione y : $\psi_y = 1.5 \cdot \frac{r_{s,y}}{d_y} \cdot \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \left(\frac{m_{sd,y}}{m_{Rd,y}} \right)^{3/2}$

$$\text{Eq. 59} \quad \psi_y = 1.5 \cdot \frac{1540}{301} \cdot \frac{435}{205000} \cdot \left(\frac{162}{245} \right)^{3/2} = \mathbf{0.00875 \text{ rads}} \rightarrow \text{che regolano la rotazione}$$

6. Verifica senza armatura di punzonamento

$$\text{Eq. 37} \quad \text{Effetto dell'ingranamento degli aggregati, } k_g = \frac{48}{16+D_{\max}} = \frac{48}{16+32} = 1.0$$

$$\text{Eq. 58} \quad \text{Parametro di rotazione, } k_r = \min \left(\frac{1}{0.45+0.18 \cdot k_g \cdot \psi \cdot d_{ef}}; 2 \right) = \min \left(\frac{1}{0.45+0.18 \cdot 1.0 \cdot 0.00875 \cdot 309}; 2 \right) = \mathbf{1.068}$$

$$\text{Eq. 1} \quad \text{Resistenza di progetto senza armatura di punzonamento, } V_{Rd,c} = k_d (k_r \tau_{cd} d_{ef} u_{red})$$

$$V_{Rd,c} = 1.0 \cdot (1.068 \cdot 1.075 \cdot 309 \cdot 2417) = 857 \text{ kN}$$

Poiché $V_{Rd,c} \leq V_{Ed}$, è necessario un rinforzo!

Resistenza massima punzonamento ($k_d = 1.0$): $V_{Rd,max} = k_d \cdot \min(2 \cdot k_r; 3,5) \cdot \tau_{cd} \cdot d_{ef} \cdot$

$$u_{redRd,max} = 1.0 \cdot \min(2 \cdot 1.068; 3,5) \cdot 1.075 \cdot 309 \cdot 2417 = 1715 \text{ kN}$$

Dato che $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$ il rinforzo è possibile!

7. Verifica con il sistema di rinforzo HIT-Punching Shear

Riorganizzando l'Eq. 65, la resistenza di progetto a punzonamento deve soddisfare la seguente condizione:

$$\min(V_{Rd,c} + V_{Rd,s,pi}; V_{Rd,max}) \geq V_{Ed}$$

M16 8.8 HAS(-U) con $A_{sw} = 157 \text{ mm}^2$ è sufficiente per procedere con la verifica, con $d_{ef} = 309 \text{ mm}$, $k_d = 1.0$, e $k_{pi} = 0.82$ adottato per verificare $V_{Rd,s,pi}$.

Eq. 2 & Resistenza fornita dal rinforzo HIT-Punching Shear, $V_{Rd,s,pi} = k_{pi} \cdot (\sum A_{sw} \cdot k_e \cdot \sigma_{swd}) \geq 0.5 V_{Ed}$
Eq. 66

Resistenza di progetto efficace degli elementi di rinforzo ($f_{ywd} = 390 \text{ N/mm}^2$)

Eq. 4

$$\sigma_{swd} = \frac{E_{sw} \cdot \Delta\psi}{6} \cdot \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{ywd}} \cdot \frac{d_{ef}}{\phi_{sw}}\right) \leq f_{ywd}$$

$\Delta\psi = \psi(V_{Ed}) - \psi(V_{inst})$: rotazione efficace della soletta attivata dal sistema di rinforzo HIT-Punching Shear dopo l'intervento, calcolata come differenza tra la rotazione della soletta allo stato limite ultimo (ULS), $\psi(V_{ULS})$, e quella allo stato di carico quasi permanente durante l'installazione, $\psi(V_{inst})$. Poiché $V_{inst} = 500 \text{ kN}$, i momenti corrispondenti nella fascia di supporto sono:

Eq. 61 [4]

- Momento nella fascia di supporto nella direzione x ($b_{sr,x} = b_s$):

$$\Delta m_{sd,x} = V_{inst} \left(\frac{1}{8} + \frac{|e_{u,x}|}{2b_{sr,x}} \right) = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{8} + \frac{40}{2 \cdot 2310} \right) = 67 \text{ kNm}$$

Eq. 61 [4]

- Momento nella fascia di supporto nella direzione y ($b_{sr,y} = b_s$):

$$\Delta m_{sd,y} = V_{inst} \left(\frac{1}{8} + \frac{|e_{u,y}|}{2b_{sr,y}} \right) = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{8} + \frac{24}{2 \cdot 2310} \right) = 65 \text{ kNm}$$

- Rotazione della soletta nella direzione x : $\Delta\psi_x = 1.5 \cdot \frac{r_{s,x}}{d_x} \cdot \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \left[\left(\frac{m_{sd,x}}{m_{Rd,x}} \right)^{3/2} - \left(\frac{\Delta m_{sd,x}}{m_{Rd,x}} \right)^{3/2} \right]$

Eq. 59

$$\Delta\psi_x = 1.5 \cdot \frac{1540}{317} \cdot \frac{435}{205000} \cdot \left[\left(\frac{166}{259} \right)^{3/2} - \left(\frac{67}{259} \right)^{3/2} \right] = 0.00590 \text{ rads}$$

- Rotazione della soletta nella direzione y : $\Delta\psi_y = 1.5 \cdot \frac{r_{s,y}}{d_y} \cdot \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \left[\left(\frac{m_{sd,y}}{m_{Rd,y}} \right)^{3/2} - \left(\frac{\Delta m_{sd,y}}{m_{Rd,y}} \right)^{3/2} \right]$

Eq. 59

$$\Delta\psi_y = 1.5 \cdot \frac{1540}{301} \cdot \frac{435}{205000} \cdot \left[\left(\frac{162}{245} \right)^{3/2} - \left(\frac{65}{245} \right)^{3/2} \right] = 0.00653 \text{ rads} \rightarrow \text{che regolano rotazione}$$

Eq. 4

Pertanto, la sollecitazione attivata negli elementi di rinforzo:

$$\sigma_{swd} = \min \left[\frac{200000 \cdot 0.00653}{6} \cdot \left(1 + \frac{3.275}{390} \cdot \frac{309}{16} \right); 390 \right] = 253 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Eq. 3

Armatura minima richiesta: $\Sigma A_{sw} = \frac{\max(0.5 V_{Ed}; V_{Ed} - V_{Rd,c})}{k_{pi} \cdot k_e \cdot \sigma_{swd}}$

$$\Sigma A_{sw} = \frac{\max(0.5 \cdot 1241; 1241 - 857) \cdot 10^3}{0.82 \cdot 0.94 \cdot 253} = 3182 \text{ mm}^2$$

Interasse degli elementi di rinforzo a punzonamento post-installati:

Parametro	Controllo di minimo e massimo	
$s_0 = 150 \text{ mm}$	$0.35d_{ef} \leq s_0 \leq 0.5d_{ef}$	Soddisfatto
$s_r = 150 \text{ mm}$	$s_{min,M16} = 96 \text{ mm}$, $s_r \leq 0.75d_{ef}$, $81 \leq d_{ef} \leq 340$	Soddisfatto
s_t per i primi due perimetri	$s_{min} \leq s_t \leq 1.5d_{ef,min,M16} = 96 \text{ mm}$	Soddisfatto
s_t oltre il secondo perimetro	$s_{min} \leq s_t \leq 2.0d_{ef,min,M16} = 96 \text{ mm}$	Soddisfatto

Poiché $0.35d_{ef} \leq s_0 + s_r \leq 1.0d_{ef}$, gli elementi di rinforzo nel **primo e nel secondo** perimetro di rinforzo, ΣA_{sw} , possono contribuire alla resistenza dell'acciaio, $V_{Rd,s,pi}$.

8. Schema di posa dell'armatura di rinforzo e dati di installazione

Eq. 6 Perimetro esterno dove non è richiesta armatura, $V_{Ed} \leq V_{Rd,c,out} = k_r \tau_{cd} d_{ef,out} u_{out}$, dove $d_{ef,out} = d_{ef} - c_{res}$. Il copriferro residuo, $c_{res} = 40 \text{ mm}$, è riportato nella Tabella 3 della aBG Z-15.5-387 e nella Nota Tecnica Hilti relativa alla dimensione M16

$$u_{out} = \frac{V_{Ed}}{k_r \tau_{cd} (d_{ef} - c_{res})} = \frac{1241 \cdot 10^3}{1.068 \cdot 1.075 \cdot (309 - 40)} = 4018 \text{ mm}$$

- Raggio di u_{out} dal **centro** del supporto, $r_{out} = \frac{u_{out}}{2\pi} = 640 \text{ mm}$
- Eccentricità del perimetro esterno, $k_{e,out} = \left(\frac{1}{1 + \frac{e_u}{2 \cdot r_{out}}} \right) = \left(\frac{1}{1 + \frac{47}{2 \cdot 640}} \right) = 0.96$
- Perimetro esterno modificato, $u_{out,mod} = \frac{u_{out}}{k_{e,out}} = \mathbf{4185 \text{ mm}}$
- Raggio di $u_{out,mod}$ dalla **faccia** del supporto, $r_{out,mod} = \frac{u_{out,mod} - u_0}{2\pi} = \frac{4185 - 1600}{2\pi} = 411 \text{ mm}$

Con $s_0 = 150 \text{ mm}$ e $s_r = 150 \text{ mm}$, è possibile inserire al massimo **due** perimetri di armatura possono entrare all'interno di $u_{out,mod}$; inoltre, l'armatura di punzonamento può terminare solo a una distanza maggiore di $(411 - 0.5d_{ef}) = 257 \text{ mm}$ rispetto alla faccia del pilastro.

Perimetro	Distanza dalla faccia del pilastro (mm)	Lunghezza del perimetro (mm)	Area di acciaio richiesta (mm²) ΣA_{sw}	Interasse trasversale (mm)	Elementi forniti per perimetro	Superficie in acciaio fornita (mm²)
1	150	2543	3182	$300 \leq s_{t,max}$	10	1570
2	300	3485		$300 \leq s_{t,max}$	14	2198

Nota: Quando la posizione di un qualsiasi elemento di rinforzo coincide con l'armatura a flessione esistente, l'elemento interessato può essere regolato di una distanza minima di $2d_0$ e massima di

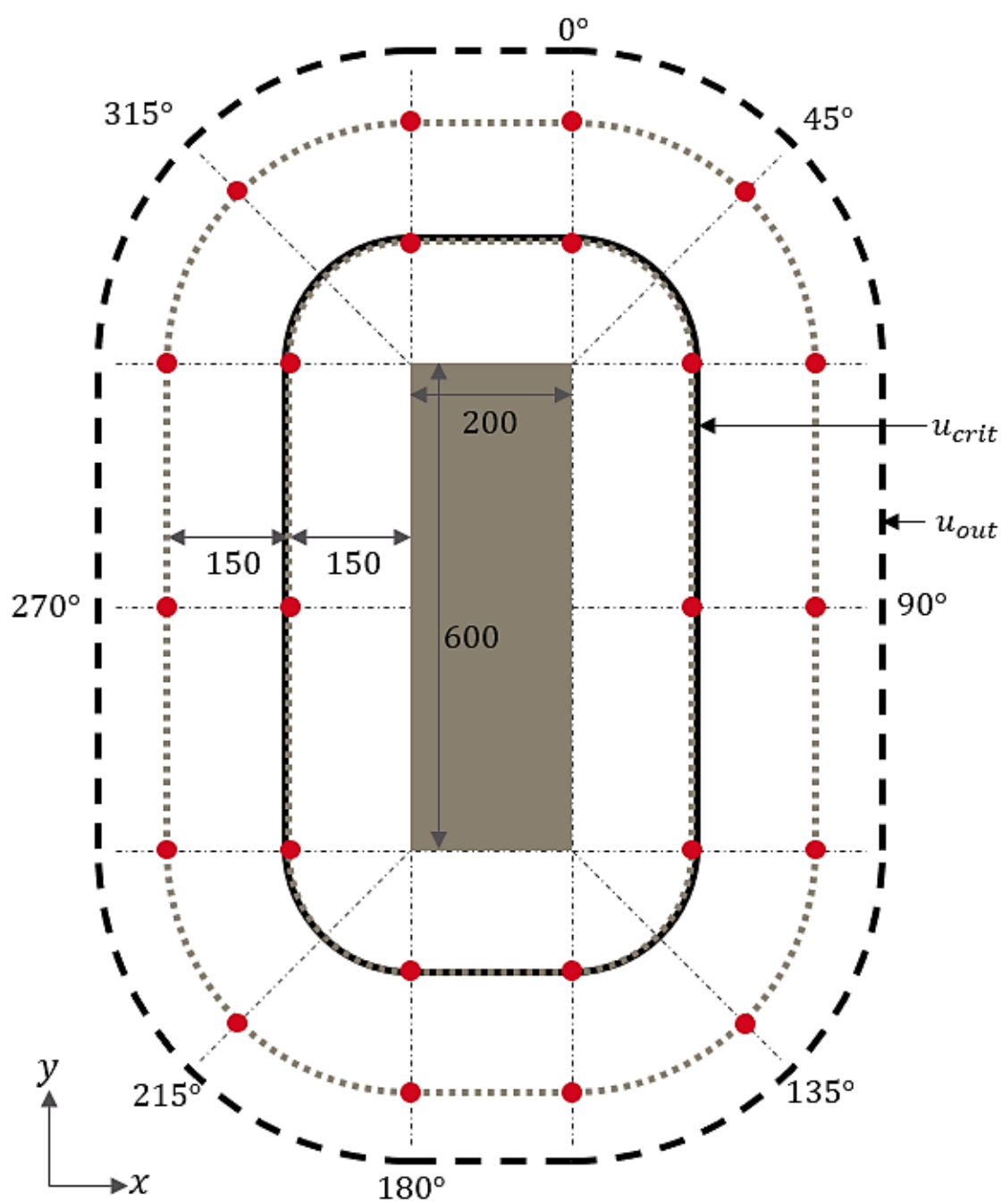


$0,2d_{ef}$. Tuttavia, devono essere sempre rispettate le regole sull'interasse minimo e massimo radiale, s_0 e s_r , come anche sull'interasse tangenziale, s_t , come indicato nella sezione 7 del presente allegato.

In conformità con l'Approvazione Nazionale e con le Istruzioni d'Uso del Produttore

- Soluzione di rinforzo: HIT-RE 500 V4 + HAS-U 8.8 M16 +
Set di riempimento
- coppia di serraggio massima di installazione, T_{inst} : 80 Nm
- Diametro del foro nella soletta, d_0 : 18 mm
- Profondità del foro nella soletta, l_{sw} : 310 mm
- Metodo di foratura proposto: Foratura a percussione (HD)
con dispositivo di guida
- Condizione del calcestruzzo: Calcestruzzo secco

A titolo di esempio, di seguito viene fornita la disposizione di armatura consigliata:



Nota 1: Tutte le dimensioni in millimetri.

RIFERIMENTI

- [1] Deutsches Institut für Bautechnik, “Z-15.5-387 - Hilti Durchstanzverstärkungssystem (HIT-Punching Shear Strengthening) mit Hilti HIT-RE 500 V4,” DIBt, Berlin, 2025.
- [2] DIN, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings; German version EN 1992-1-1:2004 + AC:2010,” DIN, Berlin, 2011.
- [3] 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.
- [4] SIA, “SIA 262: Concrete Structures,” Swiss Society of Engineers and Architects, Zürich, 2017.
- [5] fib, “Model Code for Concrete Structures 2010,” Ernst & Sohn, Lausanne, 2013.
- [6] A. Muttoni, M. F. Ruiz, E. Bentz, S. Foster and V. Sigrist, “Background to fib Model Code 2010 Shear provisions - Part II: Punching Shear,” *Structural Concrete*, vol. 14, no. 3, pp. 204-214, 2013.
- [7] SIA, “SIA 260: Basis of structural design,” Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich, 2017.