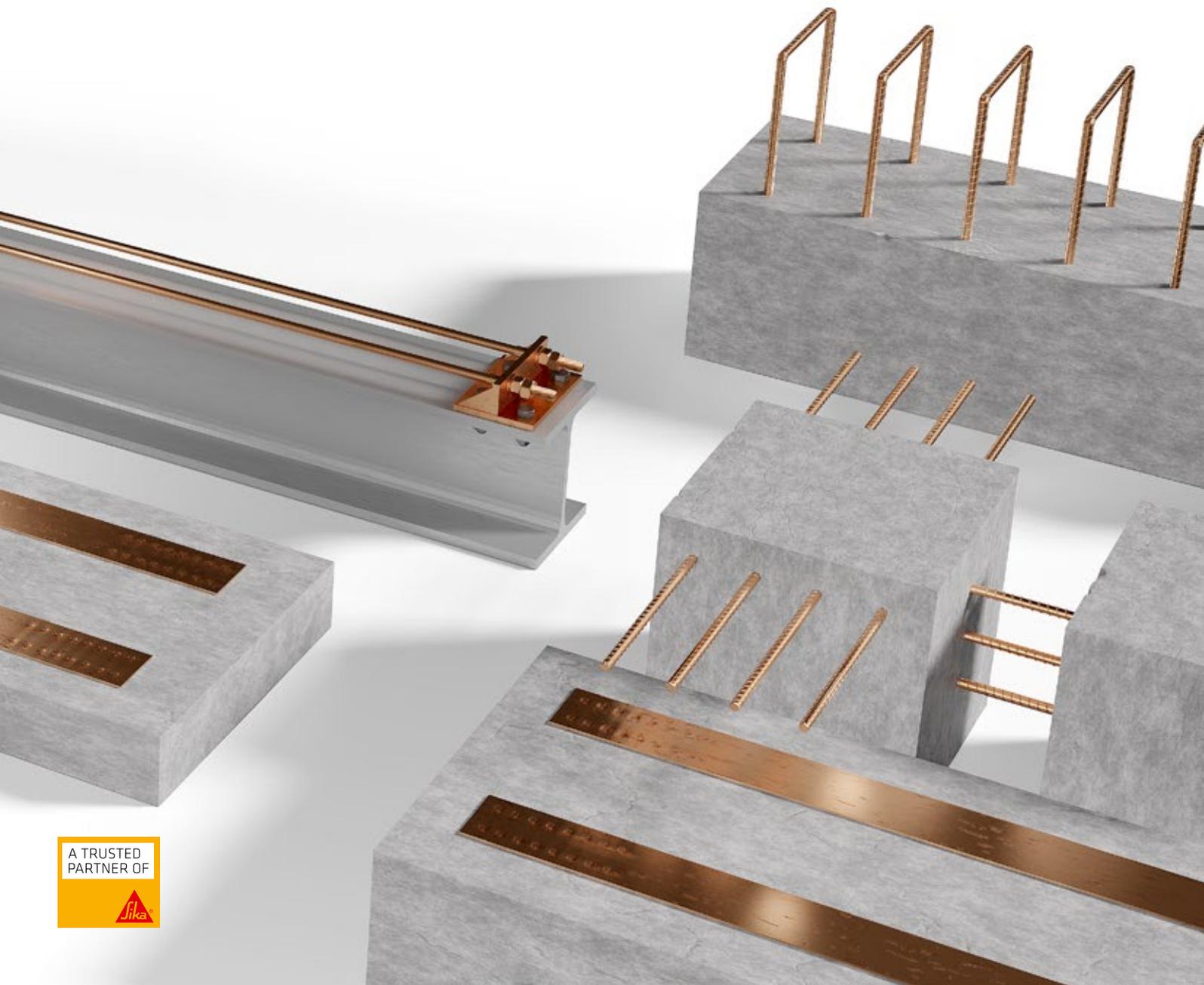


# memory<sup>®</sup>-steel sistemi di precompressione

**Per il rinforzo successivo e per  
le nuove costruzioni**

«Carico statico e carico dinamico permanente»



## La nostra visione

Con i sistemi di precompressione memory<sup>®</sup>-steel puntiamo ad ottenere la leadership sul mercato globale. La nostra vicinanza al cliente e la nostra esperienza ci consentono di combinare la ricerca e lo sviluppo con la realtà pratica della costruzione. L'acciaio a memoria di forma memory<sup>®</sup>-steel è riciclabile al 100% e soddisfa elevati requisiti di sostenibilità. Attraverso un'attività coerente di sviluppo e la registrazione di brevetti intendiamo garantire la competitività di re-fer anche a lungo termine.

## La nostra missione

Aumentando la vita utile e rinforzando le strutture esistenti creiamo valore aggiunto per i nostri clienti. Rispetto ad un nuovo edificio, il consolidamento e la riconversione risultano più rispettosi dell'ambiente. Grazie all'applicazione locale della precompressione all'interno di un nuovo strato di calcestruzzo si rende superflua la costruzione di una trave di calcestruzzo. Offriamo ai progettisti soluzioni per la creazione di elementi in calcestruzzo filigranati.



Colata di memory<sup>®</sup>-steel

# Sommario

<b>Sistemi di precompressione innovativi memory®-steel</b>	<b>2</b>
<b>Leghe ferrose a memoria di forma</b>	<b>3</b>
<b>Sistema re-plate per strutture in calcestruzzo</b>	<b>4</b>
<b>Sistema re-bar per strutture in calcestruzzo</b>	<b>14</b>
<b>Sistema re-bar R18 per strutture in acciaio</b>	<b>32</b>
<b>Controllo della qualità</b>	<b>37</b>
<b>Panoramica dei prodotti</b>	<b>38</b>
<b>Aiuto alla progettazione per memory®-steel</b>	<b>39</b>
Introduzione	40
Basi teoriche di calcolo	40
re-plate	40
re-bar	42
Avvertenze	43
Esempi di dimensionamento	44
Rinforzo semplice della resistenza alla flessione con re-plate	44
Rinforzo di una trave a T con re-bar	49
<b>La nostra ricerca a livello mondiale</b>	<b>55</b>
<b>Download e brevetti</b>	<b>56</b>

Cliccando sui numeri di pagina si torna al sommario.

# Sistemi di precompressione innovativi memory®-steel

## Rinforzi tradizionali

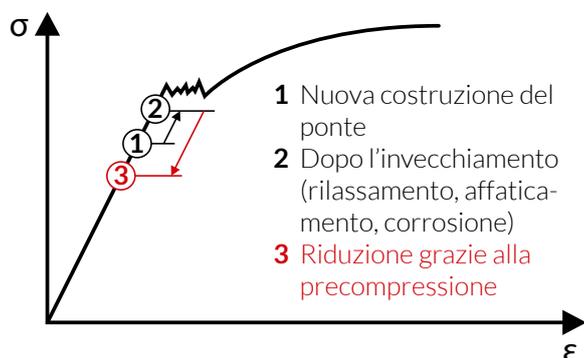
Secondo lo stato dell'arte per aumentare la resistenza a flessione e trazione si impiegano generalmente rinforzi in acciaio o con lamine in CFRP. La trasmissione delle forze dei rinforzi, incollati al supporto in calcestruzzo, risulta però spesso insufficiente. La ragione principale di tale deficit deriva dal fatto che le forze sono trasmesse dall'adesivo all'elemento strutturale attraverso il rivestimento in calcestruzzo. In quest'ultimo, tuttavia, possono essere presenti crepe da flessione e da trazione che ne diminuiscono la resistenza. Inoltre, se posizionato all'esterno prima del risanamento, il rivestimento può essere stato fortemente danneggiato da sollecitazioni dovute ad effetti ambientali quali gelo, sali di disgelo, carbonatazione, ecc. Le lamine in CFRP con un allungamento profondo alla rottura dell'1,5 – 2,0% sono molto fragili e cedono presto. I trasferimenti di forza dovuti agli assestamenti o in caso di terremoto non sono possibili con il rinforzo. Le lamine in CFRP sono approvate dalle autorità edilizie per le costruzioni soggette a sollecitazioni fisse e solo in casi eccezionali per elementi costruttivi non sono soggetti a sollecitazioni fisse.

## L'innovazione: rinforzo robusto con memory®-steel

Nei rinforzi tramite lamine in memory®-steel «re-plate», la forza di precompressione viene trasmessa al nucleo in calcestruzzo attraverso un ancoraggio terminale meccanico. Il rinforzo è molto facile da installare e può essere applicato al supporto in calcestruzzo senza grandi preparativi. Inoltre, la precompressione si può effettuare nel giro di pochi minuti.

Combinando i tondini in acciaio nervato «re-bar» con le malte Sika collaudate per la sostituzione del calcestruzzo, è disponibile un metodo di rinforzo per strutture fisse e caricate dinamicamente in modo permanente. La forza viene convogliata nel nucleo sano del calcestruzzo attraverso il nuovo strato di malta, che sostituisce lo strato di calcestruzzo danneggiato. Le fessure esistenti nella base portante vengono ridotte in modo significativo dalla precompressione del memory®-steel. Grazie all'elevata duttilità del >20%, diventa determinante in caso di cedimento del calcestruzzo nella zona di compressione, dovuto alla sollecitazione di flessione. Con il rinforzo, sono possibili trasferimenti di forza. memory®-steel è predestinato per il consolidamento antisismico.

### Tensione dell'armatura interna:



### Durata:



**Dopo il rinforzo il carico continuo dinamico e il rilassamento dell'armatura interna avvengono a un livello di tensione inferiore.**

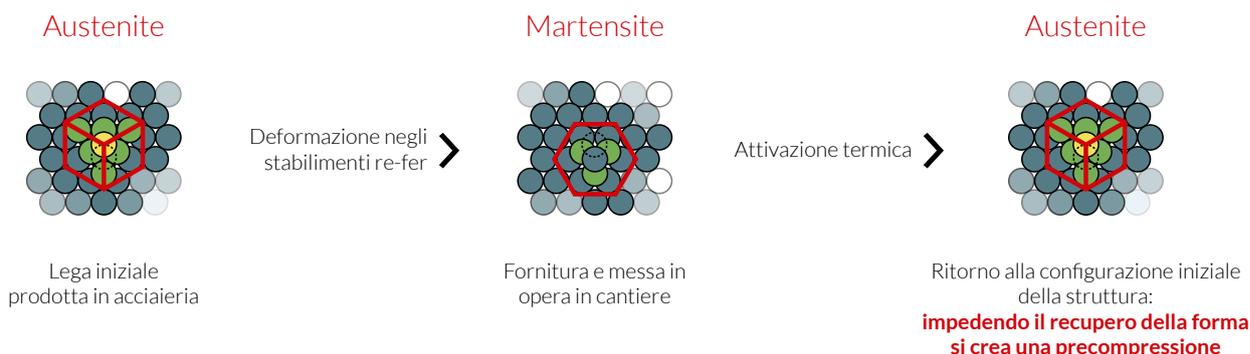
**La malte Sika da spruzzare, di riprofilamento e da colare proteggono a lungo termine l'armatura interna e i re-bar.**

# Leghe ferrose a memoria di forma

Dopo una deformazione indotta, con l'apporto di calore le leghe a memoria di forma («shape memory alloy, SMA») ritornano alla forma originale. memory®-steel ricorda la sua forma originale come risultato di una trasformazione del reticolo cristallino «da martensite in austenite».

**memory®-steel è a base di ferro ed è adatto per applicazioni nell'edilizia.**

## Struttura atomica



**Precompressione uniforme senza perdita di attrito.**

**La precompressione sgrava l'armatura interna esistente, con questo si prolunga la vita utile della struttura.**

## Offriamo tre sistemi con memory®-steel

<b>Sistema re-plate per strutture in calcestruzzo</b>	<b>Sistema re-bar per strutture in calcestruzzo</b>	<b>Sistema re-bar R18 per strutture in acciaio</b>
Lamina d'acciaio fissata meccanicamente al calcestruzzo	Tondino d'acciaio nervato incorporato nella malta o nel calcestruzzo	Tondino d'acciaio fissato alla trave d'acciaio mediante ancoraggio terminale
Lamina tirante esterna senza composito	Armatura interna con composito	Tondino tirante esterno senza composito
<b>Per strutture sottoposte a carichi statici</b>	<b>Per strutture sottoposte a carichi statici e a carichi dinamici permanenti</b>	

# Sistema re-plate per strutture in calcestruzzo

«Per strutture sottoposte a carichi statici»

La «lamina in memory®-steel» re-plate si impiega per il rafforzamento di «strutture sottoposte a carichi statici, non statici solo in casi eccezionali». Fissato su entrambe le estremità con ancoraggi terminali, re-plate agisce come tirante esterno senza composito. re-plate viene fornito già predeformato e preforato. L'ancoraggio terminale meccanico si esegue con un fissaggio diretto Hilti. Per attivare la «precompressione», la lamina viene scaldata con un bruciatore a gas o con un apparecchio radiante a raggi infrarossi.

Prodotto	Sezione	Resistenza massima alla trazione*	Forza di trazione massima*	Allungamento alla rottura
re-plate 120/1.5 mm	180 mm <sup>2</sup>	460 N/mm <sup>2</sup>	<b>83.1 kN</b>	25 %

\* Attuale valore di dimensionamento per 12 chiodi con resistenza alla compressione del calcestruzzo (cubi di prova) >20 N/mm<sup>2</sup> (con coefficiente di sicurezza 1.3)

Prodotto	Temperatura di riscaldamento	Precompressione	Forza di precompressione	Rilassamento
Soluzione standard re-plate	Gas 300 – 350°C	380 N/mm <sup>2</sup>	<b>68.4 kN</b>	15 % t <sub>0</sub>
Rivestimento anticorrosione o a rischio di incendio	Infrarossi 165°C	300 N/mm <sup>2</sup>	<b>54.0 kN</b>	15 % t <sub>0</sub>



Lamina in acciaio paragonabile a un materiale 1.4003 secondo la norma DIN EN 10088 (classe di resistenza alla corrosione I)



## Prove di base con re-plate

### Ancoraggio terminale meccanico

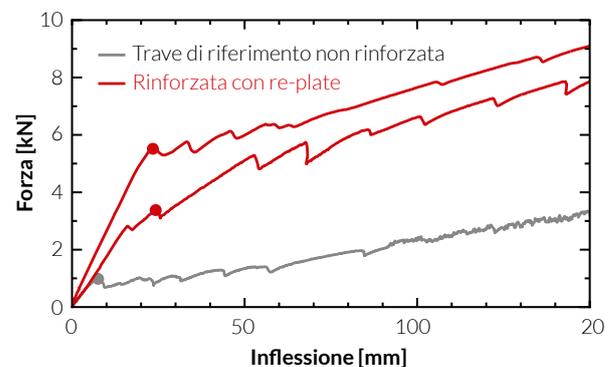
L'ancoraggio terminale meccanico tramite fissaggio diretto Hilti è stato testato in combinazione con re-plate mediante prove di estrazione

Per la resistenza completa dell'ancoraggio è necessaria una resistenza alla compressione del calcestruzzo (cubo di prova) di  $20\text{N/mm}^2$ . In caso di qualità inferiori del calcestruzzo, si deve consultare l'ingegnere re-fer in merito alla resistenza dell'ancoraggio.

**Cedimento in corrispondenza della sezione ridotta nella prima fila di fori del re-plate.**



### Comportamento strutturale



Il comportamento strutturale del rinforzo è stato testato su lastre con una lunghezza di 4m, un'altezza di 150mm e una larghezza di 500mm. I risultati ottenuti da una lastra di riferimento sono stati confrontati con quelli di due lastre rinforzate.

**In condizioni di impiego è stato rilevato un carico di fessurazione da 3 a 5 volte superiore.**

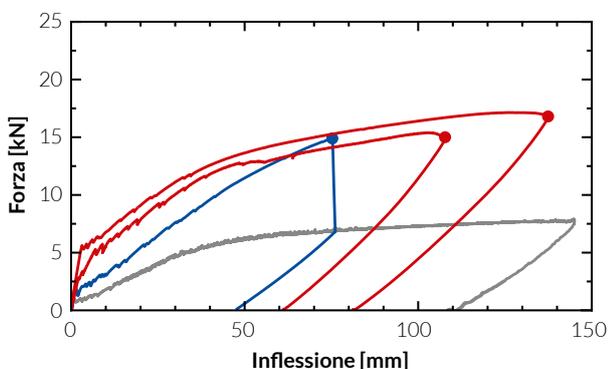
## Prove su larga scala: confronto re-plate con lamine CFRP

Le prove di flessione svolte all'Empa mostrano il comportamento di re-plate e delle lamine in CFRP con una rigidità assiale EA equiparabile. Le lastre in calcestruzzo rinforzato (altezza 150 mm, larghezza 500 mm, lunghezza 4 m) sono state confrontate anche con una trave di riferimento non rinforzata, dimostrando carichi di rottura significativamente più elevati. Nel caso dei rinforzi duttili re-plate, si è prodotto un cedimento per schiacciamento del calcestruzzo nella zona di compressione a elevate inflessioni. Il rinforzo con le lamine in CFRP con allungamento a rottura ridotto, ha ceduto prima in seguito a distacco. Grazie alla precompressione con il sistema duttile re-plate si è ottenuto un carico di fessurazione significativamente più elevato.



Lastra in calcestruzzo, test realizzato presso l'istituto svizzero Empa

### Aumento del 70-170% del carico di fessurazione rispetto alle lamine CFRP.



	re-plate	Lamina CFRP
Rigidità assiale EA [kN]	$\sim 10 \cdot 10^3$	$\sim 11 \cdot 10^3$
Carico di fessurazione [kN]	3.4 - 5.4	2.0

- Trave di riferimento non rinforzata
- Schiacciamento del calcestruzzo
- Distacco della lamina

## Spesso utile: combinazione di re-plate e Sika®CarboDur®.

### re-plate

- Contro inflessioni e crepe nel soffitto e nelle pareti soprastanti
- Per lo sgravio dell'armatura interna preesistente
- Per assicurare il carico di servizio e d'incendio
- «Esempio foto 3: carico di servizio/d'incendio assicurato da re-plate – intonaco antifluoco necessario solo per re-plate»



Film sul inforzo dopo un incendio  
[www.re-fer.eu/fire](http://www.re-fer.eu/fire)

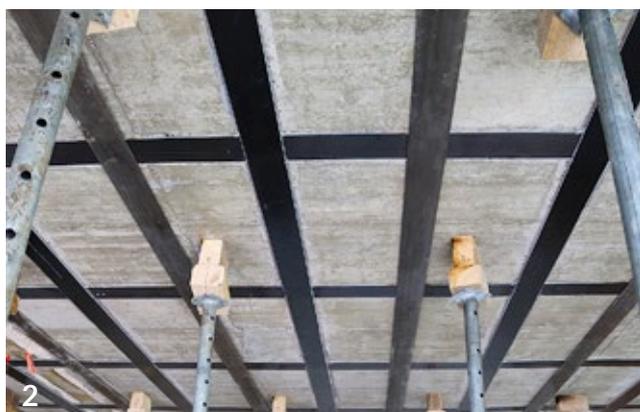
### Lamine in CFRP Sika®CarboDur®

- Per assicurare il carico restante

Dopo un incendio, il carico servizio e la funzione antincendio si realizzano con re-plate. Sika® CarboDur® si impiega per il carico utile rimanente. Il rinforzo è protetto con l'intonaco spruzzato antincendio SikaCem® Pyrocoat (vedi p. 12).



1 Tipico rinforzo del momento flettente positivo con re-plate



2 Combinazione di re-plate e lamine in CFRP



3 Protezione antincendio per re-plate in combinazione con lamine in CFRP

Se re-plate e lamine in CFRP sono allineati sullo stesso asse di trazione, le lamine in CFRP vengono messe in opera sempre dopo i re-plate precompressi. Se i re-plate vengono applicati perpendicolarmente alle lamine in CFRP premontate (trasversalmente), nei punti di intersezione re-plate/CFRP va inserito un foglio di alluminio quale strato intermedio per impedire una coesione adesiva tra re-plate e lamina in CFRP.

## Applicazione di re-plate

Rinforzo della resistenza alla flessione «aumento del carico di servizio e del carico limite



### Preparazione del lavoro

- 1 Nella zona del rinforzo rimuovere eventuali rivestimenti e/o materiali isolanti.
- 2 Fissare provvisoriamente i re-plate con supporti a T.



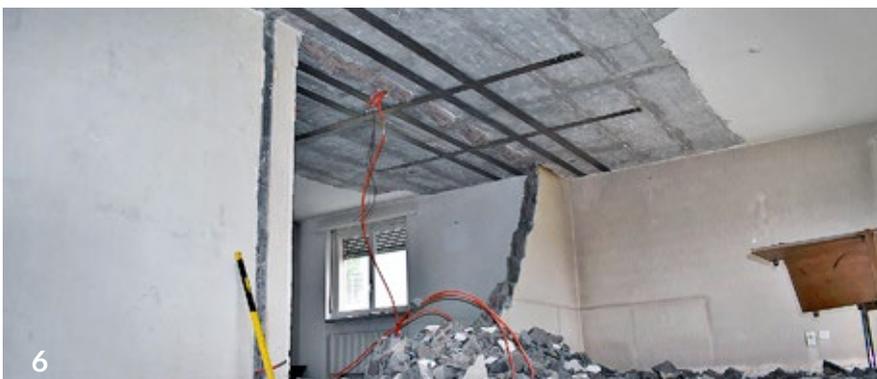
### Ancoraggio terminale a entrambe le estremità

- 3 Preforare il supporto attraverso i fori del re-plate.
- 4 Realizzare l'ancoraggio meccanico con inchiodatrice Hilti e chiodi inossidabili testati sul sistema (X-CR48P8S15).



### Attivazione della precompressione

- 5A/B Riscaldamento graduale con bruciatore a gas o apparecchio radiante a raggi infrarossi re-IR 3000/Controllo della temperatura con sensore



### Completamento dei lavori

- 6 I re-plate sviluppano l'effetto portante subito dopo l'attivazione e il raffreddamento (nella foto: rimozione della parete portante).

## Impieghi di re-plate

### Rimozione di pilastri o appoggi preesistenti

Tramite la precompressione re-plate viene modificato il sistema statico di un soffitto. I pilastri o gli appoggi esistenti possono essere di seguito rimossi. Nelle costruzioni residenziali e industriali si creano nuove possibilità di suddivisione degli spazi.

### Rinforzo del momento positivo

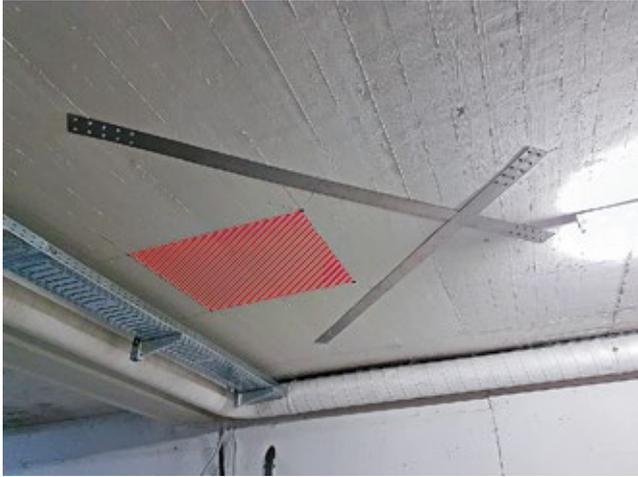


Mettendo in sovracompressione un giunto di dilatazione e rimuovendo il pilastro sottostante, la luce dell'asse di trazione principale aumenta. re-plate garantisce l'aumento del momento flettente positivo e la sovracompressione del giunto.

### Rinforzo del momento negativo



Sulla superficie superiore di un balcone sopra un appoggio esterno esistente, si aumenta il momento negativo così da poter rimuovere un altro appoggio esterno sottostante.



### Rinforzo locale di solette

Mancando un'armatura di trazione, si realizza una sovracompressione con re-plate per poter eseguire successivamente un'apertura nella soletta. Le forze di precompressione sono deviate nel sistema portante della soletta esistente. re-plate viene applicato direttamente sul calcestruzzo: il sistema è montato e precompresso in pochi minuti. Il rinforzo avviene prima di realizzare l'apertura.



### Sovracompressione di giunti di raccordo

Con lamine re-plate corte è possibile mettere in sovracompressione i giunti di raccordo e di dilatazione per collegare fra loro elementi con trasmissione delle forze. Questa applicazione è particolarmente interessante per il rinforzo antisismico nell'edilizia e per la costruzione di ponti.



### Rinforzo locale di travi di ponti

Una trave di un ponte, danneggiata dal traffico stradale fino ai trefoli interni, è stata rinforzata in sole due ore con re-plate. Durante i lavori il traffico è stato deviato solamente per breve tempo sulla corsia di sorpasso. La rapidità di esecuzione e l'efficacia dell'applicazione di re-plate rendono possibile un intervento di questo genere. Sul sistema re-plate è stata applicata una protezione anticorrosione, dato che in inverno il manto stradale viene cosparso con sale di disgelo aumentando le sollecitazioni da cloruro. L'attivazione è stata effettuata con un apparecchio radiante a raggi infrarossi. La temperatura di riscaldamento è stata limitata a 165°C.

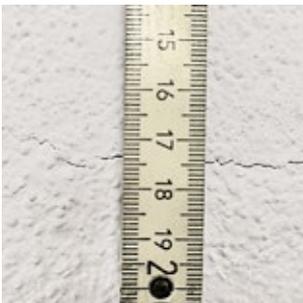


## Rinforzo contro il punzonamento

Applicando re-plate sulla parte superiore della soletta è possibile aumentare il momento flettente negativo o realizzare un sistema di precompressione contro il punzonamento. A causa delle irregolarità sulla superficie in calcestruzzo, sotto i re-plate si possono creare spazi vuoti. Per evitare vibrazioni delle lamine si possono colmare lateralmente questi spazi con malta da riprofilamento. In seguito, i re-plate vengono ricoperti con malta da riprofilamento o con intonaco. Sul sistema di rinforzo viene poi applicata la pavimentazione desiderata.

## Riduzione delle inflessioni e chiusura delle fessure

Dopo una ristrutturazione, l'aumento dei carichi ha evidenziato carenze nell'armatura della soletta in calcestruzzo preesistente. L'inflessione inammissibile formatasi (in blu) ha causato fessure nella muratura intonacata (in rosso). Per aumentare il carico di servizio e il carico limite sono state applicate e in seguito attivate otto fasce di rinforzo re-plate. Le fessure visibili nella muratura hanno così potuto essere chiuse.



Fessura visibile prima del rinforzo.



Dopo il rinforzo la fessura si è chiusa.



Video di attivazione dei re-plate  
[www.re-fer.eu/mov01](http://www.re-fer.eu/mov01)

## Protezione antincendio di re-plate

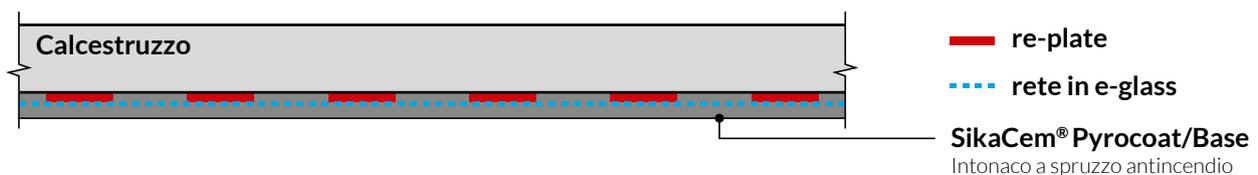
### Comportamento in caso di incendio di re-plate

re-plate ha un comportamento in caso di incendio simile all'acciaio convenzionale. A 400°C circa c'è una perdita visibile della resistenza e a 350°C circa la precompressione si azzerava. Lo stesso vale per l'ancoraggio con elementi di fissaggio diretto Hilti. Per gli ancoraggi sono disponibili prove di comportamento in caso di incendio fornite separatamente dal fabbricante. Se senza rinforzo il carico d'incendio previsto dalla normativa e dalla legislazione nazionale non è soddisfatto, il sistema di rinforzo applicato richiede in tutti i casi una protezione antincendio. Un esempio comparativo di calcolo viene riportato a pagina 43.



### Misure di protezione antincendio

Il supporto in calcestruzzo e le fasce di rinforzo vengono puliti e interamente ricoperti con il fondo adesivo SikaCem® Pyrocoat Base. Successivamente, sul sistema di rinforzo viene applicato su tutta la superficie un sottile strato di intonaco a spruzzo SikaCem® Pyrocoat. Quest'ultimo serve anche a livellare le irregolarità della superficie. Una griglia in fibra di vetro resistente agli agenti alcalini viene inserita sui re-plate nell'intonaco a spruzzo. Per evitare le vibrazioni dei re-plate, le fasce vengono riempite lateralmente con l'intonaco proiettato.



#### SikaCem® Pyrocoat

«intonaco proiettato antincendio»

Applicato meccanicamente

Spessore dello strato 25 mm	<b>R120</b>
Risultati mancanti Troverete i valori attuali nel sito Web di re-fer.	<b>R90</b>
	<b>R60</b>
	<b>R30</b>

Il sistema di protezione antincendio è stato testato al MFPA di Lipsia, Germania. I rapporti dettagliati dei test si possono trovare nell'area di download del nostro sito web o si possono richiedere direttamente a re-fer.

Per applicazioni in ambienti esterni o nei tunnel sono disponibili altre malte già testate della linea Sika MonoTop®. Le misure di protezione antincendio e gli spessori di strato necessari sono valori indicativi che vanno adattati alle norme applicate e alle disposizioni ufficiali in vigore nelle rispettive località.

## Protezione anticorrosione di re-plate

### Comportamento di corrosione del memory<sup>®</sup>-steel

La lega d'acciaio memory<sup>®</sup>-steel contiene circa il 10% in massa di cromo ed è paragonabile a un materiale 1.4003 secondo la norma DIN EN 10088 (classe di resistenza alla corrosione I). La fessurazione per tensocorrosione è un rischio noto per l'acciaio da precompressione. Nel test adattato FIB per fessurazioni da tensocorrosione, l'acciaio memory<sup>®</sup>-steel ha raggiunto una durata utile di oltre 250 ore. Per le strutture fortemente esposte a un'elevata concentrazione di cloruro, come le piscine coperte o le zone delle carreggiate esposte agli spruzzi d'acqua, si dovrebbe applicare una protezione aggiuntiva contro la corrosione. Il prodotto SikaCor<sup>®</sup> EG-1 è adatto per le lamine di rinforzo re-plate applicate esternamente.

Nota: i re-bar sono collocati in una matrice cementizia che serve sia da deposito alcalino per l'armatura interna che da strato protettivo contro la penetrazione di ioni di cloruro.

**La protezione anticorrosione è raccomandata per gli elementi esposti all'azione dei cloruri.**



re-plate perforato



Sabbatura al corindone nello stabilimento di produzione



Protezione anticorrosione con SikaCor<sup>®</sup> EG-1 nello stabilimento di produzione

### Applicazione della protezione anticorrosione per memory<sup>®</sup>-steel

La superficie dei re-plate viene leggermente irruvidita mediante sabbatura abrasiva al corindone e in seguito rivestita con SikaCor<sup>®</sup> EG-1. Eventuali danni al rivestimento durante il trasporto vengono riparati in cantiere con SikaCor<sup>®</sup> EG-1. Questa verniciatura protettiva «resistenza termica a breve termine fino a 180°C circa» limita la temperatura di riscaldamento a 165°C nella procedura di precompressione. Di conseguenza la forza di precompressione massima è di 54 kN/re-plate. Dopo la messa in opera e l'attivazione, i lati dei re-plate vengono riempiti con Sikaflex<sup>®</sup> PRO-3 per evitare che l'acqua possa penetrare tra il sottofondo portante in calcestruzzo e la fascia di rinforzo.

#### **SikaCor<sup>®</sup> EG-1 «rivestimento»**

applicato nello stabilimento di produzione

Rivestimento a base di resina epossidica applicato su entrambi i lati del re-plate nello stabilimento di produzione prima della consegna. Sul cantiere si devono migliorare gli eventuali punti difettosi e si devono verniciare i chiodi. Dopo l'attivazione, stuccare i re-plate con Sikaflex<sup>®</sup> PRO-3.

\*Attenzione: temperatura di riscaldamento ridotta a 165°C «forza di precompressione 54 kN/re-plate»

## Sistema re-bar per strutture in calcestruzzo

«strutture sottoposte a carichi statici e a carichi dinamici permanenti»

### Rinforzo strutturale successivo

I tondini d'acciaio nervato di Ø10 o 16 mm vengono ancorati alle estremità nella malta da riparazione Sika e, quando l'ancoraggio terminale è indurito, attivati con un bruciatore a gas. Successivamente la zona intermedia viene riempita con malta. re-bar agisce come precompressione interna nel composito. I profili a U re-bar 10 vengono inseriti nella malta da riparazione Sika e attivati con corrente elettrica.

Prodotto	Sezione	Resistenza massima alla trazione*	Forza di trazione massima*	Allungamento alla rottura
re-bar 10	89.9 mm <sup>2</sup>	520 N/mm <sup>2</sup>	<b>46.7 kN</b>	30%
re-bar 16	211.2 mm <sup>2</sup>	520 N/mm <sup>2</sup>	<b>109.8 kN</b>	30%

\*Coefficiente di dimensionamento ridotto del fattore di sicurezza.

Prodotto	Temperatura di riscaldamento	Precompressione	Forza di precompressione	Rilassamento
re-bar 10 - barre	Gas 300 - 350°C	400 N/mm <sup>2</sup>	<b>36.0 kN</b>	15% t <sub>0</sub>
re-bar 10 - profili a U	Elettricità 200°C	350 N/mm <sup>2</sup>	<b>2 x 31.5 kN = 63 kN</b>	15% t <sub>0</sub>
re-bar 16 - barre	Gas 300 - 350°C	320 N/mm <sup>2</sup>	<b>67.6 kN</b>	15% t <sub>0</sub>

### Nuova costruzione, inserimento nel calcestruzzo (trave nascosta)

Il re-bar 16 in acciaio nervato viene inserito nel nuovo calcestruzzo. L'attivazione avviene prima della rimozione dei casseri mediante corrente elettrica.

Prodotto	Temperatura di riscaldamento	Precompressione	Forza di precompressione	Rilassamento
re-bar 16 - con gancio terminale per collegamento elettrico	Elettricità 200°C	250 N/mm <sup>2</sup>	<b>52.8 kN</b>	15% t <sub>0</sub>



Tondino d'acciaio nervato paragonabile a un materiale 1.4003 secondo la norma DIN EN 10088 (classe di resistenza alla corrosione I)

## Sperimentazione di base con re-bar

### Prove di coesione

La coesione dell'ancoraggio terminale è stata testata mediante prove di estrazione con differenti malte Sika. La lunghezza di ancoraggio con le malte testate su calcestruzzo con resistenza a compressione superiore a  $25 \text{ N/mm}^2$  è stata determinata come segue:

Inserito in malta Sika da riprofilamento o spruzzata  
lunghezza ancoraggio:  $>500 \text{ mm}$   
(a secondo del contesto)

Inserito in scanalatura e sottocolato con malta Sika  
lunghezza ancoraggio  
re-bar 10:  $\geq 400 \text{ mm}$   
re-bar 16:  $\geq 600 \text{ mm}$   
distanza tra le scanalature:  $\geq 100 \text{ mm}$

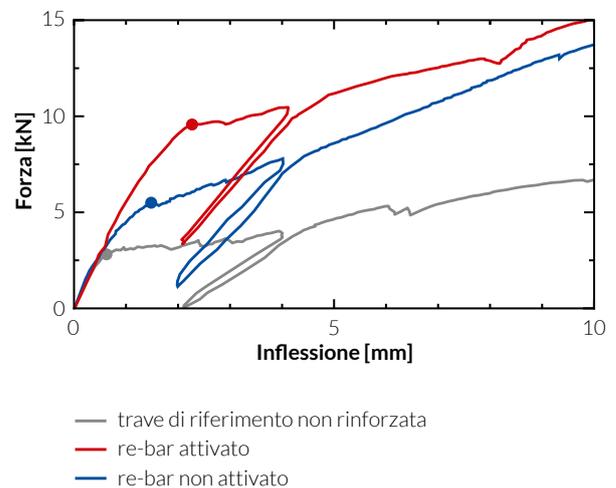


Con calcestruzzo di qualità superiore è possibile ridurre le lunghezze di ancoraggio. Altre opzioni di ancoraggio a pagina 27.

### Comportamento della struttura portante



È stato testato il comportamento strutturale del rinforzo con re-bar su un travetto con spessore 160mm, larghezza 250mm e luce 2m. Sono stati confrontati re-bar attivati e non attivati.



**Con l'attivazione il carico di fessurazione è raddoppiato.**

## Prove su scala maggiore: rinforzo del momento negativo su ponti

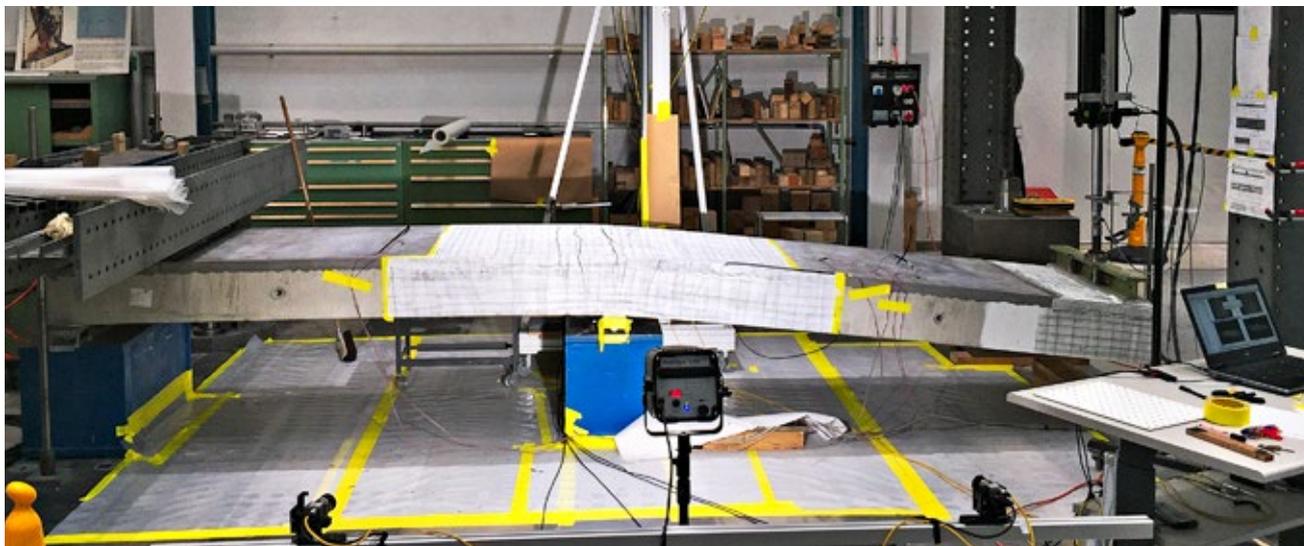
L'istituto svizzero di ricerca e di prova dei materiali (Empa) ha studiato la resistenza a flessione di travi di ponti armati con re-bar. Le barre sono state posate in scanalature realizzate sulla parte superiore di una lastra di calcestruzzo e poi riempite con SikaGrout®-314 N. In una seconda serie di prove, i re-bar sono stati inseriti in uno strato superficiale di malta da riprofilamento Sika MonoTop®-452 N. Il test su scala maggiore simula il comportamento di una soletta di un ponte rinforzata trasversalmente con 5 re-bar precompressi.



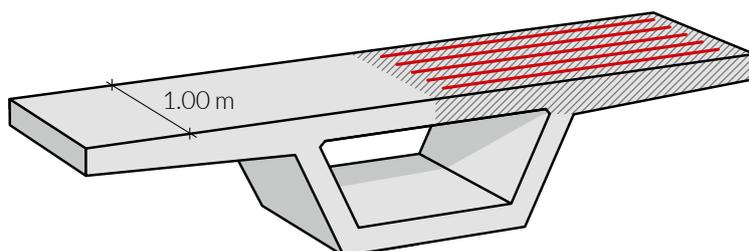
Rinforzo sottocolato in scanalature



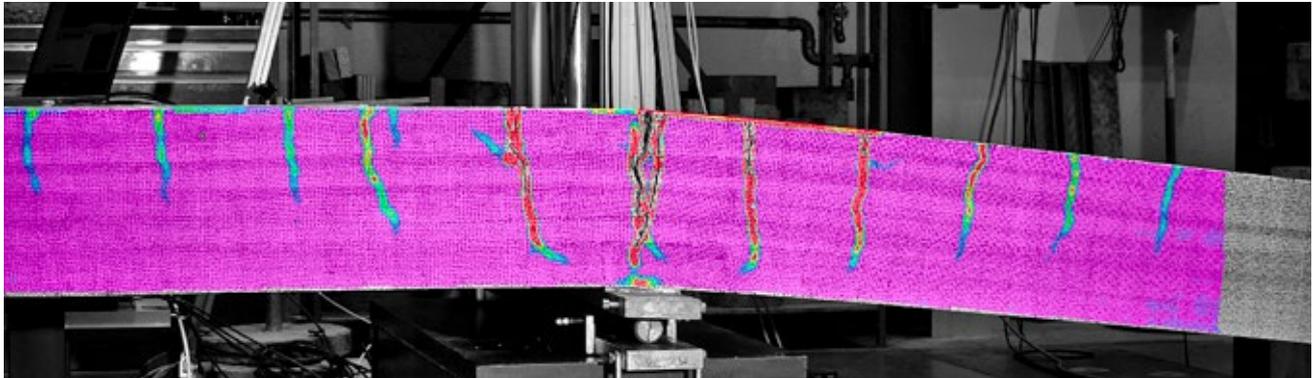
Rinforzo in malta da riprofilamento



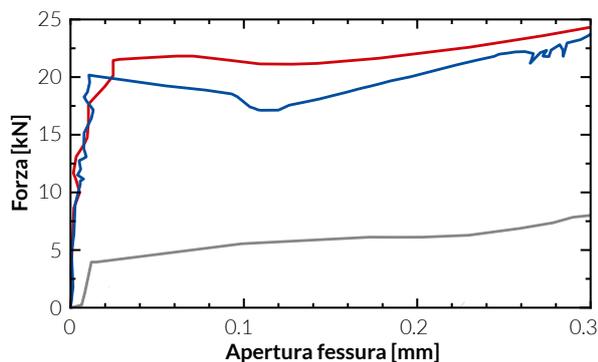
Test presso l'Empa con lastra di calcestruzzo



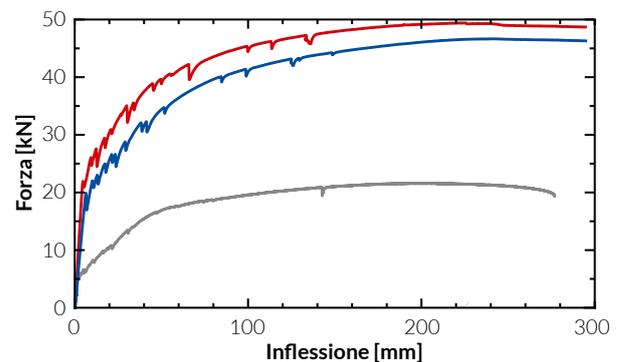
## Risultato delle prove: rinforzo del momento negativo



	Trave di riferimento	re-bar sottocolato in scanalature	re-bar in malta da riprofilamento
Carico di fessurazione [kN]	5.9	20.0	21.9
Carico di rottura [kN]	21.6	46.6	49.4



- trave di riferimento non rinforzata
- re-bar nella malta di riprofilamento
- re-bar sottocolato in scanalature nel calcestruzzo



A parità di carico, la larghezza delle fessure si è notevolmente ridotta. La struttura mantiene più a lungo lo stato non fessurato. Scaricando l'armatura interna di trazione, la precompressione produce effetti positivi sul comportamento a fatica e quindi sulla vita utile della struttura portante.

**La resistenza alla fessurazione è stata triplicata.**

**La resistenza alla rottura è stata raddoppiata.**

**Scarico dell'armatura interna.**

**Vita utile maggiore.**

# Applicazione di re-bar per il rinforzo successivo

## Rinforzo successivo del momento positivo/negativo



### Preparazione del lavoro

- 1 Irruvidire il supporto in calcestruzzo al grado di rugosità desiderato.
- 2 Fissare i re-bar all'armatura interna mediante gli isolatori elettrici **re-clip** oppure al supporto mediante **re-bolt**.



### Ancoraggio delle estremità

A pavimento

- 3 Inserire le estremità nella malta da riprofilamento **Sika MonoTop®-452N** come ancoraggio terminale.

Sopra testa

- 4 Inserire le estremità nella malta proiettata **Sika MonoTop®-412 Eco/-4012** come ancoraggio terminale.



Attivare i re-bar quando la malta presenta una resistenza alla compressione di almeno 35 N/mm<sup>2</sup>.



### Attivazione della precompressione

- 5 Riscaldare i re-bar con bruciatore a gas e mettere a verbale la temperatura di attivazione.



### Completamento dei lavori

A pavimento

- 6 Tra gli ancoraggi terminali applicare la malta da riprofilamento **Sika MonoTop®-452N**.

Sopra testa

- 7 Tra gli ancoraggi terminali applicare la malta proiettata **Sika MonoTop®-412 Eco/-4012**.

## Rinforzo successivo del momento flettente negativo mediante scanalature



### Preparazione del lavoro

- 1 Intagliare le scanalature nel supporto in calcestruzzo  
re-bar 10:  
larghezza 25 mm/profondità 25 mm  
re-bar 16:  
larghezza 30 mm/profondità 30 mm
- 2 Fissare i re-bar al centro delle scanalature.



Attivare i re-bar quando la malta presenta una resistenza alla compressione di almeno 35 N/mm<sup>2</sup>.

### Ancoraggio delle estremità

- 3 Inserire le estremità nella malta da colare **SikaGrout®-314 N**.



### Attivazione della precompressione

- 4 Attivare/scaldare i re-bar con un bruciatore a gas.
- 5 Mettere a verbale la temperatura di attivazione.



### Completamento dei lavori

- 6 Tra gli ancoraggi terminali, sottocolare i re-bar con la malta da colare **SikaGrout®-314 N**
- 7 Applicazione dell'impermeabilizzazione e del rivestimento in asfalto.

## Prove di carico limite: rinforzo a taglio di travi a T

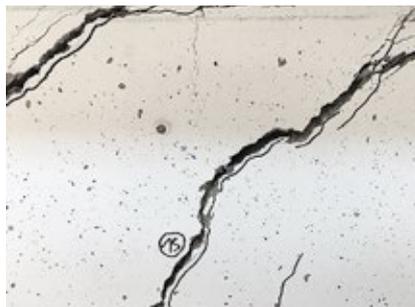
L'istituto svizzero Empa ha realizzato diverse prove di carico limite con conseguente rottura di taglio. Un primo provino di riferimento senza il rinforzo a taglio supplementare con staffe re-bar è stato caricato a rottura. Questa trave di riferimento gravemente danneggiata, con armatura a taglio incrinata e fessure aperte, è stata iniettata e rinforzata con prodotti Sika. Inoltre, altre quattro travi a T integre sono state rinforzate con staffe re-bar e sottoposte a test.



Trave di prova utilizzata dall'istituto Empa



Sull'armatura interna sono stati applicati degli estensimetri

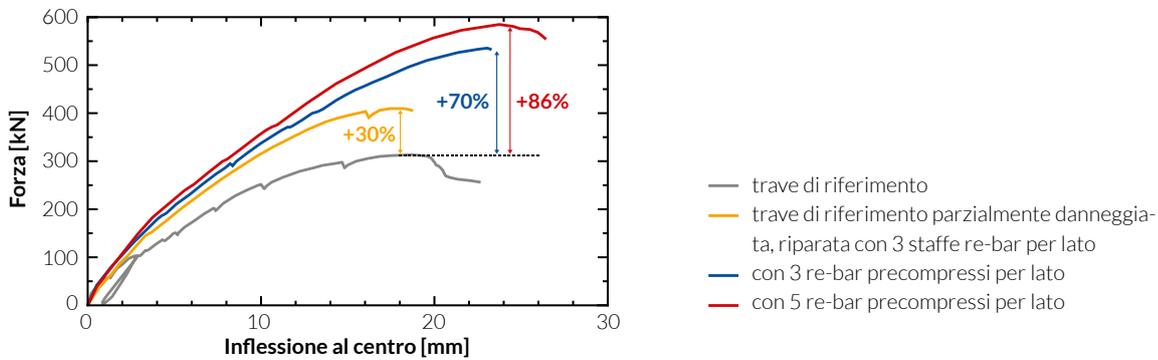


Fessure aperte nella trave di riferimento danneggiata



Immagine termica delle staffe re-bar attivate/riscaldate

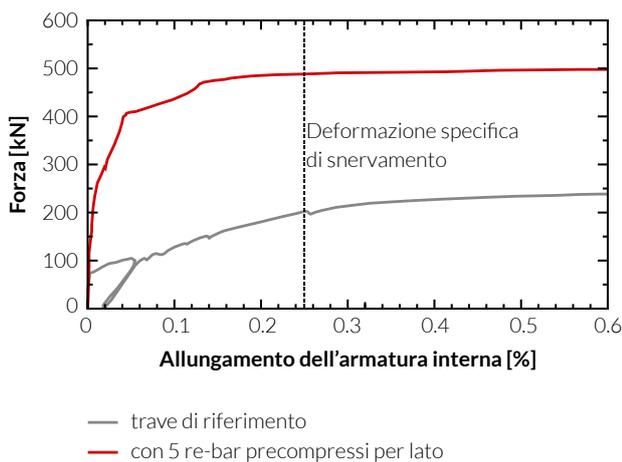
I test hanno dimostrato un significativo aumento del carico limite. Inoltre, a parità di carico, l'apertura delle fessure risulta inferiore per le travi precomprese rispetto a quella senza precompressione.



**È possibile rinforzare successivamente edifici parzialmente danneggiati da un sisma.**

**Grazie alle staffe re-bar precomprese, il carico limite della trave di riferimento parzialmente danneggiata ha potuto essere aumentato del 30%.**

**Grazie alle staffe re-bar attivate/precomprese, l'apertura delle fessure si verifica solo a partire da un carico limite superiore del 50%.**



Il pretensionamento scarica la tensione di trazione nell'armatura a taglio interna. Gli estensimetri applicati all'armatura interna hanno mostrato che, nel caso della trave di riferimento, lo snervamento ha inizio con un carico di circa 200 kN. Grazie all'precompressione con 5 re-bar, lo snervamento dell'armatura interna inizia solo a circa 500 kN.

**Scarico delle staffe interne.**

**Comportamento migliore alla fatica.**

## Applicazione di staffe re-bar (profili a U)



1



2

Eventuale iniezione delle fessure

- 1 Chiusura superficiale delle fessure con **Sika® FastFix-121** e iniezione con **Sika® InjectoCem-190**.

Preparazione del lavoro

- 2 Irruvidire il supporto con trattamento idromeccanico o meccanico (sabbatura in caso di precedente trattamento meccanico) al grado di rugosità desiderato.



3



4

- 3 Fissare le staffe re-bar con gli ancoranti di plastica re-bolt (isolamento elettrico dell'armatura interna).

Applicazione della malta

- 4 Applicare la malta proiettata a umido **Sika MonoTop®-412 Eco/-4012**, colmare le cavità con **SikaGrout®-314 N**. In alternativa, montare una casseratura e colare la malta **SikaGrout®-314 N**.



Attivare i re-bar quando la malta presenta una resistenza alla compressione di almeno  $35 \text{ N/mm}^2$



5

Attivazione della precompressione

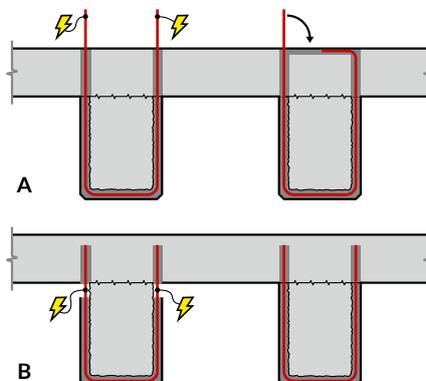
- 5 Attivare/riscaldare tramite resistenza elettrica, quindi ripiegare la staffa e sottocolare.

Forza di precompressione:  
 $2 \times 31,5 \text{ kN} = 63 \text{ kN}$  per ogni doppia sezione del profilo a U

Allacciamento elettrico in cantiere:  
 400 V, 2 x 63 A (connettore CEE 63 A)  
 per un raggio di 20 m



6



A

B

Completamento dei lavori

- 6 Panoramica dell'oggetto rinforzato dopo la messa in opera della malta.

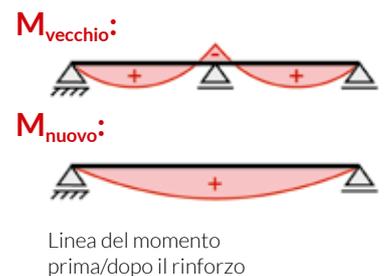
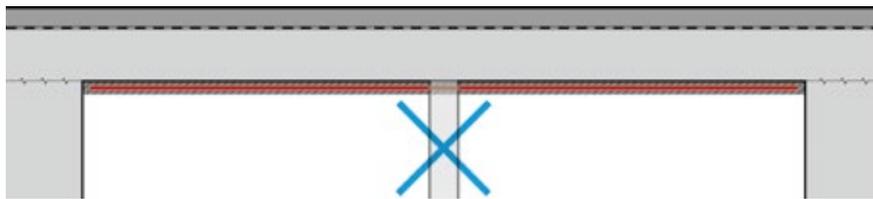
Ancoraggio nella zona di compressione

- A profilo a U richiuso  
 B profilo a U ancorato nel calcestruzzo

## Utilizzo di re-bar per il rinforzo successivo

### Rinforzo di flessione della soletta di un ponte

Per migliorare il profilo del flusso sotto un ponte, il pilastro centrale (marcato in blu sullo schema della sezione trasversale) viene rimosso. Il canale deve essere drenato per consentire i lavori di costruzione. Vengono eretti supporti temporanei per mettere in sicurezza il cantiere. Successivamente, il pilastro centrale può essere rimosso. Il nuovo momento positivo  $M_{nuovo}$  da rinforzare, creatosi con la nuova luce, è assunto dai re-bar precompressi. I re-bar sono inseriti nella malta Sika MonoTop®. Per assicurare la coesione, il supporto deve essere irruvidito con un trattamento idromeccanico



Dopo la rimozione della parete intermedia, supporto temporaneo e irruvidimento idromeccanico.



Fissaggio dei re-bar all'armatura interna (re-clip) e alla base portante (re-bolt).



Ancoraggio terminale su 600 mm dei tondini re-bar con la malta spruzzata a umido Sika MonoTop®.



Attivazione dei re-bar con fiamma a gas e controllo della temperatura

L'istituto Empa ha verificato la coesione degli ancoraggi terminali nella malta cementizia Sika MonoTop® mediante prove di estrazione. La lunghezza di ancoraggio in entrambe le estremità si basa su una resistenza a compressione del vecchio calcestruzzo di almeno 25 N/mm<sup>2</sup>. La resistenza alla compressione dell'oggetto va controllata in tutti i casi, mediante prova con sclerometro o prelievo di un provino cilindrico, prima di procedere ai lavori.



Spruzzo della malta Sika MonoTop® nella zona centrale



Video di attivazione dei re-bar:  
[www.re-fer.eu/mov02](http://www.re-fer.eu/mov02)



Ripristino dopo il rinforzo

## Rinforzo della resistenza alla flessione di travi dei ponti

Per la capacità portante di un ponte, oltre alla capacità di carico massima, è decisivo il livello di tensione al quale avviene il carico permanente dinamico. A seconda delle condizioni della struttura portante, sono necessarie anche misure di sostituzione strutturale per garantire la durata. Il calcestruzzo vicino alla superficie delle travi del ponte e della soletta è fortemente carbonizzato e l'armatura interna mostra in parte danni da corrosione. Il calcestruzzo danneggiato viene rimosso idromeccanicamente e le aree da rinforzare vengono irruvidite.



Calcestruzzo danneggiato prima del rinforzo



Armatura interna corrosa

re-bar può essere impiegato in modo mirato come rinforzo della resistenza alla flessione sotto le travi del ponte. Grazie alla precompressione viene sgravata anche l'esistente armatura di trazione. Le aree di ancoraggio sulle travi sono inoltre rinforzate con staffe a U in acciaio strutturale normale. La forza di precompressione di un re-bar 16 può essere convogliata nella zona di pressione del calcestruzzo con una staffa a U Ø12 mm. Se l'armatura di taglio esistente è difettosa o insufficiente, si possono impiegare anche profili a U precompressi



Ponteggi temporanei per il rinforzo



Area di ancoraggio di tre re-bar 16 (precompressi) con tre staffe a U Ø12 in acciaio strutturale in malta spruzzata Sika



Incorporamento dei re-bar con malta spruzzata Sika

Grazie all'incorporamento tramite la malta spruzzata Sika MonoTop®, si forma un nuovo deposito di alcali a protezione dell'armatura interna contro la corrosione. Il rinforzo robusto e durevole prolunga in modo mirato la durabilità dell'opera edile.



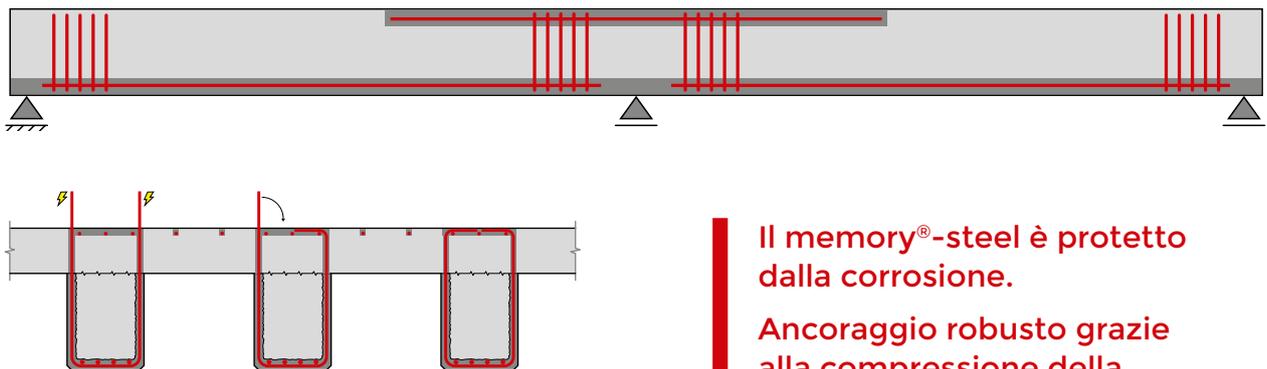
Prima del rinforzo:  
calcestruzzo carbonatizzato e armatura interna corrosa



Dopo il rinforzo:  
intonaco di rivestimento spatolato fine su tutta superficie, della serie Sika MonoTop

## Impiego combinato di re-bar trazione flettente/taglio nella costruzione di ponti

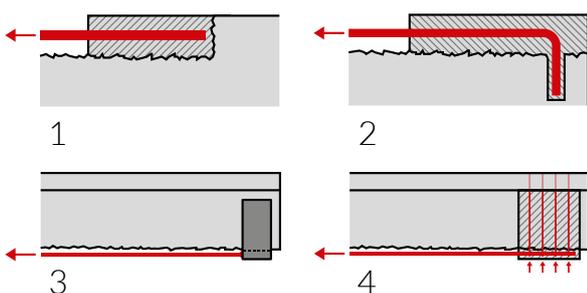
re-bar è adatto al risanamento parziale o completo di travi di ponti o travetti massicci. In caso di riconversioni o di riparazione di vecchie sezioni carbonatizzate di calcestruzzo, memory<sup>®</sup>-steel viene inserito quale rinforzo alla trazione flettente o al taglio in un nuovo strato di malta. Lo strato di malta cementizia funge da nuovo deposito alcalino per l'armatura in acciaio. Il rinforzo crea un sistema portante durevole con protezione contro la corrosione per il memory<sup>®</sup>-steel e per l'armatura interna esistente.



### Possibilità di ancoraggi flessibili

In linea generale, per i rinforzi a flessione il re-bar viene ancorato dietro o lungo l'asse neutro. In caso di rinforzo a taglio, il re-bar viene ancorato nella zona di compressione. L'introduzione della forza di precompressione si ottiene normalmente tramite la malta (1). In alternativa è possibile utilizzare i ganci terminali che incrementano la coesione degli strati tra la malta e il supporto (2). Altre soluzioni sono possibili, come l'utilizzo di angolari d'acciaio incollati o imbullonati sulla parte esterna e saldati con i re-bar (3).

Le staffe re-bar precomprese sono particolarmente adatte per aumentare la resistenza al taglio tra la malta e il supporto (4).



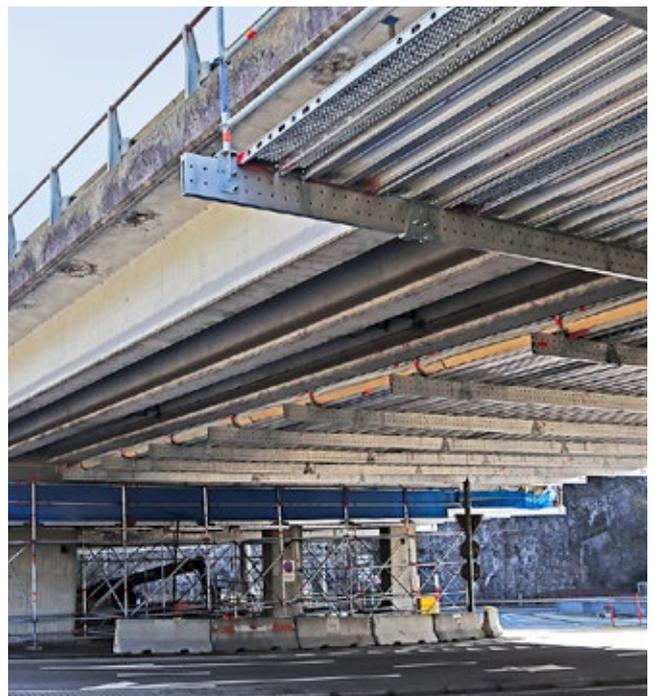
**Il memory<sup>®</sup>-steel è protetto dalla corrosione.**

**Ancoraggio robusto grazie alla compressione della sezione trasversale.**

**Contro l'affaticamento.**

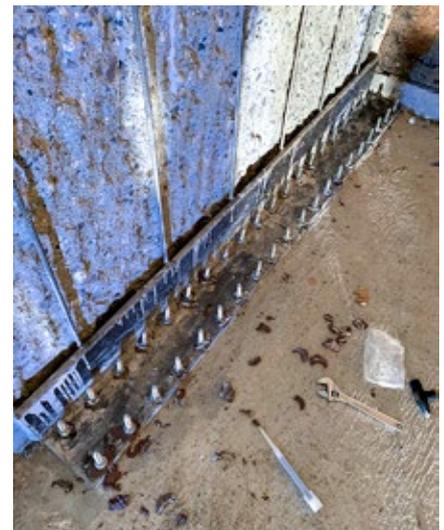
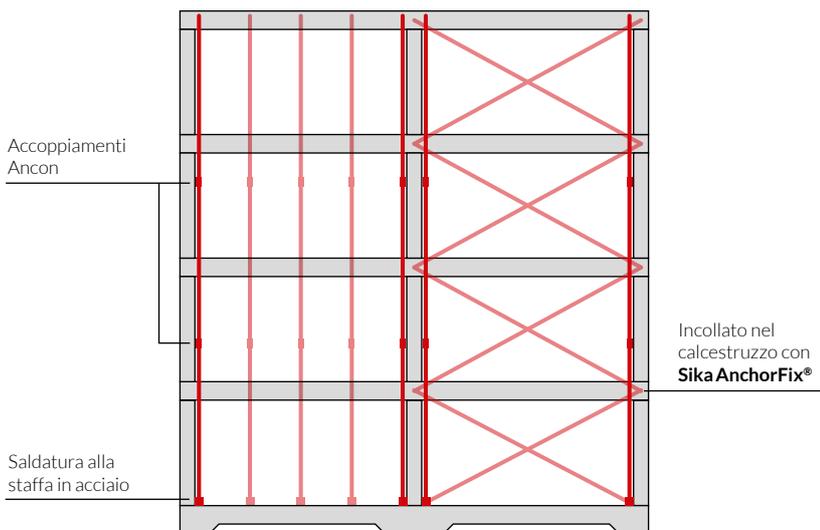
**Sgravio dell'armatura interna.**

**Maggiore capacità di carico, minore inflessione.**



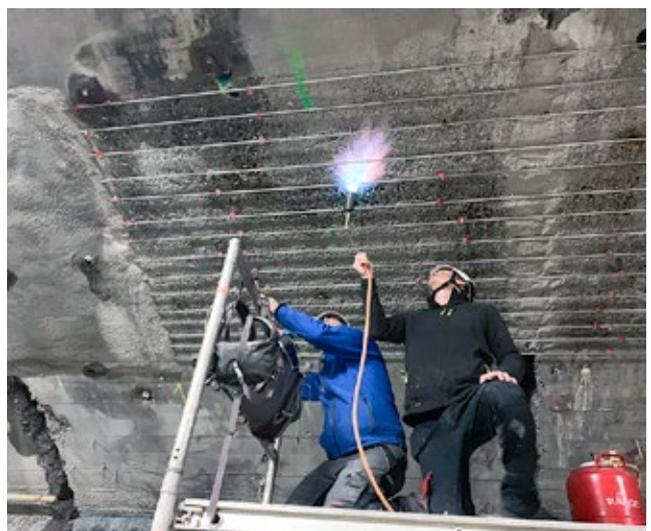
## Consolidamento antisismico

Il memory®-steel può essere saldato, consentendo un ancoraggio semplice dei re-bar. I re-bar vengono, ad esempio, saldati a profili a L in acciaio e ancorati alla soletta in calcestruzzo o al plinto di fondazione e successivamente inseriti nella malta proiettata Sika MonoTop®-412 Eco/-4012. I lavori devono essere eseguiti da un saldatore specializzato in saldature su acciaio inossidabile (punta in tungsteno, gas inerte, materiale d'apporto «Böhler A7CN-IG» filo da 1,6 mm).



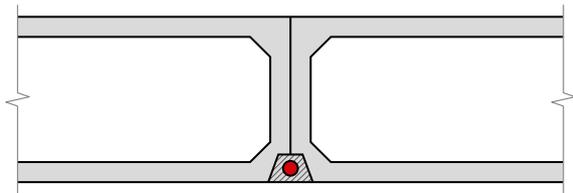
## Rinforzo in galleria

Per il consolidamento della volta o la compressione dei giunti di raccordo, ad esempio nella costruzione di canali, i re-bar vengono inseriti nella malta proiettata a secco Sika® Rock Gunite BE-8.



## Rinforzo per i solai alveolari

I re-bar vengono inseriti in scanalature intagliate nel calcestruzzo tra i corpi cavi, ancorati e attivati. La temperatura di attivazione viene regolata in base alla forza di precompressione desiderata.



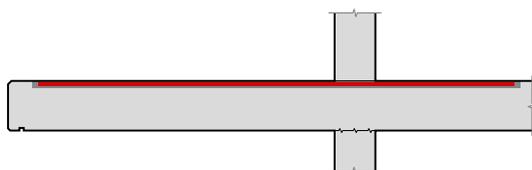
## Rinforzo contro il sollevamento

Il plinto di fondazione con insufficienti armature mostra rigonfiamenti e crepe sulla parte superiore. Il rinforzo contro le forze di sollevamento dovute alla spinta idrostatica dell'acqua di falda può essere realizzato in entrambe le direzioni di appoggio. È possibile combinare re-bar «in scanalature» in una direzione e re-bar «in malta da riprofilamento» nell'altra direzione.



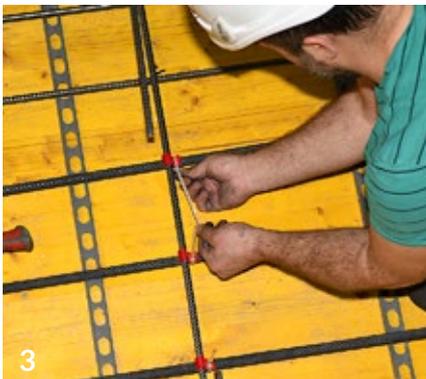
## Rinforzo per i raccordi di balconi

Nell'oggetto, la parte superiore delle lastre della soletta e del balcone vengono rinforzate con re-bar «in scanalatura». Il provvedimento riduce l'inflessione e permette l'applicazione di carichi utili più elevati sul balcone.



# Messa in opera di re-bar nelle nuove costruzioni

## Realizzazione di travi post-tese nascoste



Attivare i re-bar quando la malta presenta una resistenza alla compressione di almeno 25 N/mm<sup>2</sup>.



### Posa dell'armatura

- 1 Montare i casseri, posare i distanziatori e il primo strato di armatura interna tradizionale.
- 2 Posare i re-bar nella zona della trave nascosta, tra l'armatura interna.
- 3 Posare l'armatura trasversale (secondo strato)/I re-clip isolano il contatto elettrico con i re-bar.
- 4 I re-bar vengono controllati dall'ingegnere edile (contatto elettrico, posizione, punti di collegamento elettrico).

### Getto

- 5 Dopo il via libera dell'ingegnere, procedere al getto del calcestruzzo.

### Attivazione della precompressione

- 6 Attivare/riscaldare elettricamente (prima di togliere i casseri). È possibile misurare la forza di precompressione con una scatola dinamometrica.

Allacciamento elettrico in cantiere:  
400V, 2x63A (connettore CEE 63A)  
per un raggio di 20m

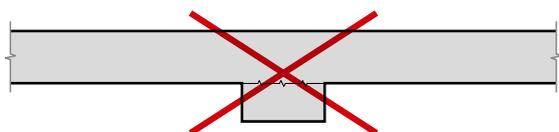
- 7 Rimuovere i punti di connessione re-bar e ultimare la soletta filigranata.

## Impiego di re-bar nelle nuove costruzioni

### Trave nascosta precompressa in un'abitazione plurifamiliare

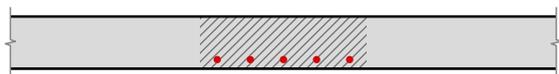
L'impiego mirato di memory®-steel nelle nuove costruzioni permette di ridurre lo spessore dei solai ed offre quindi un'alternativa ai sistemi portanti convenzionali, come ad esempio travi/rivestimenti o elementi portanti aggiuntivi. re-bar è utilizzato in particolare per traverse in calcestruzzo e solai in calcestruzzo filigranato con luci fino a 15 m e spessori fino a 30 cm. Grazie alla facilità d'impiego e lo sfruttamento ottimale della leva interna si ottengono diversi vantaggi rispetto al pretensionamento convenzionale con trefoli.

Pianificato:



**Non auspicato dall'architetto o dal committente.**

Variante re-bar:



Per non limitare l'altezza del locale, il committente e l'architetto pianificavano di inserire una trave nascosta. Al fine di rispettare i requisiti di inflessione posti dalla norma, tra lo strato inferiore dell'armatura sono stati inseriti dei re-bar. I re-bar vengono attivati dopo l'indurimento, ma prima di rimuovere la cassetta. La striscia di rinforzo realizzata nel solaio in calcestruzzo filigranato soddisfa gli stessi requisiti statici della variante inizialmente proposta.



I re-bar 16 sono forniti in lunghezze standard facilmente trasportabili. Le barre possono essere prolungate in cantiere utilizzando accoppiatori speciali.

## Sistema re-bar R18 per strutture in acciaio

«Strutture sottoposte a carichi statici e carichi dinamici permanenti»

Il tondino Ø18 mm re-bar R18 viene ancorato all'elemento in acciaio esistente tramite un collegamento a vite. In casi particolari è possibile saldare localmente l'ancoraggio terminale. L'attivazione/precompressione avviene con bruciatore a gas, conformemente alla scheda dei dati del prodotto re-fer. Durante questa operazione viene inserito uno scudo termico tra i re-bar R18 e la struttura in acciaio.

Prodotto	Sezione trasversale	Resistenza massima alla trazione	Forza di trazione massima	Allungamento a rottura
re-bar R18	254.5 mm <sup>2</sup>	750 N/mm <sup>2</sup>	<b>190.8 kN</b>	15%

Prodotto	Temperatura di riscaldamento	Precompressione	Forza di precompressione	Rilassamento
re-bar R18	Gas 300 – 350°C	380 N/mm <sup>2</sup>	<b>96.7 kN</b>	15% t <sub>0</sub>

I re-bar R18 sono forniti in cantiere con una lunghezza massima di 5,2 m. Una speciale filettatura M19.5 viene laminata su entrambe le estremità. Gli accoppiatori R18 C servono a preassemblare le barre nella lunghezza desiderata per la messa in opera.

La protezione anticorrosione della struttura in acciaio e del rinforzo viene realizzata con SikaCor® EG-1.



Tondino in acciaio paragonabile a un materiale 1.4003 secondo la norma DIN EN 10088 (classe di resistenza alla corrosione I)



Accoppiatore R18 C con filetto interno M19.5

## Prodotti complementari per il sistema re-bar R18

Il rinforzo con re-bar R18 può essere eseguito con una, due o quattro barre che possono essere installate parallelamente alla trave in acciaio o con un supporto centrale di rinvio.

Tipo di rinforzo	«Semplice»	«Doppio»	«Quadruplo»
Numero di re-bar R18	1	2	4
Forza di precompressione	<b>96.7 kN</b>	<b>193.4 kN</b>	<b>386.8 kN</b>
Forza di trazione	190.8 kN	381.6 kN	763.2 kN

### Ancoraggio terminale R18

La piastra di base dell'ancoraggio terminale si adatta all'oggetto e viene avvitata al profilo in acciaio esistente. Sono possibili diverse applicazioni così come il montaggio su profili speciali. Per fissare i re-bar R18 vengono forniti dadi R18 con rondelle speciali (anello sferico + sede conica) che consentono inclinazioni fino a 3°.



Ancoraggi terminali R18 di tipo semplice, doppio e quadruplo



Dadi e rondelle R18 per inclinazioni fino a 3°

Gli ancoraggi terminali standard sono progettati per i seguenti profili in acciaio:

Profilo in acciaio	IPE	PEA	INP	HEA	HEB	HEM
«Semplice»	270 - 750	270 - 600	300 - 550	140 - 1000	140 - 1000	140 - 1000
«Doppio»	350 - 750	300 - 600	360 - 550	140 - 1000	140 - 1000	140 - 1000
«Quadruplo»	750			260 - 1000	260 - 1000	260 - 1000

## Supporto di rinvio R18

Per aumentare il momento del pretensionamento, è possibile installare un supporto di rinvio al centro della trave. Per evitare di indebolire la sezione trasversale della trave in acciaio in quel punto, i supporti di rinvio R18 vengono incastrati. I supporti sono progettati per un rialzo massimo di 1 m. Le rondelle e lo smusso di base della staffa consentono angoli fino a 15°.



Supporto di rinvio R18 «doppio» e «quadruplo» incastrato

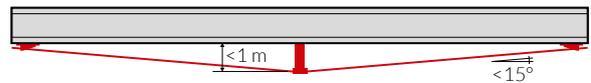
Le istruzioni di messa in opera sono riportate nella scheda tecnica del prodotto. Per applicazioni particolari (come il fissaggio dei re-bar R18 all'anima ecc.) è possibile chiedere il supporto del team re-fer. Il montaggio di nervature di rinforzo in punti di trasmissione delle forze deve essere verificato dall'ingegnere. La messa in opera e la precompressione devono essere effettuate sulla struttura scarica.

## Prove di carico dinamico permanente

I re-bar R18 precompressi hanno superato con successo prove di fatica con 2 milioni di cicli di carico, sia con cordone di saldatura e ampiezza di sollecitazione di 60 N/mm<sup>2</sup>, sia con accoppiatore M19.5 e ampiezza di sollecitazione di 50 N/mm<sup>2</sup>.



Rinforzo rialzato rispetto alla linea della trave in acciaio:



Supporto di rinvio incastrato

Rinforzo parallelo alla trave in acciaio:



Ancoraggio terminale bullonato alla flangia della trave in acciaio

**Adatto per applicazioni  
con carico permanente.**

## Applicazioni di re-bar R18

Rinforzo della resistenza alla flessione di un ponte composito in acciaio e calcestruzzo

Gli adeguamenti normativi dell'edificio si basano sull'aumento dei requisiti di carico. Il ponte composito in acciaio e calcestruzzo presenta deficit statici. Al fine di migliorare la resistenza alla flessione e alla fatica, le travi principali in acciaio vengono rinforzate con il procedimento re-bar R18.



Ponte composito in acciaio e calcestruzzo prima del rinforzo

Sull'oggetto, le parti in acciaio esistenti sono sabbiate e protette con il prodotto anticorrosione SikaCor® EG-1. Viene applicato il procedimento re-bar R18. I tondini vengono ancorati in entrambe le estremità. Gli ancoraggi terminali vengono avvitati alla trave in acciaio esistente. Segue l'attivazione dei re-bar R18 con bruciatore a gas su tutta la lunghezza.



Travi in acciaio esistenti con rivestimento anticorrosione



re-bar R18 montato con gli ancoraggi terminali

I re-bar R18 si applicano in parallelo alla direzione di portata. Poiché nel suo stato il ponte presenta elevate deflessioni, si impiegano supporti intermedi che vengono utilizzati nel mezzo della campata. Attraverso questi supporti vengono convogliate forze di deflessione in modo mirato. A causa dell'ambiente umido e dei sali nocivi (Sali di disgelo come misura invernale), l'intero provvedimento di rinforzo è infine rivestito con SikaCor® EG-1.



Travi in acciaio esistenti con rivestimento anticorrosione



Supporti al centro delle travi in acciaio

## Intercettazione di un singolo carico su una trave in acciaio

I maggiori carichi sul tetto di un padiglione in acciaio vengono assorbiti con un nuovo supporto. Il nuovo carico singolo sulla trave in acciaio esistente viene intercettato con il procedimento re-bar R18. Un supporto di deflessione R18 è installato nel mezzo. Grazie alla sopraelevazione, viene creato un braccio a leva, che contrasta direttamente il momento flettente. Il sistema è adatto ovunque le condizioni di spazio (bordo libero, distanze di sicurezza, ecc.) lo consentano.



Collegamento del supporto di deflessione R18 e applicazione della protezione antincendio



Avvitamento dell'ancoraggio finale

# Controllo della qualità

## Nello stabilimento di produzione

Conformemente al concetto di controllo di qualità ISO re-fer, lo sforzo di recupero della forma (forza di precompressione) viene controllato nella camera di temperatura (1). In aggiunta, un istituto certificato verifica la resistenza a trazione di ogni lotto di fornitura. In questo modo si garantisce la qualità del prodotto finale.

## Al supporto

La qualità del supporto viene determinata mediante prova con sclerometro (2). Il rinforzo mediante re-plate richiede una resistenza alla compressione del calcestruzzo di almeno 20 N/mm<sup>2</sup>. Nel caso di calcestruzzi di qualità inferiore, si raccomanda di consultare l'ingegnere re-fer riguardo alla resistenza di ancoraggio.

## Controllo della temperatura durante l'attivazione

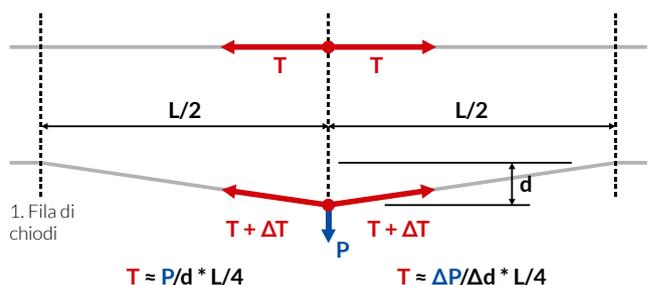
Durante il processo di riscaldamento, la temperatura del memory<sup>®</sup>-steel viene misurata con un apparecchio di misurazione separato.

## Controllo della forza di precompressione

Uno strumento speciale (4) è stato sviluppato per misurare la forza di precompressione su un oggetto. La procedura si basa sul «principio della balestra» per i trefoli e permette di controllare rapidamente e facilmente la forza di precompressione dei re-plate e dei re-bar subito dopo l'attivazione.



La forza verticale misurata **P** e l'allungamento **d** sono confrontati tramite rapporti trigonometrici delle forze di trazione risultanti nell'elemento di trazione **T + ΔT**.



# Panoramica dei prodotti

## Catalogo dei prodotti re-fer



### Prodotti memory®-steel

<b>re-plate 120/1.5</b>	Lamina di rinforzo per precompressione
<b>re-bar 10</b>	Tondino d'acciaio nervato per precompressione, sezione 89,9 mm <sup>2</sup>
<b>re-bar 16</b>	Tondino d'acciaio nervato per precompressione, sezione 211,2 mm <sup>2</sup>
<b>re-bar R18</b>	Tondino d'acciaio liscio per precompressione, sezione 254,2 mm <sup>2</sup>

### Attrezzi di messa in opera e componenti

<b>re-bolt</b>	Tasselli di plastica per il fissaggio dei re-bar nel supporto in calcestruzzo
<b>re-clip</b>	Clip di plastica per il fissaggio dei re-bar all'armatura interna
<b>re-IR 3000</b>	Radiatore a infrarossi
<b>re-EL</b>	Riscaldatore elettrico con modulo di comando per il riscaldamento a resistenza
<b>Puntello a T</b>	Puntello a soffitto con supporto a T per il fissaggio temporaneo dei re-plate

### Ancoraggio terminale dei re-plate

<b>Chiodi universali X-CR 48 P8 S15</b>	Chiodi universali Hilti per l'ancoraggio terminale
<b>Cartucce DX 6.8/11 M10 STD (rosse)</b>	Cartucce
<b>DX 5</b>	Inchiodatrice Hilti

## Prodotti Sika testati nel sistema



### In combinazione con re-plate

<b>SikaCem® Pyrocoat</b>	Intonaco a spruzzo antincendio
<b>SikaCem® Pyrocoat Base</b>	Intonaco di fondo adesivo a spruzzo antincendio
<b>SikaCor® EG-1</b>	Vernice anticorrosione: rivestimento intermedio a base di resina epossidica micacea
<b>Sikaflex® PRO-3</b>	Sigillante per colmare lateralmente i re-plate

### In combinazione con re-bar

<b>Sika® FastFix-121</b>	Malta cementizia per la chiusura superficiale di crepe
<b>SikaGrout®-314 N</b>	Malta colabile R4 senza ritiro per casseforme e scanalature
<b>Sika® InjectoCem-190</b>	Cemento finissimo per l'iniezione di crepe
<b>Sika MonoTop®-412 N/DE, Eco, -4012</b>	Malta R4 proiettata a umido a ritiro compensato
<b>Sika MonoTop®-422 PCC</b>	Malta da riprofilamento R4 a ritiro compensato
<b>Sika MonoTop®-452 N</b>	Malta da riprofilamento R4 a ritiro compensato per superfici orizzontali
<b>Sika MonoTop®-910 N/ECO, -1010</b>	Protezione anticorrosione per ferri d'armatura e ponte adesivo
<b>Sika® Rock Gunit BE-8</b>	Malta proiettata a secco (legata con cemento, priva di alcali)
<b>Sika® AnchorFix®-3030</b>	Adesivo epossidico di ancoraggio

**memory®-steel è stato testato nel sistema con malte proiettate, colabili e da riparazione e con protezioni antincendio e anticorrosione delle linee di prodotti Sika. re-fer non si assume alcuna garanzia in caso di impiego di altre malte in combinazione con memory®-steel.**

# Ausilio alla progettazione per memory®-steel

## Elenco dei simboli

### Notazioni latine

$A_f$	area sezione re-plate o re-bar
$A_s$	area totale della sezione d'armatura
$a_s$	armatura per metro lineare
$b$	larghezza a sezione del calcestruzzo
$d$	altezza statica
$d_f$	altezza statica re-plate o re-bar
$E_c$	modulo di elasticità del calcestruzzo
$E_{SMA}$	modulo di elasticità re-plate semplificato dopo l'attivazione
$F_c$	forza di compressione che sollecita il calcestruzzo
$f_{cd}$	tensione nel calcestruzzo misurata
$F_{ms,u}$	forza di trazione re-plate per analisi della sezione
$F_{p,i}$	forza di precompressione re-plate subito dopo l'attivazione $t = 0$
$F_{p,\infty}$	forza di precompressione re-plate dopo il rilassamento $t = \infty$
$F_s$	forza di trazione che sollecita l'acciaio
$f$	stima dell'inflexione massima della lastra/trave in calcestruzzo secondo Kordina ed Hegger
$h_c$	spessore lastra in calcestruzzo
$I$	momento di inerzia
$l$	luce della lastra/trave in calcestruzzo
$l_b$	lunghezza d'ancoraggio
$L$	lunghezza libera re-plate tra gli ancoraggi
$\Delta L$	variazione longitudinale del re-plate fino a rottura secondo Kordina ed Hegger
$M_{Ed}$	momento flettente misurato
$M_{p,BZ}$	momento flettente re-plate nello stato di costruzione
$M_{p,GZ}$	momento flettente re-plate dopo il rilassamento (per il calcolo dello stato limite)
$M_{Rd}$	resistenza alla flessione
$m_{Rd}$	resistenza alla flessione per lastra in calcestruzzo
$P_0$	forza di precompressione di un elemento di trazione dopo $t = 0$
$P_\infty$	forza di precompressione di un elemento di trazione con $t = \infty$
$V_{Ed}$	valore di dimensionamento della forza di taglio
$V_{Rd}$	valore di dimensionamento della resistenza alla forza di taglio
$V_{Rd,s}$	resistenza di taglio ancoraggio terminale re-plate con chiodi Hilti X-CR
$w_{eff}$	flessione effettiva
$w_{zul}$	flessione ammissibile
$x$	altezza della zona soggetta a pressoflessione
$z$	braccio di leva

### Notazioni greche

$\varepsilon_0$	predeformazione dell'elemento di trazione
$\varepsilon_c$	deformazione del calcestruzzo
$\varepsilon_s$	deformazione dell'acciaio d'armatura
$\varepsilon_f$	deformazione re-plate o re-bar
$\Delta\varepsilon_f$	aumento della deformazione re-plate da variazione longitudinale
$\Delta\sigma_f$	svariazione di tensione nel re-plate
$\Delta\sigma_{p,r}$	precompressione dopo rilassamento (dopo 50 anni)
$\sigma_c$	tensione nel calcestruzzo
$\sigma_{p,i}$	precompressione iniziale, direttamente dopo l'attivazione
$\sigma_{p,\infty}$	precompressione dopo il rilassamento

## Introduzione

La progettazione con prodotti in memory®-steel si esegue secondo le consuete norme vigenti per il dimensionamento delle strutture portanti di costruzioni in calcestruzzo armato e precompresso. La lamina di rinforzo «re-plate» viene considerata come una fascia tirante esterna precompressa non in composito. Nel sistema «re-bar» si può ammettere un composito rigido tra il tondino d'acciaio nervato inserito e la malta o il calcestruzzo proiettato. Qui di seguito vengono illustrate alcune possibili soluzioni di dimensionamento per rinforzi della resistenza alla flessione in fase di costruzione, nello stato limite di servizio e della capacità di portata. Gli esempi indicati servono per una migliore comprensione.

## Basi di calcolo teoriche

### re-plate

#### Fase di costruzione

In fase di costruzione occorre valutare la possibile formazione di crepe sul lato superiore della lastra a seguito della precompressione. A tal proposito è necessario stimare la precompressione iniziale  $\sigma_{p,i}$ . La precompressione può essere considerata come costante momento flettente  $M_{p,BZ}$  tra gli ancoraggi in modo da confrontarlo con il momento di fessurazione.

$$M_{p,BZ} = F_{p,i} * z = \sigma_{p,i} * A_f * z \quad (1)$$

( $A_f$  = superficie re-plate,  $z$  = braccio di leva)

#### Stato limite di servizio

Per lo stato limite di servizio per un periodo più lungo, la precompressione iniziale  $\sigma_{p,i}$  va ridotta a causa del rilassamento. Per un periodo di 50 anni si può stimare una riduzione del 15%. Quindi vale:

$$\sigma_{p,\infty} = \sigma_{p,i} * \left( 1 - \frac{\Delta\sigma_{p,r}}{\sigma_{p,i}} \right) \approx \sigma_{p,i} * 0.85 \quad (2)$$

Il momento flettente costante  $M_{p,GZ}$  tra gli ancoraggi può quindi essere calcolato come segue:

$$M_{p,GZ} = F_{p,\infty} * z = \sigma_{p,\infty} * A_f * z \quad (3)$$

#### Stato limite della capacità di portata

Nel sistema re-plate, le forze sono scaricate nella struttura attraverso i due ancoraggi terminali; nella lunghezza libera non c'è alcuna coesione con il substrato di calcestruzzo. Ciò non consente un'analisi convenzionale della sezione trasversale con compatibilità della deformazione derivata. Fondamentalmente sono possibili due varianti:

##### a) Calcolo senza aumento della tensione nel re-plate

In questo metodo di calcolo semplificato si assume una forza di trazione  $F_{ms,u}$  nel re-plate quale costante con l'aumentare della deformazione strutturale. Sulla base di questo assunto, è possibile realizzare l'equilibrio delle forze nella sezione attraverso una normale analisi della stessa e derivare quindi la capacità di portata. Tale calcolo può essere effettuato a mano, tramite un sistema di elaborazione dati (come Excel) o con un software di calcolo. Anche i comuni software di progettazione con analisi delle sezioni trasversali si avvalgono di questa semplificazione.

$$F_{ms,u} = \sigma_{p,\infty} * A_f \quad (4)$$

Questa ipotesi conservativa porta a sottostimare il carico utile effettivo. Il concetto è utile nei casi in cui lo stato limite d'esercizio sia decisivo per la progettazione strutturale.

**b) Calcolo con aumento della tensione nel re-plate**

Un secondo approccio si basa sulla stima della variazione longitudinale supplementare del re-plate con l'aumentare del carico o la deflessione della lastra. Ci si basa su approcci empirici di progettazione derivati da prove di carico su travi in calcestruzzo con successiva precompressione dei trefoli senza composito [1]. In sintesi, sulla base delle dimensioni della sezione trasversale viene stimata un'ulteriore deflessione massima  $f$  che causa una variazione longitudinale  $\Delta L$  nel re-plate. La procedura presuppone che per una trave a campata unica, tutte le deformazioni siano concentrate in una sezione di rottura al centro della trave. Questa variazione longitudinale può essere convertita in una deformazione supplementare  $\Delta \epsilon_f$  la quale dopo l'attivazione produce lo stato di sollecitazione  $\sigma_{p,\infty} + \Delta \sigma$  nella sezione trasversale della lamina in base alla curva tensione-deformazione. Semplificando, è possibile applicare un modulo di elasticità ridotto  $E_{SMA}$  di 70 GPa per calcolare la sollecitazione definitiva sulla variazione della deformazione.

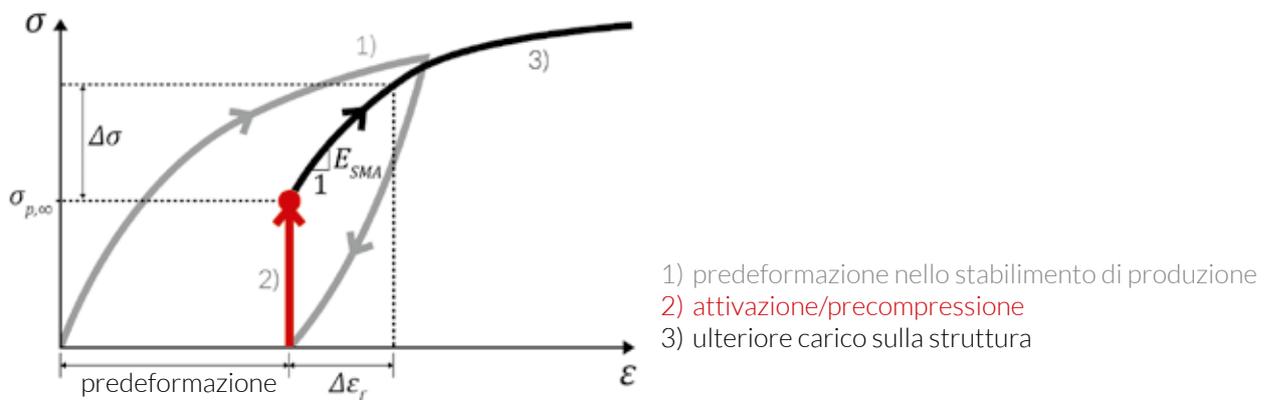


Figura 1: diagramma tensione-deformazione re-plate con predeformazione, attivazione e successivo carico

Si applica:

$$f = 0.9 * d - e_v < 0.02 * L \tag{5}$$

( $d$ = altezza statica,  $e_v = 0$  nel caso di lamine dritte,  $L$  = lunghezza libera re-plate tra gli ancoraggi)

$$\Delta L = \frac{4 * f * z}{L} \tag{6}$$

$$\Delta \epsilon_f = \frac{\Delta L}{L} \tag{7}$$

Sulla base della deformazione aggiuntiva conosciuta e quindi della sollecitazione aggiuntiva si può calcolare la forza di trazione nel re-plate. Quest'ultima si può inserire nell'equilibrio delle forze della sezione trasversale per determinare la capacità massima di portata. In generale, per le strutture in calcestruzzo si applicano i principi di progettazione specifici per ciascun Paese (compressione del calcestruzzo e rottura a trazione della/e armatura/e) con valori di proprietà adattati.

**Ancoraggio**

Inoltre, per misurare la sicurezza strutturale si deve verificare la resistenza di ancoraggio per la forza di trazione aggiuntiva nel re-plate.

$$F_{ms,u} = (\sigma_{p,\infty} + \Delta \sigma_f) * A_f \leq V_{Rd,s} = \frac{108kN}{1.3} = \mathbf{83.1kN} \tag{8}$$

**Indicazione:** per le geometrie strutturali comuni, la resistenza di ancoraggio diventa il criterio decisivo per lo stato di rottura. La prova esplicita può essere omessa nella maggior parte dei casi.

La resistenza di ancoraggio di 108 kN è valida per 12 chiodi Hilti X-CR e viene ridotta con un coefficiente di sicurezza pari a 1,3 (raccomandazione re-fer). I dati si applicano ai calcestruzzi con una resistenza alla compressione misurata (cubi di prova) di almeno 20 N/mm<sup>2</sup>. Nel caso di calcestruzzi con resistenze inferiori, contattare il dipartimento di ingegneria di re-fer.

## re-bar

### Fase di costruzione

Di norma, nelle zone di ancoraggio le estremità del re-bar vengono ancorate al supporto in calcestruzzo in uno strato di malta, mentre la parte intermedia viene precompressa. L'effetto portante è lo stesso del re-plate: l'area esposta agisce come una fascia tirante esterna. La formula (1) può essere utilizzata per i re-bar con la rispettiva area della sezione.

### Stato limite di servizio

Dopo l'attivazione/precompressione iniziale dei re-bar, le aree tra gli ancoraggi vengono colmate creando una coesione solida con la struttura portante. Per il calcolo è possibile effettuare una normale analisi della sezione trasversale con derivazione di compatibilità della deformazione ed equilibrio delle forze. Per lo stato limite di servizio, la precompressione iniziale  $\sigma_{p,i}$  va ridotta a causa del rilassamento secondo la formula (2).

Anche per calcolare la riduzione dell'inflessione a seguito della precompressione, si può assumere un momento flettente uniforme (vedi formula (3)) per risolvere il problema, ad esempio, con l'equazione di lavoro.

### Stato limite della capacità di portata

Gli stessi principi dell'analisi della sezione trasversale si applicano anche per il calcolo della sicurezza strutturale. A seconda della situazione, il re-bar subisce deformazioni/sollecitazioni aggiuntive che si sommano alla precompressione iniziale. La variazione di tensione nel re-bar è quindi composta dalla deformazione aggiuntiva tra il momento dell'applicazione/precompressione e lo stato di rottura ( $\Delta\epsilon_f$ ).

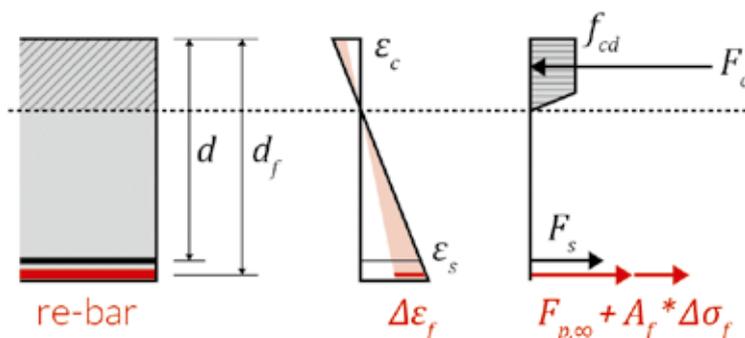


Figura 2: rappresentazione schematica dell'analisi della sezione trasversale dello stato limite della capacità di portata

L'equilibrio delle forze si realizza con una forza equivalente nel re-bar come indicato qui di seguito. Per semplicità, si può nuovamente applicare un modulo di elasticità ridotto  $E_{SMA}$  di 70 GPa. Si deve rispettare la tensione massima di trazione dei re-bar.

$$F_{ms,u} = F_{p,\infty} + A_f * \Delta\sigma_f = A_f * (\sigma_{p,\infty} + \Delta\epsilon_f * E_{SMA}) \quad (9)$$

## Ancoraggio

Le direttive per l'impiego dei re-fer forniscono valori indicativi per la lunghezza di ancoraggio dei re-bar. Le aree di ancoraggio dipendono dalle forze di trazione previste, dal diametro delle barre e dal tipo di applicazione (in scanalatura, nel supporto in calcestruzzo o nel calcestruzzo proiettato). Inoltre, devono essere rispettate le norme riguardo ai valori di resistenza coesiva a trazione, rugosità ecc. Per un supporto con un calcestruzzo preesistente si utilizzano malte R3 e R4, in conformità con le norme europee per la riparazione e il ripristino del calcestruzzo. Si raccomanda una resistenza coesiva a trazione di almeno  $1,5 \text{ N/mm}^2$ .

Di principio, i rinforzi a flessione dovrebbero essere ancorati dietro o lungo l'asse neutro. Normalmente, l'introduzione della forza di precompressione nel supporto in calcestruzzo si ottiene attraverso la coesione con la malta. In alternativa, è possibile impiegare sistemi di tassellatura omologati o soluzioni particolari, come illustrato a pagina 27.

## Avvertenze

Per le caratteristiche dei materiali, si consiglia di consultare le schede tecniche dei rispettivi prodotti in vigore nel paese specifico. A causa dell'ottimizzazione continua dei materiali, i parametri effettivi di quest'ultimi possono variare dai valori utilizzati negli esempi di progettazione; si raccomanda quindi di verificare accuratamente questi valori. In caso di dubbio o in situazioni di dimensionamento particolare, il dipartimento di ingegneria re-fer sarà lieto di assistervi. Per ulteriori informazioni visitate la pagina [www.re-fer.eu](http://www.re-fer.eu) (referenze, schede tecniche, direttive di messa in opera e norme di sicurezza, specifiche per gare d'appalto, verbali di prova e pubblicazioni) o rivolgetevi telefonicamente al nostro servizio tecnico.

## Corrosione

Nonostante la buona resistenza alla corrosione dell'acciaio memory®-steel, nel caso di esposizione a sollecitazioni da cloruri, si raccomanda di adottare misure adeguate (rischio di cricche da tensocorrosione). Il rivestimento dei re-bar con malta va rivalutato e ove necessario adattato. Nel caso di impiego di re-plate, un rivestimento speciale viene applicato nello stabilimento di produzione (SikaCor® EG-1). Ciò però limita a  $165^\circ\text{C}$  la temperatura massima di riscaldamento ammissibile e, di conseguenza, la forza di precompressione.

## Protezione antincendio

Una protezione antincendio per il rinforzo impiegato è sempre richiesta se senza rinforzo, il carico d'incendio previsto dalle norme e specifico per il Paese, non è soddisfatto. La tabella seguente riporta un

Indicazioni del carico [ $\text{kN/m}^2$ ]	Prima del rinforzo	Dopo il rinforzo	
		grado rinforzo «basso» +3.0	grado rinforzo «elevato» +5.0
<b>Peso proprio/carico sovrapposto</b>	5.0	5.0	5.0
<b>Carico utile</b>	3.0	$3.0 + 3.0 = 6.0$	$3.0 + 5.0 = 8.0$
<b>Carico di servizio</b>	<b>8.0</b>	<b>11.0</b>	<b>13.0</b>
Esempio con coefficiente di sicurezza globale	$8.0 \cdot 1.5 = 12.0$	$11.0 \cdot 1.5 = 16.5$	$13.0 \cdot 1.5 = 19.5$
<b>Carico limite da garantire</b>	<b>12.0</b>	16.5	19.5
<b>Protezione antincendio</b> Criterio: il nuovo carico di servizio deve essere inferiore a 12,0 (carico limite esistente)	-	<b>11.0 &lt; 12.0</b> non necessario	<b>13.0 &gt; 12.0</b> necessario

semplice esempio di confronto della sicurezza residua per una struttura portante con grado di rinforzo «basso» o «elevato».

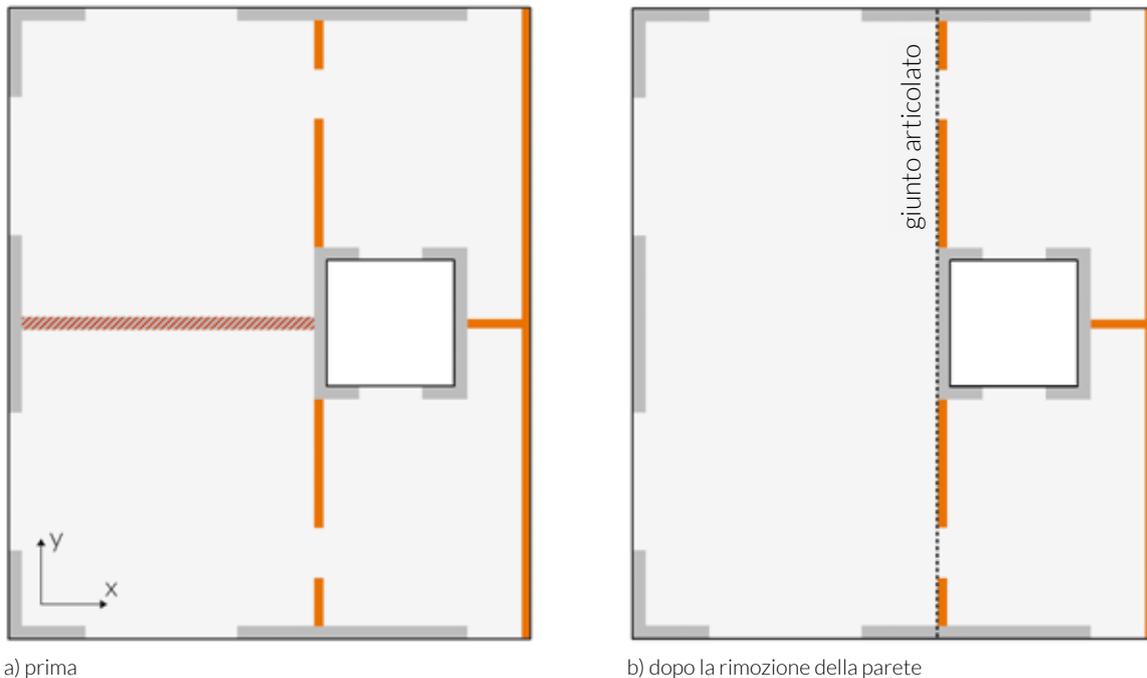
Se si vuole ottenere un grado di rinforzo «elevato», si deve garantire che anche il rinforzo impiegato non ceda in caso d'incendio; è quindi necessaria una misura antincendio per i re-plate o i re-bar. Ai re-bar inseriti nel calcestruzzo o nella malta cementizia si applicano le stesse norme e prescrizioni per armature in acciaio tradizionali. Per i re-plate si utilizza di norma un intonaco a spruzzo antincendio a base cementizia (SikaCem® Pyrocoat).

## Esempi di dimensionamento

### Rinforzo semplice della resistenza alla flessione con re-plate

Su richiesta del committente, le pareti portanti (segnate in rosso) devono essere rimosse per unire due locali in un ampio soggiorno. Questa modifica della struttura portante crea inevitabilmente problemi di flessione nella soletta. L'esempio qui di seguito illustra il rinforzo della resistenza alla flessione della lastra in calcestruzzo. Altre verifiche, come la trasmissione del carico alle pareti e ai piani inferiori, le verifiche delle forze di taglio, il punzonamento, ecc., non vengono trattate, come non vengono illustrate le verifiche per la fase di costruzione.

Figura 3: planimetria modello Cubus



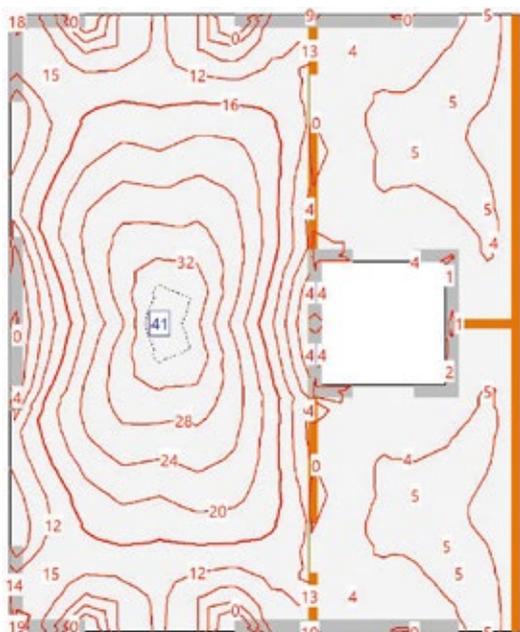
Nella struttura esistente, in tutti gli strati è inserita un'armatura di  $\varnothing 10@150$  ( $a_s = 524 \text{ mm}^2/\text{m}'$ ). La lastra in calcestruzzo presenta le seguenti caratteristiche: spessore di  $h_c = 200 \text{ mm}$ , qualità del calcestruzzo C30/37, strato di copertura dell'armatura di 30 mm. Per i componenti portanti è richiesta una resistenza antincendio R60.

Con queste specifiche, la struttura esistente raggiunge nel 1°/4° strato (direzione x) una resistenza alla flessione di  $m_{Rd} = 36 \text{ kNm/m}'$ , rispettivamente di  $32 \text{ kNm/m}'$  nel 2°/3° strato. Nella nuova planimetria l'armatura esistente (4° strato) inizierebbe a deformarsi in modo plastico già sotto un carico quasi permanente. Pertanto, in queste aree viene modellato un giunto articolato per trasmettere questo momento alla campata (cfr. figura 3b)).

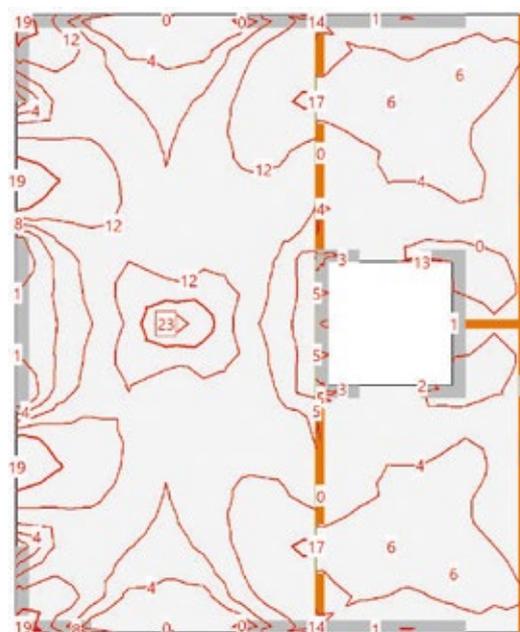
## Dimostrazione a livello di servizio

In condizioni di carichi di servizio, la nuova planimetria mostra i seguenti momenti flettenti in direzione x e y. Al centro della campata, nella direzione principale di carico, la resistenza alla flessione dell'armatura esistente viene leggermente superata. Pertanto, il rinforzo impiegato deve essere protetto contro gli incendi. La procedura è illustrata nel paragrafo «Protezione antincendio».

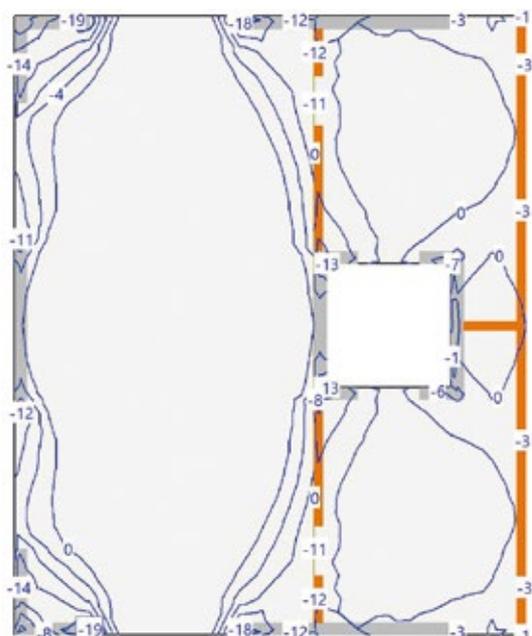
Figura 4: diagrammi in Cubus dei momenti flettenti soggetti a carico di servizio («quasi permanente»)



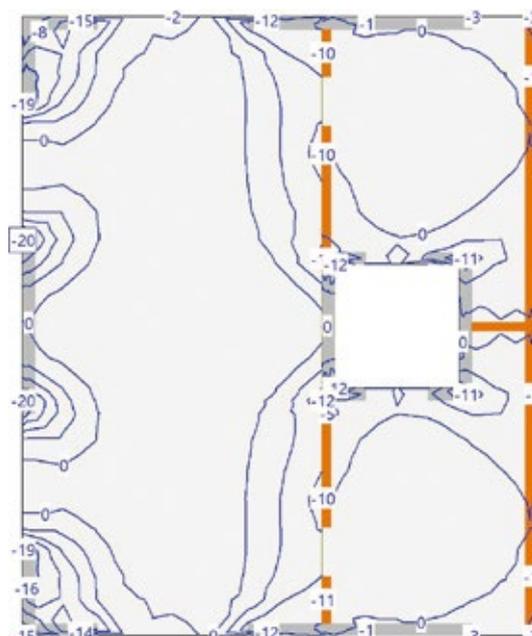
a) direzione x sotto (1° strato)



b) direzione y sotto (2° strato)



c) direzione x sopra (4° strato)



d) direzione y sopra (3° strato)

Un altro problema in caso delle verifiche di servizio riguarda l'inflessione. La sezione del calcestruzzo fessurato soggetto al carico di servizio, nell'esempio, mostra una deflessione effettiva di 16,6 mm. Come valore ammissibile si considera il valore secondo norma:

$$w_{zul} \leq l/300 = 4'600\text{mm}/300 = 15.3\text{mm}$$

Il pretensionamento permette di ottenere un momento costante in mezzo alla campata lungo la striscia larga circa 3m. In questo caso si può utilizzare la formula indicata in letteratura per un momento costante su una trave semplice. Per casi più particolari (come travi passanti), il dimensionamento può essere effettuato utilizzando l'equazione di lavoro.

$$w = \frac{M * l^2}{8 * E_c I}$$

Inoltre, per semplificazione si presume che l'intera sezione del calcestruzzo sia fessurata. In tal caso si riduce il valore  $E_c I$  to  $E_c I/3$ . Ne risulta la seguente formula:

$$w = w_{eff} - w_{zul} = 16.6\text{mm} - 15.3\text{mm} = 1.3\text{mm} \leq \frac{M_{p,GZ} * l^2}{8 * \left(\frac{E_c I}{3}\right)}$$

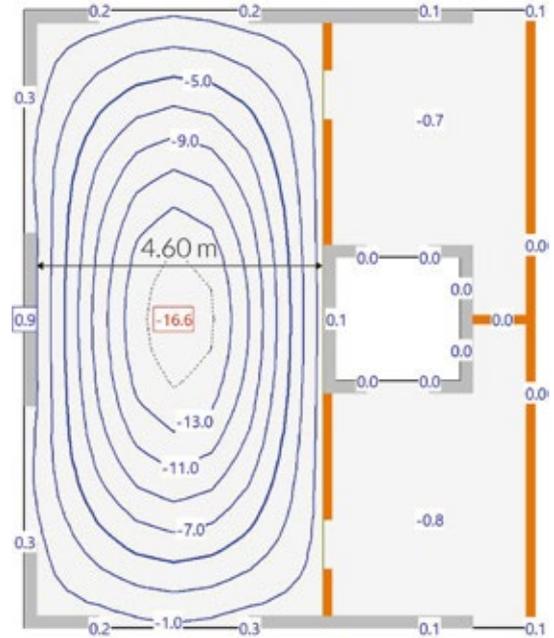


Figura 5: deflessioni carichi quasi permanenti

Questa formula può essere risolta in base a  $n$  (numero di strisce re-plate per metro lineare):

$$w = \frac{M_{p,GZ} * l^2}{8 * \left(\frac{E_c I}{3}\right)} = \frac{(\sigma_{p,i} * 0.85 * A_f * z * n) * l^2}{8 * \left(\frac{E_c * h_c^3 * b}{12 * 3}\right)}$$

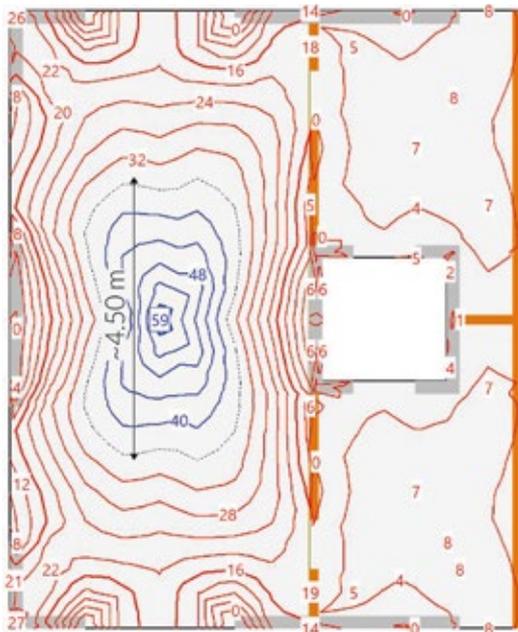
$$\rightarrow n = \frac{w * 8 * E_c * h_c^3 * b}{12 * 3 * \sigma_{p,i} * 0.85 * A_f * z * l^2} = \frac{1.3\text{mm} * 8 * 33.6\text{GPa} * (200\text{mm})^3 * 1.0\text{m}}{12 * 3 * 380 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 0.85 * 120\text{mm} * 1.5\text{mm} * \frac{200\text{mm}}{2} * (4.6\text{m})^2} = 0.63$$

In mezzo alla campata sono quindi necessarie almeno 0,63 fasce re-plate per metro lineare. Se la dimostrazione della sicurezza strutturale non indica un valore maggiore, sarà necessario installare fasce di rinforzo ogni 1,6 m circa.

### Dimostrazione della sicurezza strutturale

La dimostrazione della sicurezza strutturale si esegue mediante il sistema di «calcolo con aumento della tensione nel re-plate». I momenti flettenti che devono essere soddisfatti sono illustrati qui di seguito:

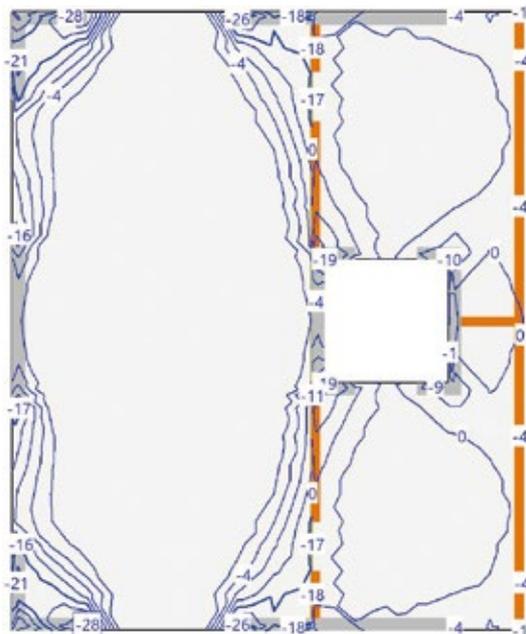
Figura 6: diagrammi in Cubus dei momenti flettenti nello stato limite di sicurezza della portata



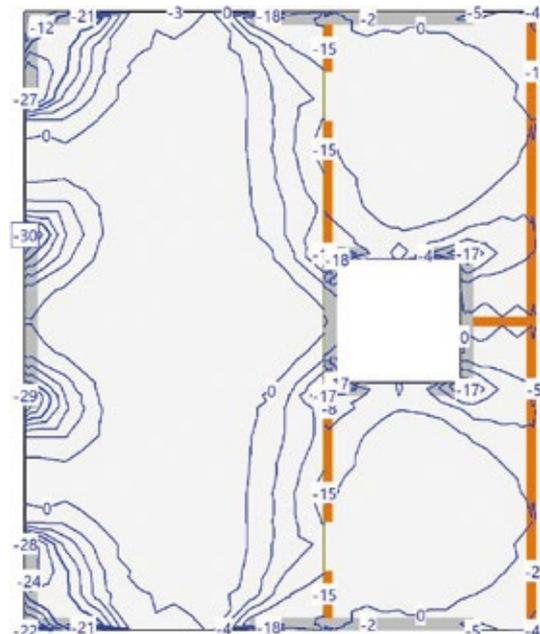
a) direzione x sotto (1° strato)



b) direzione y sotto (2° strato)



c) direzione x sopra (4° strato)



d) direzione y sopra (3° strato)

Si calcola dapprima l'aumento delle deformazioni nel re-plate. Il valore di  $L$  (lunghezza libera del re-plate tra gli ancoraggi) si ottiene sottraendo la lunghezza di ancoraggio su entrambi i lati (400 mm) e con una distanza di sicurezza (100 mm):

$$L = 4.6m - 2 * (400mm + 100mm) = 3.6m$$

$$f = 0.9 * d - e_v = 0.9 * (0.9 * 200mm) - 0 = 162mm < 0.02 * L = 72mm$$

$$\Delta \varepsilon_f = \frac{\Delta L}{L} = \frac{4 * f * z}{L^2} = \frac{4 * 72 \text{ mm} * (0.9 * 200 \text{ mm})}{(3.6 \text{ m})^2} = \mathbf{0.4\%}$$

Il momento flettente da rinforzare viene quindi assorbito con la forza finale  $F_{ms,u}$  in base a  $n$  numero di fasce re-plate su un braccio di leva interno  $z$  di circa  $0.9 * h_c$ :

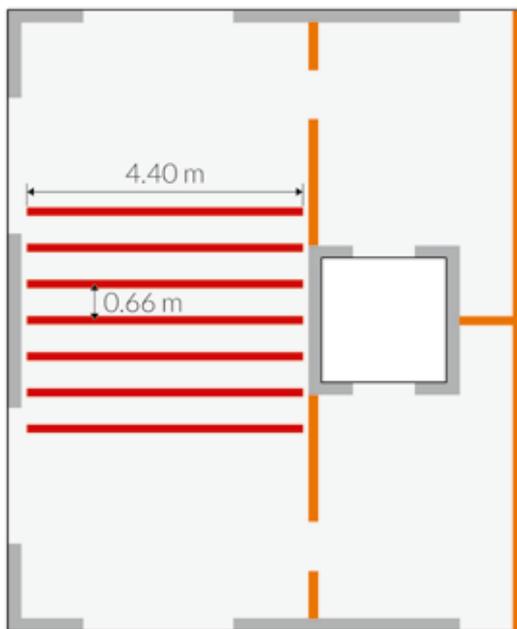
$$F_{ms,u} = (\sigma_{p,\infty} + \Delta \sigma) * A_f = (\sigma_{p,i} * 0.85 + \Delta \varepsilon_f * E_{SMA}) * A_f =$$

$$\left( 380 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 0.85 + 0.004 * 70 \text{ GPa} \right) * 120 \text{ mm} * 1.5 = 108.5 \text{ kN} < \mathbf{83.1 \text{ kN}}$$

$$M_{p,GZ} = n * F_{ms,u} * z = n * 83.1 \text{ kN} * 0.9 * 200 \text{ mm} \geq 58.6 \text{ kNm} - 36.0 \text{ kNm} = 22.6 \text{ kNm}$$

$$\rightarrow n = \frac{M_{p,GZ}}{F_{ms,u} * z} = \frac{22.6 \text{ kNm}}{83.1 \text{ kN} * 0.9 * 200 \text{ mm}} = \mathbf{1.5}$$

Per soddisfare la sicurezza strutturale, nelle aree sovrasollecitate (circa 4,5 m) sono quindi necessarie 1,2 fasce re-plate per metro lineare, ossia una fascia ogni 0.66 m (per un totale di 7 fasce).



**7 x re-plate**  
 $l = 4.40 \text{ m}$ , ogni  $0.66 \text{ m}$  con protezione antincendio

Figura 7: posizione delle fasce di rinforzo re-plate

### Protezione antincendio

Le azioni quasi permanenti devono essere garantite in caso d'incendio. Dato che in questa eventualità la resistenza alla flessione della struttura esistente non è sufficiente, le misure di rinforzo impiegate devono essere anch'esse protette per soddisfare la classe R60. In questo caso, trattandosi di un'applicazione in un ambiente interno si impiega l'intonaco a spruzzo antincendio SikaCem® Pyrocoat con uno spessore dello strato secondo la scheda tecnica di re-plate attualmente valida.

## Rinforzo di una trave a T con re-bar

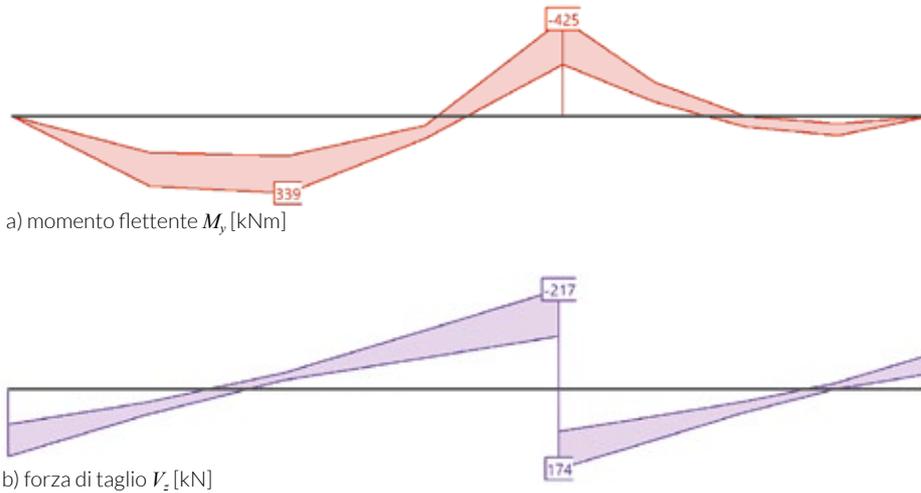
A causa di un cambio di utilizzo e di carichi aggiuntivi, diverse travi a T di un padiglione industriale devono essere rinforzate staticamente. L'esempio di calcolo mostra come risolvere una deflessione non ammissibile nella campata e rinforzare la resistenza alla flessione e a taglio di una singola trave. Nel quadro di questo esempio non vengono illustrate ulteriori verifiche. Le travi hanno due campate di 12 e 8 metri, e appoggi semplici.



Figura 8: trave a due campate dello stabilimento industriale, modello «Statik-8»

Le sollecitazioni precedenti (momenti flettenti e sforzi di taglio) sono illustrate qui di seguito. Non ci sono forze normali e torsionali.

Figura 9: forze di taglio dello stato limite di sicurezza della portata



Le travi originali, illustrate nella figura 10, sono state dimensionate e rinforzate in funzione delle azioni di carico. Le deflessioni risultanti della sezione di calcestruzzo fessurato soddisfano le specifiche ammissibili delle relative norme ( $w_{eff} = 32 \text{ mm}/w_{zul} = 34 \text{ mm}$ ).

In base alle richieste del committente, occorre aumentare il sovraccarico e il carico utile. Inoltre, lo strato di malta aggiuntivo implica un peso proprio maggiore. Si ottengono così le seguenti forze di taglio per lo stato limite ultimo:

	Attuali forze di taglio	Attuali resistenze	Nuove forze di taglio
<b>Momenti flettenti [kNm]</b>	$M_{Ed}$ +339 -425	$M_{Rd}$ +355 -440	$M_{Ed}$ +449 -550
<b>Forze di taglio [kN]</b>	$V_{Ed}$ 217	$V_{Rd}$ 230	$V_{Ed}$ 285

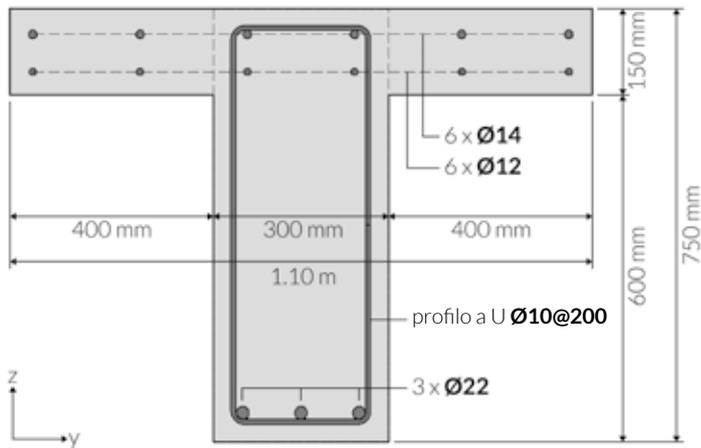
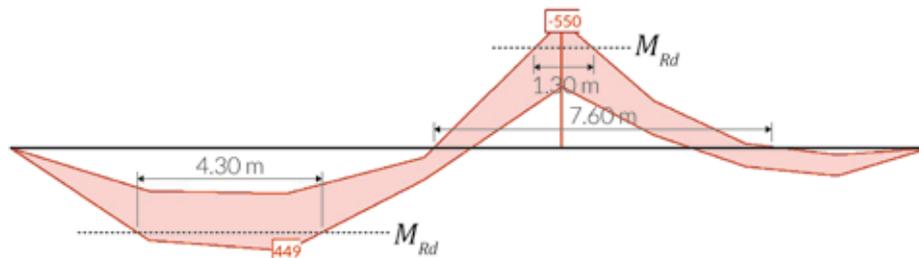


Figura 10: attuale sezione delle travi a T

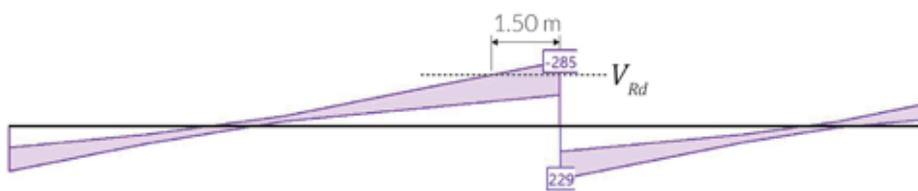
### Dimostrazione della sicurezza di portata

In una prima fase si studia lo stato limite di sicurezza della portata. Le nuove forze di taglio sono raffigurate in dettaglio qui di seguito.

Figura 11: nuove forze di taglio dello stato limite di sicurezza della portata



a) momento flettente  $M_x$  [kNm]



b) forza di taglio  $V_z$  [kN]

Con i carichi aggiuntivi si verifica un problema di taglio in un'area larga circa 1,5 m accanto al supporto centrale. Le forze di taglio mancanti di circa 55 kN/m' vengono portate con profili a U re-bar 10. Per semplicità si considera solamente la semplice forza di precompressione (nessun aumento di tensione fino alla rottura di taglio) sulle staffe a doppia sezione.

$$V_{Rd,s} = \frac{2 * \sigma_{p,\infty} * A_f}{s} * z * \cot(45^\circ) = \frac{2 * 350 \frac{N}{mm^2} * 0.85 * 89.9 mm^2}{0.5 m} * \sim 0.7 m * \cot(45^\circ) = 75 kN / m'$$

Per rinforzare la zona, occorrono quindi in totale tre profili a U re-bar 10 collocati a una distanza di 500 mm. Le staffe passano attorno all'anima esistente irruvidita, sopra i rinforzi longitudinali con re-bar aggiuntivi, e vengono poi inserite nella malta proiettata e gettate nella flangia (ancoraggio sopra l'asse neutro).

Le staffe re-bar sono riscaldate/attivate elettricamente dall'alto. I distanziatori garantiscono che non ci sia contatto con la restante armatura evitando una perdita di tensione durante il processo di riscaldamento.

Nella campata più lunga, la nuova azione flettente supera la resistenza esistente di circa 94 kNm. Su tutta la campata, tre re-bar 16 vengono applicati sulla parte inferiore dell'anima e inseriti nella malta proiettata. Sopra il supporto centrale, il momento flettente negativo supera il carico ammissibile di circa 110 kNm su una lunghezza di circa 1,3 metri. In questa zona vengono inseriti complessivamente quattro re-bar 10 nel calcestruzzo fresco (attenzione: ancoraggio del rinforzo dietro l'asse neutro). Le barre di rinforzo vengono inserite nella malta nella zona di ancoraggio e, una volta indurita la malta, riscaldate ad esempio con un bruciatore a gas. Infine, anche le restanti zone vengono riempite.

La verifica a flessione della nuova sezione è stata realizzata utilizzando un software di progettazione standard. La tabella sottostante indica le nuove resistenze.

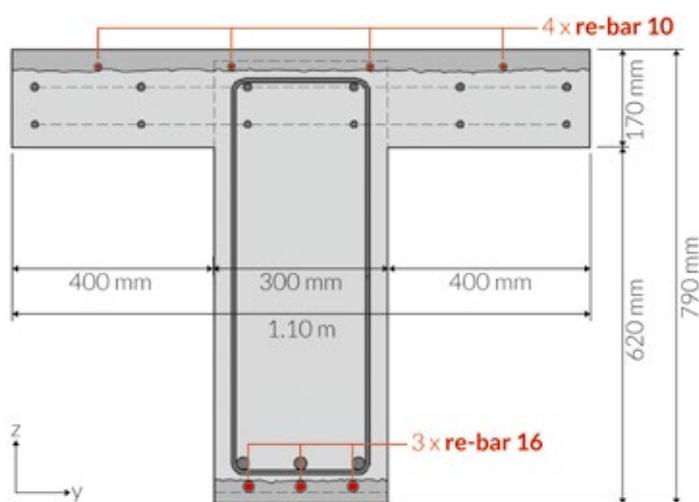


Figura 12: nuova sezione delle travi a T con rinforzo della resistenza alla flessione tramite re-bar

	Forze di taglio precedenti		Resistenze precedenti		Nuove forze di taglio		Nuove resistenze	
<b>Momenti flettenti [kNm]</b>	$M_{Ed}$	+339 -425	$M_{Rd}$	+355 -440	$M_{Ed}$	+449 -550	$M_{Rd}$	+569 -553
<b>Forze di taglio [kN]</b>	$V_{Ed}$	217	$V_{Rd}$	230	$V_{Ed}$	285	$V_{Rd}$	315

Per la modellizzazione sono stati utilizzati, tra l'altro, i seguenti parametri:

**Proprietà degli elementi di trazione:**

- predeformazione  $\epsilon_0 = 0.57\%$  per re-bar 10 e  $0.46\%$  per re-bar 16 (ne risulta una precompressione calcolata di  $E \cdot \epsilon_0 = 400 \text{ N/mm}^2$ , rispettivamente  $320 \text{ N/mm}^2$ )
- precompressione con composito
- fattore di perdita  $P_\infty/P_0 = 0.85$  (rilassamento))

**Proprietà del materiale:**

- $E = 70 \text{ kN/mm}^2$  (modulo di elasticità re-bar dopo l'attivazione)
- $f_{p0.1k} = 520 \text{ N/mm}^2$  (valore di misurazione con coefficiente di sicurezza diminuito)
- $\epsilon_{ud} = 30\%$

## Verifica a livello di servizio

L'utilizzo di elementi di rinforzo precompressi inseriti nella malta limita l'apertura di crepe e scarica l'armatura esistente. Oltre a migliorare la durabilità, in questo esempio viene analizzata anche l'inflessione. Con i nuovi carichi, lo spostamento verticale nella campata più grande risulta essere circa di 39 mm. Il rinforzo a flessione con tre re-bar 16 implica un momento flettente costante che contrasta l'inflessione. In questo modo, il sovratensionamento dovrebbe compensare i 5 mm in eccesso ( $w_{eff} = 39 \text{ mm}/w_{zul} = 34 \text{ mm}$ ).

La deformazione implicata dalla precompressione del sistema iperstatico può essere calcolata in diversi modi. Si applica l'equazione di lavoro per il sistema iperstatico semplice. Come sistema di base (SB), viene introdotto un giunto sul supporto centrale. Per semplicità, la precompressione nella zona di flessione negativa non viene considerata anche se quest'ultima comporterebbe un ulteriore effetto positivo.

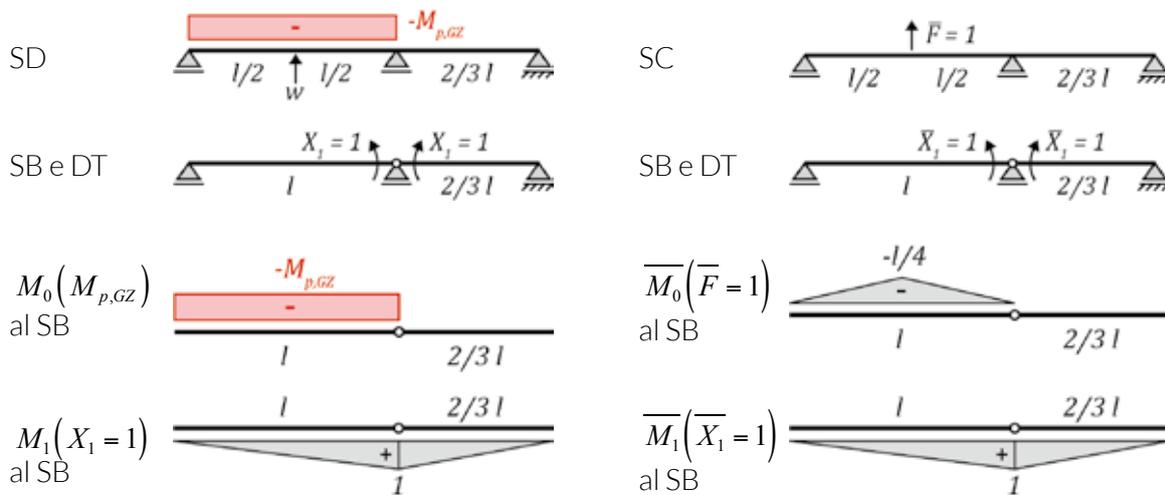


Figura 13: semplificazione e riduzione del sistema iperstatico ed equazione di lavoro

$$\delta_{10} = \int M_1 \cdot \frac{M_0}{E_c I} dx = \frac{1}{2} \cdot (+1) \cdot (-M_{p,GZ}) \cdot \frac{l}{E_c I} + 0 = -\frac{M_{p,GZ} \cdot l}{2 \cdot E_c I}$$

$$\delta_{11} = \int M_1 \cdot \frac{M_1}{E_c I} dx = \frac{1}{3} \cdot (+1)^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3}\right) l = \frac{5 \cdot l}{9 \cdot E_c I}$$

$$\delta_{10} + X_1 \cdot \delta_{11} = 0 \rightarrow X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{9}{10} M_{p,GZ}$$

Da cui è possibile derivare la deformazione  $w$  come segue:

$$w = \int \bar{M}_0 \cdot \frac{M_0}{E_c I} dx + X_1 \cdot \int \bar{M}_0 \cdot \frac{M_1}{E_c I} dx = \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{l}{4}\right) \cdot (-M_{p,GZ}) \cdot \frac{l}{E_c I} + \left(\frac{9}{10} M_{p,GZ}\right) \cdot \frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{l}{4}\right) \cdot (+1) \cdot \frac{l}{E_c I} =$$

$$\frac{M_{p,GZ} \cdot l^2}{E_c I} \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{9}{160}\right) = \frac{11 \cdot M_{p,GZ} \cdot l^2}{160 \cdot E_c I}$$

Il momento flettente costante  $M_{p,GZ}$  per una luce di 12 metri risulta dalla formula (3):

$$M_{p,GZ} = F_{p,\infty} * z = \sigma_{p,\infty} * A_f * z = 3 * 320 \frac{N}{mm^2} * 0.85 * 211.2 mm^2 * \sim 0.66m = 114 kNm$$

Inoltre, viene applicata e inserita nella formula una rigidezza a flessione per un calcestruzzo fessurato ( $E_c I_{gerissen} = E_c I / 3$ ).

$$w = \frac{11 * M_{p,GZ} * l^2}{160 * \left( \frac{E_c I}{3} \right)} = \frac{11 * 114 kNm * (12.00m)^2}{160 * \frac{647'000 kNm^2}{3}} = 5.2 mm$$

I tre re-bar inseriti per aumentare la sicurezza strutturale contribuiscono quindi a ridurre l'inflessione di circa 5 mm. La verifica risulta pertanto valida.

### Verifica delle zone di ancoraggio

Le resistenze alla flessione negative e positive sono state determinate con un software di analisi della sezione trasversale. Per calcolare la lunghezza di ancoraggio, la forza di trazione massima viene immediatamente ancorata tramite una sollecitazione composta di taglio di 1,5 N/mm<sup>2</sup>. La resistenza è ridotta con un coefficiente di sicurezza di 1,5. Quattro re-bar 10 sono utilizzati per il rinforzo negativo della resistenza alla flessione negativa. Ne deriva il seguente calcolo della lunghezza  $l_b$  necessaria della superficie di contatto:

$$F_{p,i}(\text{negative}) = 4 * \sigma_{p,i} * A_f = 4 * 520 \frac{N}{mm^2} * 89.9 mm^2 = 187 kN$$

$$F_{p,i} \leq \frac{l_b * 1.10m * 1.5 \frac{N}{mm^2}}{1.5} \rightarrow l_b = 170 mm$$

Il rinforzo è inserito in uno strato di intonaco sopra il calcestruzzo su tutta superficie. L'area di ancoraggio finale è proiettata in modo conservativo con una lunghezza di 300 mm.

In caso di rinforzo positivo della resistenza alla flessione, tre tondini re-bar 16 devono essere applicati alla parte inferiore della traversa (larghezza 30 cm). Anche la massima forza di trazione deve essere ancorata immediatamente.

$$F_{p,i}(\text{positive}) = 3 * \sigma_{p,i} * A_f = 3 * 520 \frac{N}{mm^2} * 211.2 mm^2 = 329.5 kN$$

$$F_{p,i} \leq \frac{l_b * 300mm * 1.5 \frac{N}{mm^2}}{1.5} \rightarrow l_b = 1'098 mm$$

Questo valore può anche essere ridotto con soluzioni speciali. Ad esempio, l'effetto di compressione per mezzo di tre profili a U re-bar qui indicato. La sollecitazione di taglio (nell'esempio 1,5 N/mm<sup>2</sup>) aumenta grazie alla forza verticale a doppio taglio del profilo a U precompresso (rilassamento della forza di pre-compressione 0,85/coefficiente di sicurezza 1,5).

$$F_{p,i} = 329.5kN \leq \frac{l_b * b * \left( 1.5 \frac{N}{mm^2} + \frac{3 * 2 * \sigma_{p,\infty} * A_f}{l_b * b} \right)}{1.5} =$$

$$\frac{l_b * 300mm * \left( 1.5 \frac{N}{mm^2} + \frac{3 * 2 * 0.85 * 350N / mm^2 * 89.9mm^2}{l_b * 300mm} \right)}{1.5} \rightarrow l_b = 742mm$$

Nel supporto sinistro A, vengono utilizzati tre profili a U re-bar 10, analoghi al rinforzo di taglio nel supporto centrale B. L'area di ancoraggio è rivestita con malta su una lunghezza di 750 mm.

### Schizzo schematico del rinforzo

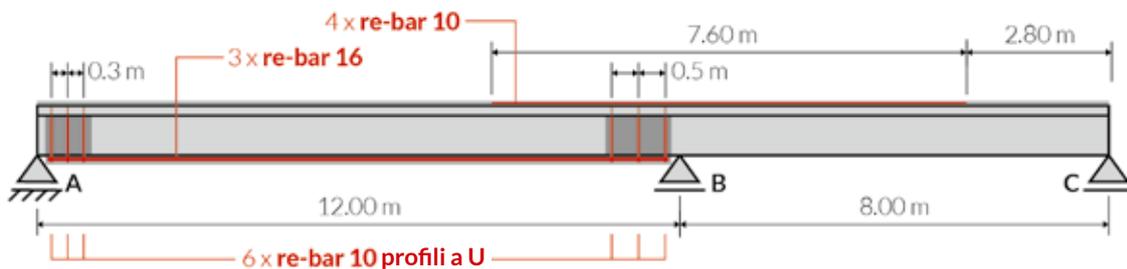


Figura 14: schema delle opere di rinforzo con armatura longitudinale e staffe re-bar

In forma convenzionale le estremità terminali dei rinforzi re-bar della resistenza alle flessione possono essere ottimizzate anche con staffe di spinta non tese (B500B)

**Troverete esempi di progettazione attuali e un tool di progettazione online all'indirizzo [www.re-fer.eu/it/dimensionamento/](http://www.re-fer.eu/it/dimensionamento/)**

### Referenze

- [1] Bruggeling, A.S.G., «Voorspanning zonder aanhechting, enkelstrengsystemen», 1976, TU Delft: Delft, Paesi Bassi

# La nostra ricerca a livello mondiale

## Partner di ricerca

Svizzera



Belgio



Germania



Austria



Repubblica Ceca



Grecia



Spagna



USA



USA



Canada



Australia



Corea del Sud



Cina



Iran



**Pubblicazioni, articoli tecnici, conferenze e verbali di prova in relazione con memory®-steel.**



[www.re-fer.eu](http://www.re-fer.eu)

## Download e brevetti

Sul sito web re-fer ([www.re-fer.eu](http://www.re-fer.eu)) è disponibile la documentazione più aggiornata. Nell'area download trovate le specifiche per le gare d'appalto, le schede tecniche dei prodotti e altri documenti. Presso la re-fer SA si possono ottenere ulteriori rapporti di ricerca.

### Specifiche per gare d'appalto

1. a) Rinforzo a flessione o a trazione con lamine d'acciaio re-plate 120/1.5 ancorate meccanicamente nel calcestruzzo (per carico di servizio, d'incendio e limite)  
b) Rinforzo a flessione con lamine in CFRP Sika®CarboDur® (per carico limite)
2. Rinforzo a flessione o a trazione con re-bar 10/16 in malta da riparazione, proiettata o colabile
3. Rinforzo a flessione o a trazione con re-bar 10/16 in scanalature fresate e malta SikaGrout
4. Rinforzo a taglio con profili a U re-bar 10/ancoraggi terminali di re-bar
5. Rinforzo a flessione o a trazione nella costruzione di gallerie in calcestruzzo proiettato
6. Rinforzo a flessione in calcestruzzo nuovo «trave locale rinforzata»
7. Rinforzo a flessione o a trazione con tondini d'acciaio re-bar R18 su costruzioni in acciaio

### Schede tecniche dei prodotti

- re-plate «lamina tirante esterna»
- re-bar «precompressione interna»
- re-bar R18 «tondino tirante esterno»

Download diretto da  
[www.re-fer.eu/it/downloads/](http://www.re-fer.eu/it/downloads/)



### Brevetti

I sistemi di precompressione memory®-steel sono stati brevettati da re-fer nei principali mercati di destinazione.

## Formazioni memory<sup>®</sup>-steel per ingegneri e progettisti

I nostri ingegneri re-fer offrono corsi di formazione memory<sup>®</sup>-steel (online o in loco) su vari argomenti:

**dimensionamento statico  
gare d'appalto  
esecuzione**

La formazione tramite videoconferenza dura 30 – 45 minuti secondo le necessità ed è possibile in qualsiasi momento. Contattateci via e-mail o tramite il modulo di contatto sul nostro sito web. Le consulenze sono disponibili in tedesco, francese e inglese.

Vi aiutiamo con piacere, anche telefonicamente o in videoconferenza, in caso di domande specifiche sul vostro oggetto.

Restiamo volentieri a vostra completa disposizione!



Dott. Julien Michels  
jmichels@re-fer.eu

A handwritten signature in red ink, consisting of a stylized, circular initial 'J' followed by a horizontal line.



Daniel Schmidig  
dschmidig@re-fer.eu

A handwritten signature in red ink, featuring a stylized 'D' and 'S'.



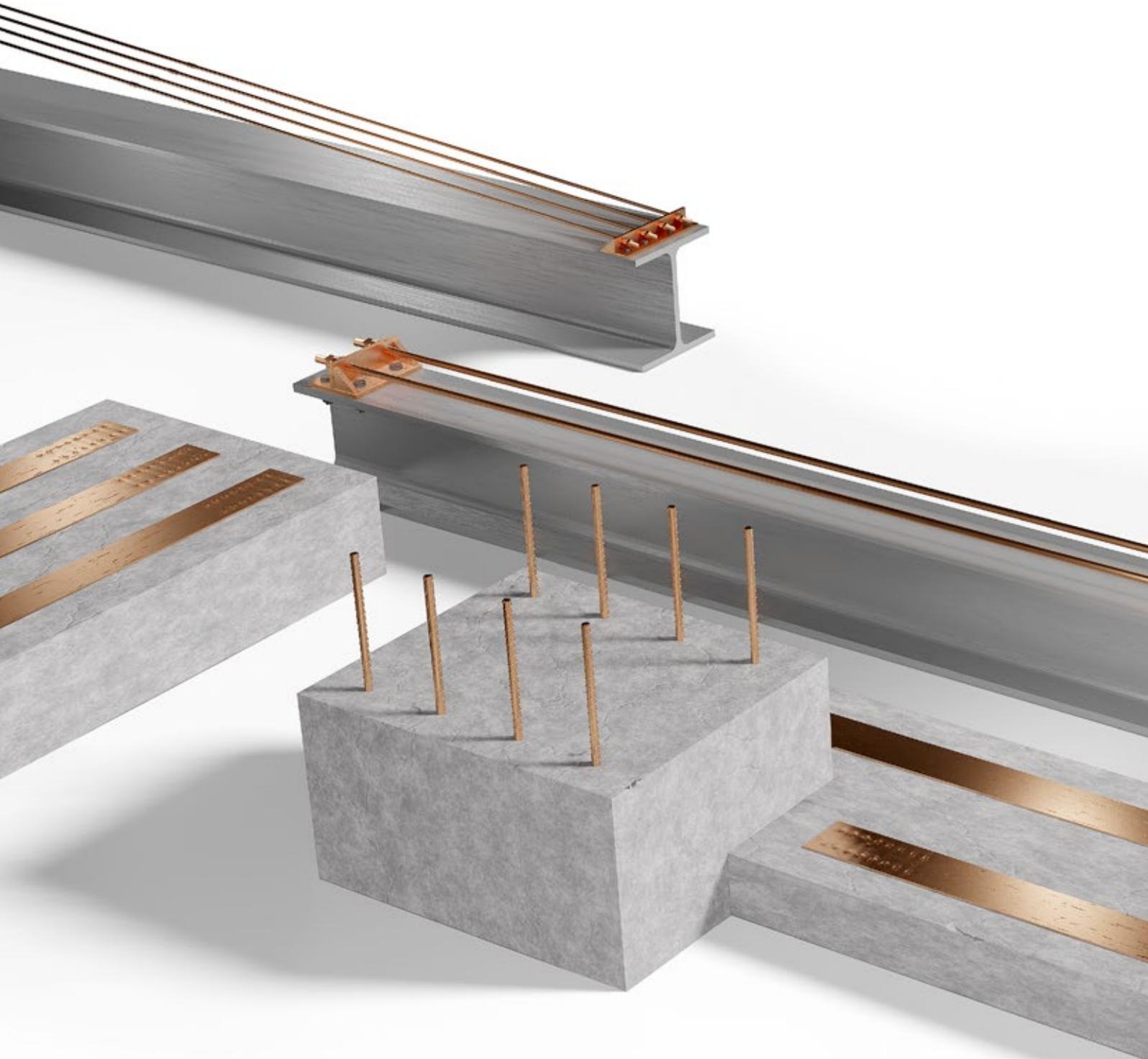
Dott. Bernhard Schranz  
bschranz@re-fer.eu

A handwritten signature in red ink, written in a cursive style.



strengthening solutions

A TRUSTED  
PARTNER OF



**Sede centrale Svizzera**

**re-fer AG**  
Riedmattli 9  
CH-6423 Seewen  
Phone +41 41 818 66 66

info@re-fer.eu  
www.re-fer.eu

