



# RINFORZO STRUTTURALE SISTEMI FRP SIKA®

BUILDING TRUST



# INDICE

## **03** 1. Introduzione

---

## **05** 2. Terminologie ricorrenti prodotti FRP

---

## **08** 3. L'inquadramento normativo

---

## **10** 4. Vantaggi e svantaggi degli FRP per interventi di rinforzo

---

## **12** 5. Regole basilari per la progettazione

5.1 Rinforzi a flessione

5.2 Rinforzi a taglio

5.3 Interventi di confinamento

---

## **18** 6. Regole generali per la buona riuscita di un intervento di rinforzo

---

## **20** 7. Esempi di applicazione dei sistemi SikaWrap® e Sika® CarboDur®

7.1 Portali

7.2 I nodi trave-pilastro

7.3 Rinforzo di travi da ponte ammalorate

7.4 Rinforzo di capriate

7.5 Rinforzo di travi in c.a.

7.6 Rinforzo di elementi in legno

7.7 Rinforzo di strutture in muratura

---

## **25** 8. Prodotti SikaWrap® e Sika® CarboDur® per il rinforzo di strutture

8.1 Tessuti

8.2 Lamine

8.3 Reti

8.4 Adesivi ed accessori

8.5 Barre

---

# 1. INTRODUZIONE

Forte di una vasta esperienza, sia in termini di realizzazioni, che in termini di ricerca, Sika offre un approccio integrato ad ogni specifico problema strutturale, offrendo al progettista una ampia gamma di soluzioni comprendenti sistemi FRP, manuali tecnici completi ed un servizio di consulenza progettuale affidato sia a professionisti della tecnologia che a consulenti esterni.

L'obiettivo è quello di formare ed informare ogni tecnico e di renderlo capace e cosciente perché possa risolvere nel migliore dei modi il problema strutturale cui deve far fronte. Per questo motivo il lettore di questa documentazione troverà sia spunti tecnici interessanti, sia considerazioni critiche riguardanti le reali potenzialità e le possibili problematiche che ogni tecnica può celare. Tutte le considerazioni che si riportano in questo documento sono, pertanto, basate su esperienze sperimentali e di cantiere.

**Le principali tipologie di rinforzi usualmente utilizzate in edilizia sono:**

- a) tessuti unidirezionali e quadriassiali in fibra di carbonio ad alto modulo e alta resistenza:** l'adesione al supporto è perfetta, purché si sia eseguita una corretta preparazione del supporto stesso. Questo sistema ottimizza al massimo il quantitativo di fibra presente sulla struttura ed è altamente versatile per conseguire rinforzi in più direzioni.
- b) lamine pultrose in fibra di carbonio:** il prodotto è pensato per la rapida messa in opera del rinforzo.

**c) reti bidirezionali in fibra di carbonio e fibra di vetro:** sono applicabili con resine epossidiche o con malte cementizie.

**d) connettori:** sono corde in filo di carbonio o vetro ad elevata resistenza per connessioni strutturali.

**e) barre in fibra di carbonio o fibra di vetro:** specificatamente orientate alla durabilità del prodotto e alla riduzione dei problemi di protezione al fuoco. La matrice scelta garantisce un'elevata temperatura di transizione vetrosa Tg e quindi una spiccata resistenza alle alte temperature. Le fibre scelte sono quelle in carbonio ad alta resistenza, in carbonio ad alto modulo elastico e fibre in vetro ad alta resistenza. Il sistema così composto può essere abbinato ai ripristini dei conglomerati con malte SikaEmaco®, eliminando completamente la presenza di resine.

Per la corretta messa in opera dei sistemi sono impiegati anche le seguenti matrici organiche:

- promotori di adesione e impregnanti a basi poliammidiche
- adesivi epossidici non a solventi e bicomponenti, fluidi e tixotropici

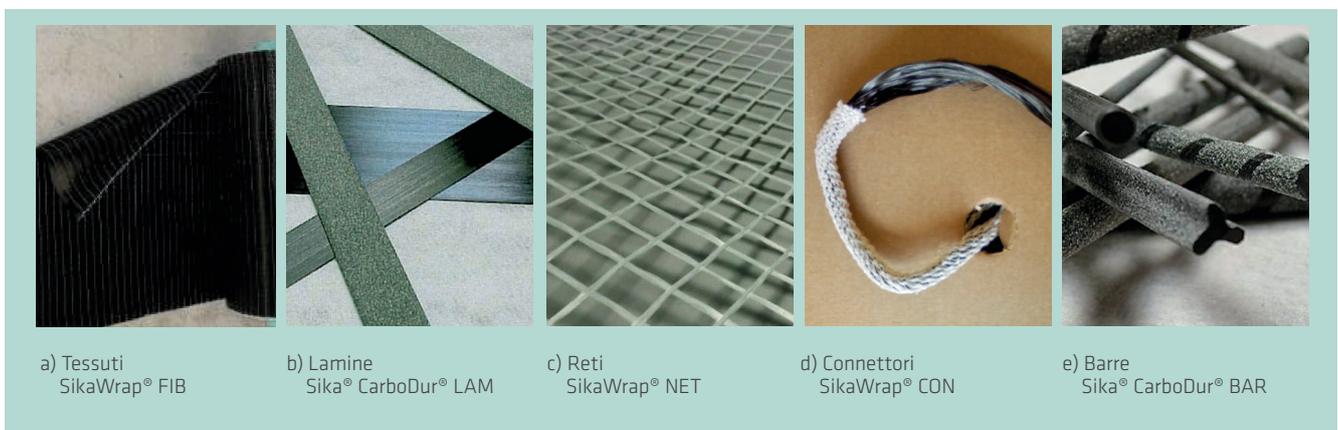


FIG. 1.1 - Le principali tipologie di prodotti FRP

Per loro specifica natura i prodotti FRP (Fiber Reinforced Polymer) sono anisotropi e tendenzialmente elastici lineari in trazione fino a rottura. Contrariamente all'acciaio NON esiste duttilità, isotropia e plasticità.

Questo significa che:

- 1) la resistenza a compressione dell'FRP è molto modesta; se una fibra è tagliata o forata in un punto si perde il suo contributo alla resistenza per tutta la sua lunghezza;
- 2) non esiste trasferimento tensionale tra una fibra posta in direzione longitudinale ed un'altra posta nella direzione trasversale;
- 3) tutti i prodotti FRP non possono essere saldati: il collegamento tra uno strato e l'altro avviene esclusivamente per mezzo di una resina;
- 4) tutti i prodotti FRP, tranne i tessuti prima di essere impregnati, non si possono piegare in cantiere perché vi è il rischio della rottura fragile nel tempo.

**I sistemi SikaWrap® e Sika® CarboDur® si impiegano per il rinforzo di strutture in calcestruzzo armato e muratura con le principali tipologie di intervento:**

- **incollaggio di tessuti, lamine** sulla faccia tesa di elementi inflessi;
- **incollaggio di tessuti** per interventi di confinamento su pilastri;
- **incollaggio di tessuti o reti** per il rinforzo di elementi in muratura quali maschi, pilastri o volte;
- **inserimento di barre** nella faccia tesa di elementi inflessi previa formazione di tasche nel calcestruzzo sano o di ringrossi e/o di ripristini del copriferro.



FIG. 1.2 - Prove di trazione su tessuto SikaWrap® FIB

Appurato che l'intervento di rinforzo non avviene solo su elementi strutturali integri, ma che risulta molto più frequente l'intervento su strutture esistenti degradate, è molto importante l'accoppiamento del sistema di rinforzo FRP con malte di ripristino aventi particolari caratteristiche di adesione al supporto, stabilità dimensionale, elevata energia di frattura di interfaccia, moduli elastici compatibili con l'esistente. Il sistema di rinforzo SikaWrap® e Sika® CarboDur®, quindi, è integrato anche da una serie di prodotti cementizi o a base di pura calce per il ripristino strutturale noti con il nome di SikaEmaco®.

#### **SikaWrap® E Sika® CarboDur® SONO PRODOTTI IN CONTROLLO DI QUALITÀ**

Il sistema FRP Sika® si inquadra ai sensi del CNR-DT 200 R1/2013 e della Linea Guida 2019 per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di composti fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti, perché:

- fornisce schede tecniche chiare con tutti i parametri di riferimento necessari, già riferiti al prodotto finito pronto per essere installato;
- provvede al controllo delle predette proprietà meccaniche per ogni lotto di produzione e fornisce le relative certificazioni;
- ha svolto e svolge ricerche nazionali ed internazionali sull'argomento;
- dispone di una vasta gamma di prove sperimentali comparative che ne attestano la rispondenza normativa e l'affidabilità dei metodi di calcolo.

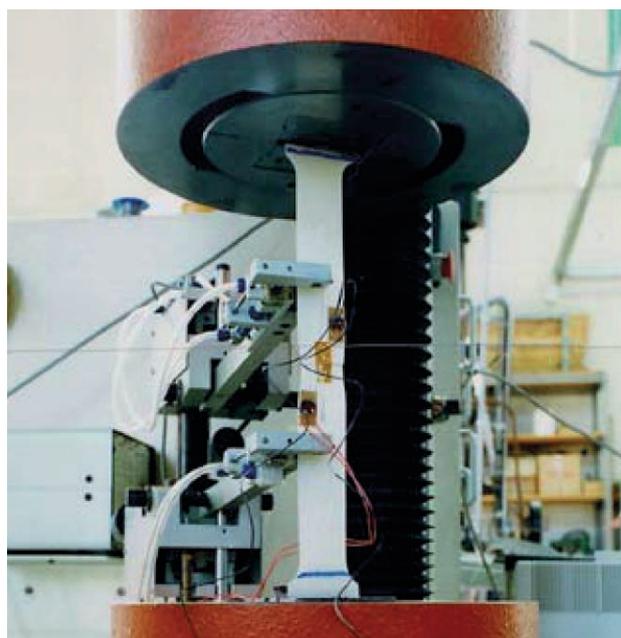


FIG. 1.3 - Prova di trazione sull'adesivo Sikadur® SAT 4500

## 2. TERMINOLOGIE RICORRENTI PRODOTTI FRP

Per il corretto impiego della tecnologia, è quanto mai indispensabile la chiarezza dei termini relativi ai prodotti FRP. Vediamoli in dettaglio.

### TESSUTI - SikaWrap® FIB

- **Direzione di riferimento:** si intende la direzione di stesa delle fibre nel tessuto.
- **Fibra secca:** si intende il singolo filamento fibroso prodotto nella filiera, protetto da appretto protettivo, avvolto in bobine pronto per le successive lavorazioni: tessitura, pultrusione, laminazione, ecc.
- **Filato / tessuto:** è assolutamente necessario fornire al progettista la resistenza a trazione del prodotto finito "tessuto" riferito al prodotto larghezza x spessore di fibra secca. Non è utile, anzi solo fuorviante, conoscere le prestazioni meccaniche del singolo filo (o filamento) sia perché l'operazione di tessitura induce una riduzione delle proprietà meccaniche, sia perché l'effetto dimensionale è esaltato su questi prodotti. Le schede tecniche dei prodotti riportano tutti i valori utili al progettista.
- **Tessuto unidirezionale:** è un tessuto fibroso in cui le fibre sono tutte poste in una sola direzione.
- **Tessuto bidirezionale:** è un tessuto fibroso in cui le fibre sono poste in maniera perpendicolare le une alle altre.
- **Tessuto quadriassiale:** è un tessuto fibroso in cui le fibre sono suddivise in 4 direzioni differenti ortogonali a due a due.
- **Grammatura di riferimento:** è la quantità, espressa in grammi per metro quadrato, di fibre per ciascuna direzione di riferimento.
- **Spessore equivalente del tessuto secco:** si intende lo spessore equivalente di fibra secca posto nella direzione di riferimento. Per i tessuti unidirezionali esiste un solo spessore equivalente di riferimento, per un tessuto bidirezionale devono essere indicati due spessori di riferimento, uno per ciascuna delle direzioni di stesa delle fibre e così via. Lo spessore di riferimento è ottenuto come rapporto tra la grammatura ed il peso specifico della fibra impiegata nella direzione considerata.
- **Lunghezza minima di sovrapposizione:** è la minima lunghezza di sovrapposizione delle fibre che assicuri il pieno trasferimento tensionale, in altri termini la minima lunghezza di sovrapposizione oltre la quale la rottura per trazione del provino è esterna alla zona sovrapposta.



FIG. 2.1 - I tessuti SikaWrap® FIB sono venduti in rotoli da 50 m, tagliabili a misura con forbice



FIG. 2.2 - Esempio applicativo di SikaWrap® FIB

## LAMINE PULTRUSE - Sika® CarboDur®

■ **Spessore nominale:** si intende lo spessore del piatto già indurito al netto del rivestimento superficiale (coating) e dell'eventuale sabbiatura. Esso è ottenuto per misura diretta durante il processo di pultrusione e prima delle lavorazioni di irruvidimento della superficie.

## BARRE - Sika® CarboDur® BAR

■ **Diametro nominale:** si intende il diametro della barra al netto del rivestimento protettivo (coating) e della sabbiatura superficiale, viene misurata durante il processo di pultrusione, prima delle lavorazioni di irruvidimento della superficie.

## TERMINOLOGIE RICORRENTI PER IL CONTROLLO QUALITÀ

È quanto mai utile saper leggere bene le certificazioni dei prodotti:



FIG. 2.3 - Esempio applicativo di Sika® CarboDur® LAM

■ **Resistenza minima a trazione del prodotto:** è il valore minimo ottenuto nelle prove sperimentali. Vista l'elevata dispersione dei risultati non è vero che il valore minimo è minore del valore caratteristico.

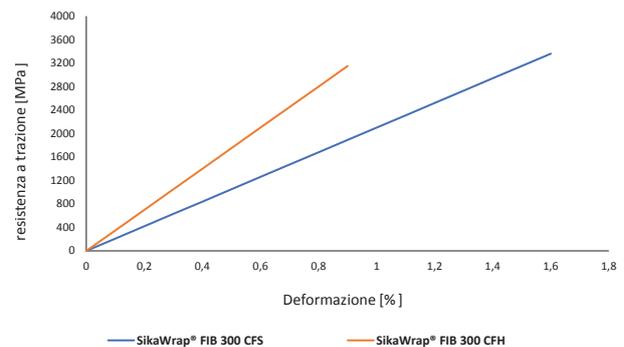
■ **Valore caratteristico  $f_{tk}$  utile al progetto  $f_{tk}$ :** si intende il frattile del 90% ottenuto con almeno 5 prove sperimentali di trazione su campioni appartenente allo stesso lotto di produzione. Attualmente i valori di calcolo dei sistemi FRP (tessuti e lamine) discendono dalla classe individuata dai relativi Certificati di Valutazione Tecnica (C.V.T.).

■ **Effetto dimensionale dei provini:** la caratterizzazione sperimentale deve essere eseguita sul prodotto impiegato senza alcuna modifica di sezione o forma. In caso contrario si può generare l'effetto dimensionale, cioè si ottiene una resistenza maggiore di quella reale. È noto dalla letteratura che un provino di tessuto di piccola larghezza ed elevato numero di strati permette di ottenere una resistenza maggiore di quella ottenibile su un provino di tessuto di uno strato di larghezza elevata. La resistenza sperimentale ottenibile da lamine di 100 mm di larghezza è minore di quella ottenibile da lamine di 50 o di 30 mm di larghezza.

■ **Modulo elastico:** è la pendenza "best-fit" del diagramma s-e in trazione nel tratto tra 0.1 e 0.4  $f_{tk}$  per ciascuna direzione di stesa delle fibre. Se il prodotto è di buona qualità il diagramma s-e è perfettamente lineare.

■ **Temperatura di transizione vetrosa:** la temperatura oltre la quale si manifesta una repentina riduzione delle proprietà meccaniche del polimero.

■ **Adesione per trazione:** la prova di pull-out di un apposito elemento di acciaio fornisce la resistenza per trazione dell'interfaccia più debole. Le interfacce sono essenzialmente tre: tra filamenti e matrice (delaminazione interna del prodotto FRP), tra polimero e malta di ripristino (delaminazione del rinforzo), tra malta di ripristino e supporto in calcestruzzo (delaminazione del riporto). Se la crisi avviene nel calcestruzzo di supporto si è ottenuto il miglior risultato possibile.



2.4 La stima del modulo elastico in trazione



FIG. 2.5 - Esecuzione di prova pull-out



FIG. 2.6 - La prova di pull-out, l'impregnazione manuale non è corretta se il tessuto ha una grammatura elevata



FIG. 2.7 - Le elevate grammature formano gruppi filamenti al cui interno l'adesivo non arriva

■ **Impregnazione manuale:** i tessuti di carbonio si impregnano in situ con un'apposita resina epossidica. L'impregnazione manuale è difficoltosa per tessuti aventi grammatura elevata (>600 gr/mq), la resina non penetra perfettamente tra i filamenti con il risultato di una ridotta capacità di trasferimento degli sforzi.

Può accadere che particolari modalità di tessitura permettano di ottenere un risultato di prova di adesione positivo visto che la resina riesce a passare attraverso i gruppi di filamenti dall'esterno all'interno (ad esempio su tessuti a grammatura maggiore di 600 gr/mq spesso si trovano filamenti raggruppati tra loro e non omogeneamente distribuiti).

Questa impregnazione però non garantisce un lavoro a regola d'arte, visto che, come si nota in figura 2.6 la resina non impregna tutti i filamenti di fibra, con la conseguenza che i filamenti non impregnati non interverranno mai nel rinforzo, facendolo quindi risultare inefficace.

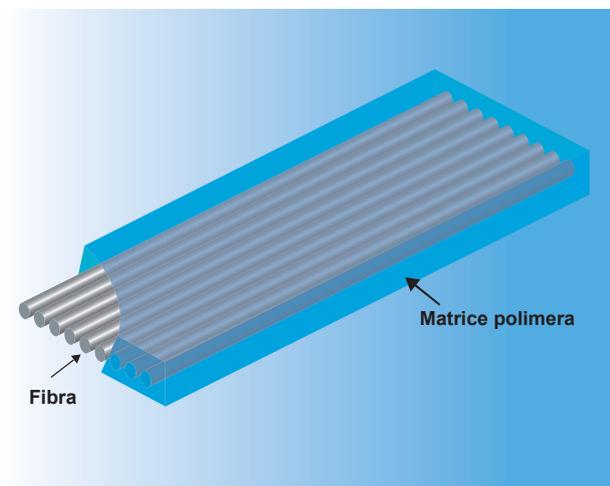


FIG. 2.8 - Schema di composizione di un FRP



FIG. 2.9 - Esempio applicativo di SikaWrap® FIB

# 3. L'INQUADRAMENTO NORMATIVO

Sebbene i prodotti FRP possano essere anche impiegati per la realizzazione di nuove strutture in c.a., il campo principale di impiego è sicuramente quello della riparazione e del rinforzo di elementi strutturali esistenti.

In questo ambito l'FRP rappresenta un miglioramento di tecniche esistenti quali:

- **il placcaggio** con piatti di acciaio di strutture inflesse: la sostituzione dei piatti di acciaio (pesanti, soggetti a rapida corrosione e necessariamente da bullonare alla struttura) con fogli di tessuto FRP è sicuramente un avanzamento tecnologico, in quanto si elimina il problema della corrosione, si semplificano le operazioni di posa, si riducono i tempi di intervento, non si modificano le dimensioni dell'elemento rinforzato;
- **l'incamicatura** con profilati metallici dei pilastri per l'incremento della resistenza a compressione: anche in questo caso l'invasività dell'intervento con FRP risulta essere molto minore, tutto resta nascosto, molto più rapida l'applicazione;
- **il ringrosso** con apporto di armatura a taglio e a flessione: questa soluzione tecnica molto comune persegue l'incremento della portanza mediante apporto consistente di materiale resistente a compressione (malte o betoncini cementizi) ed armatura metallica: barre e staffe, che aumentano la resistenza a flessione e a taglio.

Tutte le tipologie di rinforzo con FRP sopra indicate sono dimostrate dalle numerose ricerche sperimentali che si sono

prodotte a livello internazionale dagli anni 90 fino ad oggi.

Sul piano della progettazione, invece, la questione è molto più complessa.

Con le ultime normative e Linee Guida i materiali FRP trovano riconoscimento di legge per applicazioni di ripristino / rinforzo di strutture esistenti in muratura o in c.a.

Le regole di progettazione che si possono adottare sono quelle contenute nel CNR-DT 200 R1/2013. Per interventi in campo sismico l'uso di idonei materiali compositi nel rinforzo sismico di elementi in c.a. è finalizzato a conseguire i seguenti obiettivi:

- aumento della resistenza a taglio di pilastri, travi, nodi trave-pilastro e pareti mediante applicazione di fasce con le fibre disposte secondo la direzione delle staffe;
- aumento della resistenza nelle parti terminali di travi e pilastri mediante applicazione di fasce con le fibre disposte secondo la direzione delle barre longitudinali ed opportunamente ancorate, purchè si garantisca l'efficacia dell'ancoraggio nel tempo;
- aumento della duttilità degli elementi monodimensionali, per effetto dell'azione di confinamento passivo esercitata dalle fasce con le fibre disposte secondo la direzione delle staffe.

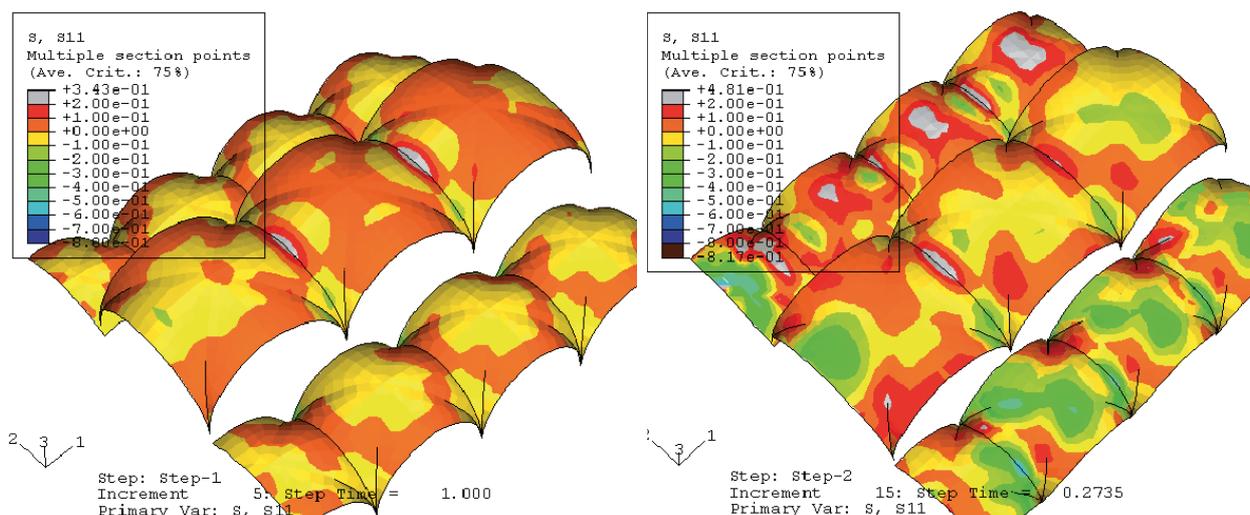


FIG. 3.1 - Esempio di modellazione di strutture rinforzare con SikaWrap® FIB

### CERTIFICATO DI VALUTAZIONE TECNICA

Le indicazioni per la qualificazione dei sistemi e per la loro accettazione in cantiere sono invece riportate nella **“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”**, emanata dal CS.LL.PP., nella sua prima versione, con il DPCS LL.PP. n. 220 del 9.7.2015 e aggiornata con il DPCS LL.PP. n. 293 del 29.5.2019 nell’ottica di una sempre migliore garanzia della qualità e sicurezza delle opere e delle infrastrutture, sia pubbliche che private, della prevenzione del rischio sismico e della valutazione e messa in sicurezza del patrimonio costruito esistente.

La suddetta Linea Guida è indirizzata principalmente ai Produttori di tali sistemi, che devono provare la validità delle soluzioni da loro proposte, e ai Direttori dei Lavori, che hanno la responsabilità di controllare e accettare il materiale in cantiere.

### I SISTEMI CERTIFICATI

Sulla base di tale Linea Guida, il Servizio Tecnico Centrale (STC) del C.S.LL.PP. rilascia ai Produttori un Certificato di Valutazione Tecnica (CVT) (ex CIT NTC 2008) per i sistemi di rinforzo FRP richiesti.

I sistemi FRP di Sika che hanno ottenuto il Certificato di Valutazione Tecnica sono i seguenti:

#### Sistemi di rinforzo realizzati in situ:

- SikaWrap® FIB 230 CFS
- SikaWrap® FIB 300 CFS
- SikaWrap® FIB 300 CFH
- SikaWrap® FIB 400 CFS
- SikaWrap® FIB 600 CFS
- SikaWrap® FIB 380 4D

#### Sistemi di rinforzo preformati:

- Sika® CarboDur® LAM CFS
- Sika® CarboDur® LAM CFH

FIG. 3.2 - Esempio di applicazione di rinforzo con SikaWrap® FIB



# 4. VANTAGGI E SVANTAGGI DEGLI FRP PER INTERVENTI DI RINFORZO

Il successo dei materiali FRP deriva essenzialmente da tre proprietà: la maggiore durabilità del materiale rispetto agli acciai tradizionali, la leggerezza, la facilità di impiego e la possibilità di ottimizzare le proprietà meccaniche del materiale per lo scopo specifico dell'intervento.

I prodotti disponibili sono basati principalmente su filati in carbonio e vetro. Esiste, infatti, una notevole differenza tra fibre di carbonio e di vetro, in particolare per quanto riguarda:

- le proprietà meccaniche di resistenza e modulo elastico a trazione;
- la durabilità all'esposizione ambientale;
- il fenomeno del rilassamento o creep.

Prima di tutto è necessario ricordare che le fibre prima citate non individuano un solo prodotto; così come per l'acciaio, anche tra le fibre di vetro e tra le fibre di carbonio esistono differenti qualità. Variazioni, anche modeste, della temperatura nel processo di produzione dei filamenti di carbonio, ad esempio, comportano l'ottenimento di differenti resistenze e moduli elastici. La resistenza media della famiglia dei filamenti di carbonio varia da 1900 MPa a 4900 MPa, al contempo i moduli elastici variano da 230 GPa a 640 GPa.

I filamenti di carbonio, pertanto, possiedono rigidezze e resistenze maggiori degli acciai da costruzione.

Sono indicati per tutti gli interventi di rinforzo a flessione e a taglio, in special modo dove esistono fatica o elevati stati tensionali permanenti.

Allo stesso modo variazioni nella percentuale relativa delle materie prime comportano l'ottenimento di filati di vetro più o meno sensibili all'ambiente alcalino, più o meno sensibili ai fenomeni di creep e rilassamento.

Anche la composizione degli appretti protettivi, che sono applicati sui filamenti subito dopo la loro produzione, esaltano doti di "filabilità", oppure la "impregnabilità" e così via.

La resistenza media della famiglia dei filamenti di vetro varia da 2500 a 3500 MPa, mentre il modulo elastico a trazione varia da 60 a 80 GPa. I filamenti di vetro, pertanto, pur possedendo resistenze superiori all'acciaio, hanno bassi moduli elastici. Questi materiali, come sarà meglio precisato nel seguito, sono indicati per interventi di fasciatura, di contenimento dello stato fessurativo e in tutte quelle applicazioni dove il regime tensionale permanente è modesto. Per quanto riguarda la durabilità, è risaputo che i filamenti più comuni di fibra di vetro, individuati dalla sigla E-Glass, si sciolgono in ambiente alcalino. Il calcestruzzo è, pertanto, potenzialmente molto pericoloso per i filamenti di vetro qualora si venissero a trovare scoperti dal loro appretto e dal polimero di impregnazione.



FIG. 4.1 - Esempio di rinforzo di solaio con Sika® CarboDur® LAM

Per ovviare parzialmente a questo problema, fu inventata una formulazione di vetro AR-Glass dotata di una resistenza all'ambiente alcalino maggiore.

È risaputo, inoltre, che i filamenti di carbonio conducono elettricità, mentre le fibre di vetro sono isolanti.

In funzione poi dell'aggressività dell'ambiente cui è posta l'opera da rinforzare e del regime tensionale permanente sulle fibre, tutte le raccomandazioni internazionali reperibili introducono coefficienti riduttivi delle resistenze caratteristiche, al fine di pervenire ad una "resistenza ultima di progetto" da impiegarsi nei calcoli: il coefficiente riduttivo ambientale varia da 0.95 a 0.7, in funzione dell'ambiente poco o molto aggressivo, ed il coefficiente riduttivo per sollecitazioni permanenti, varia da 0.55 (carbonio) a 0.3 (vetro) per tener conto dei fenomeni di rilassamento e creep.

Come per le fibre, anche il mondo dei polimeri e delle resine è molto vasto. Vi sono tantissime formulazioni differenti con annesse differenti proprietà meccaniche.

Non esiste una precisa normativa che classifica i polimeri per le applicazioni nel settore delle costruzioni, né è pensabile di identificare una formulazione ottima, che risolva, cioè, tutti i problemi specifici dell'ingegneria delle costruzioni: durabilità, resistenza al calore, propagazione della fiamma, elevata adesione, elevata resistenza al taglio, elevata impregnabilità ecc.

Sika offre una completa gamma di polimeri e resine al fine di ottimizzare prestazioni e facilità di posa.

FIG. 4.2 - Esempio di applicazione di rinforzo di struttura in cemento armato con SikaWrap® FIB



# 5. REGOLE BASILARI PER LA PROGETTAZIONE

## 5.1 RINFORZI A FLESSIONE

Le raccomandazioni italiane, ed i test di verifica compiuti da Sika, provano che il modello di calcolo che si deve adottare nel progetto deve basarsi sulle seguenti ipotesi:

- le sezioni rimangono piane durante la deformazione;
- il calcestruzzo ha legame parabola-discendente come Fig. 5.1.1.a), dove la massima tensione di compressione è  $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C$  alla deformazione dello 0.0035;
- l'acciaio è considerato elasto-plastico vedi Fig. 5.1.1.b);
- Il sistema FRP Sika® è conforme ai sensi del CNR-DT 200 R1/2013, avente cioè controllo di qualità su lotto di produzione e schede tecniche adeguate ai requisiti richiesti dal CNR-DT 200 R1/2013. Il legame costitutivo è riportato in Fig. 5.1.1 c);
- Il sistema FRP assorbe solo forze assiali nella direzione delle fibre, l'effetto flessionale è trascurabile se lo spessore complessivo del rinforzo è molto piccolo rispetto all'altezza della trave.

Nel calcolo di progetto o di verifica, perciò, si dovranno eseguire quattro analisi:

- a) valutare le tensioni iniziali nel conglomerato e nell'acciaio al momento dell'esecuzione del rinforzo e la deformazione  $\epsilon_{f0}$ . Perché sia valida la sovrapposizione degli effetti, la sollecitazione esterna flessionale iniziale deve produrre una tensione di compressione sul cls  $< 0.45 f_{ck}$  e una tensione di trazione sull'armature  $< 0.8 f_{yk}$ . Se questa situazione NON è verificata si deve scaricare o puntellare la trave;
- b) determinare il momento resistente ultimo  $M_{Ru}$  tenendo conto dei fattori di sicurezza da applicare sulla resistenza a trazione caratteristica. Se  $M_{Ru}$  è maggiore delle sollecitazioni esterne si procede al passo seguente;
- c) determinare il momento resistente di servizio  $M_{Rs}$  e verificare che il calcestruzzo possieda tensione compressiva di compressione  $< 0.45 f_{ck}$  e l'acciaio possieda tensione compressiva  $< 0.8 f_{yk}$ ; Se  $M_{Rs}$  è maggiore delle sollecitazioni esterne si può passare allo step successivo.
- d) in quest'ultimo step si tratta di verificare che la freccia della

trave sia compatibile con la tipologia della struttura in esame e che l'ampiezza dei crack al carico di servizio siano contenute entro limiti usuali o "coperti" dal rinforzo in fibra di carbonio. In effetti l'inerzia della trave rinforzata non si modifica sostanzialmente, mentre aumentano i carichi esterni che vengono sostenuti dalla stessa.

Le seguenti relazioni, allora, legano le deformazioni della fibra quella del calcestruzzo e a quella dell'acciaio, vedi Fig. 5.1.2:

$$\epsilon'_s = \frac{\epsilon_c (x - d_1)}{x} \quad \epsilon_s = \frac{\epsilon_c (d - x)}{x} \quad \epsilon_f = \frac{\epsilon_c (d + d_2 - x)}{x}$$

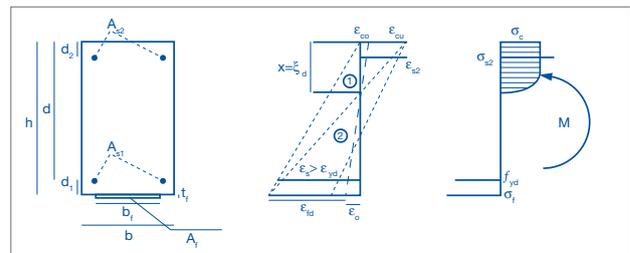


FIG. 5.1.2 - Schema di funzionamento della sezione resistente

La raccomandazione CNR-DT 200 R1/2013 si fonda sulle assunzioni di perfetta aderenza fibra - supporto e di conservazione delle sezioni piane.

L'aderenza perfetta è conservata fino ad un valore di tensione superato il quale si può produrre la delaminazione dal supporto: il distacco del rinforzo FRP si può manifestare all'estremità (delaminazione di estremità) o in prossimità di una qualsiasi fessura flessionale (delaminazione intermedia).

Quando il rinforzo si delamina la trave crolla perché viene a mancare una parte della sua resistenza.

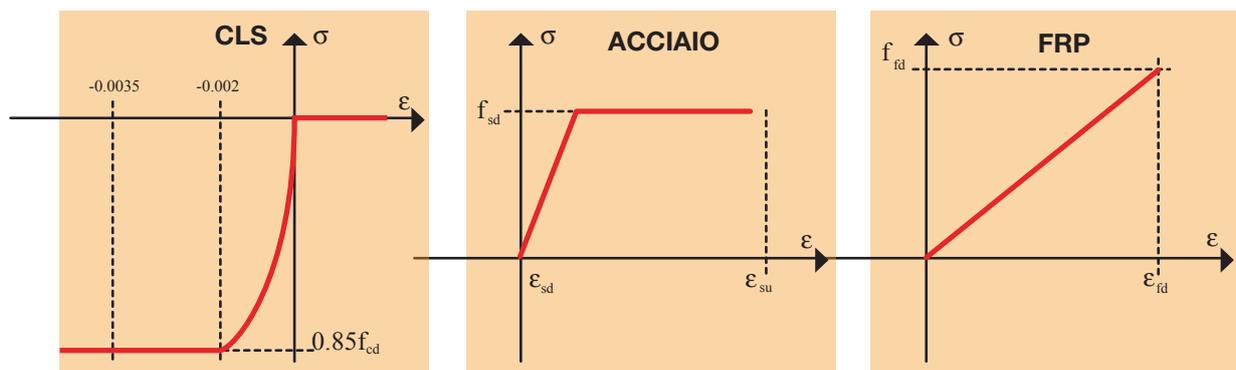


FIG. 5.1.1 - Legami costitutivi per calcestruzzo, acciaio e FRP (linea SikaWrap® e Sika® CarboDur®)

Acciaio e fibra FRP, quindi, partecipano all'assorbimento della forza di trazione, il primo materiale ha un campo plastico molto esteso, il secondo materiale è elasto-fragile, non ha plasticità né isotropia, reagisce solamente alla trazione nella direzione dei filamenti.

Sebbene una gran quantità di studi abbiano riguardato l'incollaggio di lamiere e tessuti su travi in c.a. nuove (vedi schema di Fig. 5.1.3.A) e a questi tipi di elementi strutturali si rivolge il CNR-DT 200 R1/2013, il maggior campo di applicazione per questa tecnologia è il rinforzo di una trave in esercizio, magari degradata, con armature interne corrose, con calcestruzzo di bassa qualità ecc., praticamente tutte quelle situazioni reali in cui per un motivo o per un altro si deve svolgere un intervento di riparazione e/o di rinforzo.

Sono quindi apparse ricerche sperimentali su tre tipologie di rinforzo che sono illustrate in Fig. 5.1.3, 5.1.3 C, 5.1.3 D:

- incollaggio di tessuti o lamine nella zona tesa di travi il cui copriferro doveva prima essere sostituito;

- inserimento di barre o lamine nel copriferro durante la sua sostituzione;
- inserimento di barre o lamine in tasche di 3x3 cm circa, realizzate (evidentemente su calcestruzzo di buona qualità) con bilama.

Le ragioni della ricostruzione preliminare del copriferro sono ben note, ma la comparsa di due superfici di contatto (contatto tra calcestruzzo originario e malta di ripristino e contatto tra malta di ripristino e materiale di rinforzo), complica il problema della buona riuscita dell'intervento: sono due infatti le superfici di scorrimento, senza una "buona adesione" tra le interfacce tutto l'intervento è operato inutilmente.

Un altro aspetto molto importante, sebbene spesso trascurato, è la garanzia della risposta elastica per quelle combinazioni di carico che si possono considerare frequenti o permanenti (combinazioni di carico di servizio).

È abbastanza ovvio che l'aumento della resistenza, dovuto alla fibra, si ottenga insieme allo snervamento delle armature di acciaio e alla comparsa di un esteso quadro fessurativo.

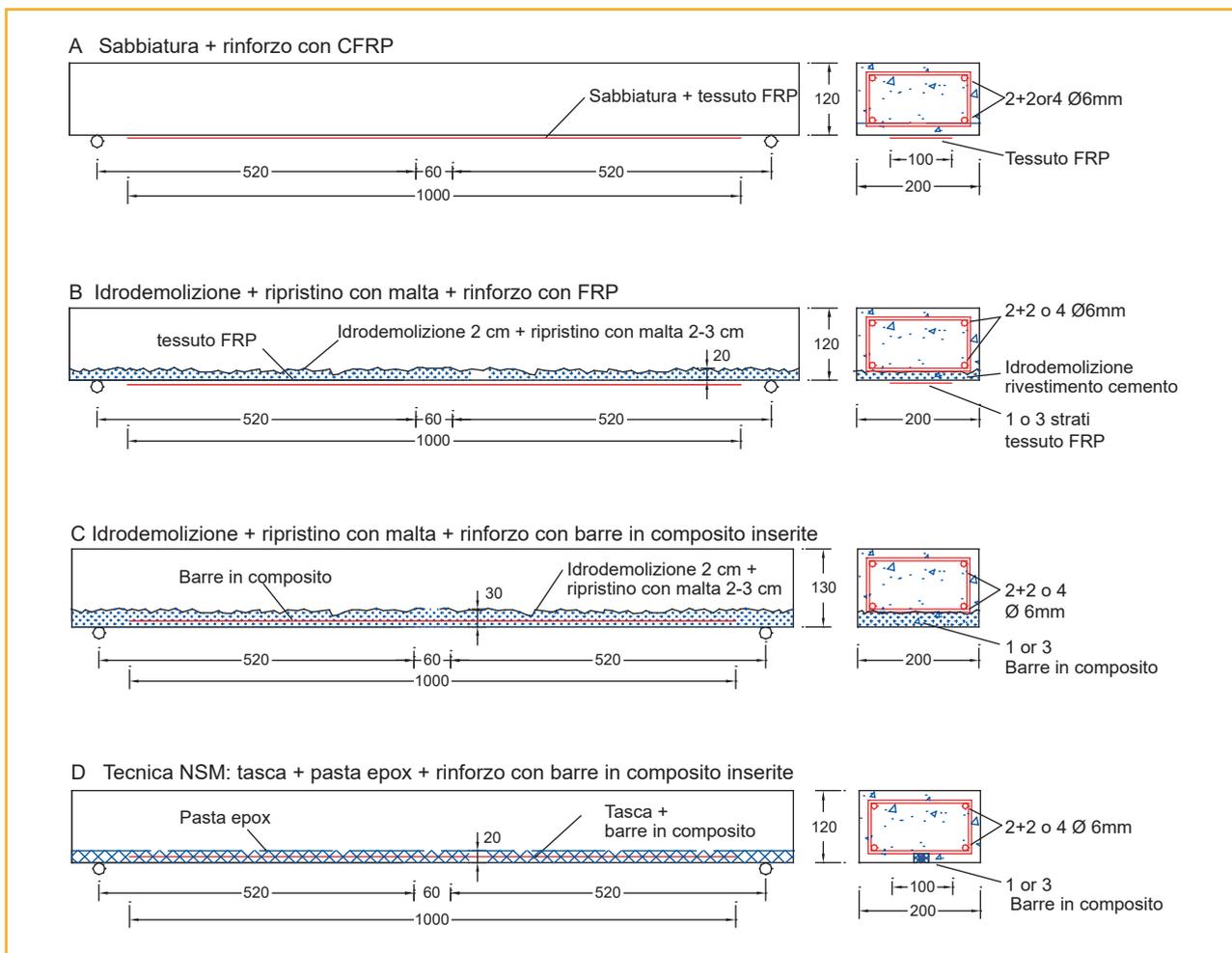


FIG. 5.1.3 - I principali metodi di rinforzo a flessione

Nella normativa CNR-DT 200 R1/2013 vi sono 3 importanti parametri che il Produttore del "sistema di rinforzo" è tenuto a certificare e mostrare nella scheda tecnica:

1. la resistenza caratteristica a trazione  $f_{fk}$
2. lo spessore nominale del rinforzo  $t_f$
3. l'energia di frattura dell'interfaccia più debole  $\gamma$

In sintesi la risposta in flessione di una trave è quindi legata ai seguenti parametri:

- **tipo di conglomerato esistente:** un calcestruzzo poroso di ridotte capacità meccaniche non potrà garantire la stessa tenuta di interfaccia di un conglomerato prefabbricato e/o precompresso; altresì, però, si ricorda che la preparazione della superficie di un conglomerato prefabbricato sarà molto più difficile rispetto ad uno gettato in opera;
- **quantità di armatura interna:** se una trave è progettata per raggiungere la crisi lato acciaio avrà una percentuale di armatura molto modesta, al contrario esistono strutture che sono progettate per raggiungere la crisi nella zona compressa con una quantità di armatura interna molto elevata;
- **tipo di sollecitazione:** il rinforzo in zona tesa è, spesso, applicato su una trave già caricata. Questa problematica è molto attuale per le infrastrutture viarie, in quanto tutto il carico permanente ed una buona quota parte dell'accidentale sono già presenti al momento del rinforzo; il risultato è che la stagionatura della malta di ripristino del copriferro e il successivo incollaggio del rinforzo avvengono in regime dinamico (traffico aperto) e restano attivi solo per l'incremento di carico;
- **tipo di ambiente:** in presenza di umidità elevata le resine di incollaggio presentano polimerizzazioni problematiche, in presenza di acqua salata i calcestruzzi porosi possono degradare più velocemente le loro proprietà meccaniche

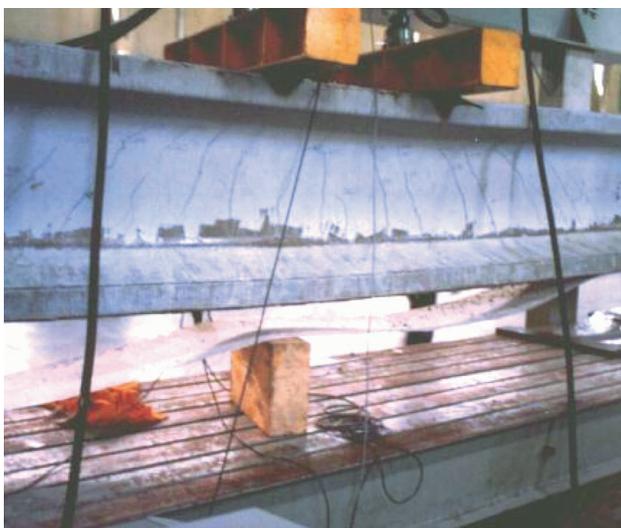


FIG. 5.14 - Esecuzione di prova a flessione in scala reale

di interfaccia e l'acciaio può continuare a corrodersi se il copriferro risulta fessurato;

- **tipo di malta da ripristino:** in commercio esistono varie tipologie di malte cementizie con differenti caratteristiche prestazionali e reologiche specifiche per ogni intervento: additivate per renderle espansive all'aria, con fibre polimeriche per evitare il ritiro in fase plastica; con fibre polimeriche specifiche per aumentare leggermente la duttilità, con specifiche fibre metalliche caratterizzate da forgiature particolari che aumentano notevolmente la resistenza a trazione rendendole altamente duttili, ecc..
- **tipo di preparazione e numero massimo di difetti:** la preparazione superficiale è un parametro molto importante, ma spesso poco considerato; i calcestruzzi in opera, specialmente se sottoposti a traffico, presentano fessurazioni anche rilevanti; la percentuale di vuoti e la loro dimensione, lo spazio tra le lesioni, la dimensione delle stesse, i punti di discontinuità sono tutte variabili con effetto negativo sulle prestazioni finali dell'intervento di ripristino e rinforzo;
- **tipo di rinforzo:** i materiali resistenti a trazione applicati nella zona sono contraddistinti da diversi parametri meccanici, i più importanti a questi fini sono: il modulo elastico (nel campo entro il 50% della resistenza a trazione), la resistenza caratteristica a trazione, lo spessore equivalente.



FIG. 5.15 - Negli interventi di placcaggio la sabbiatura è indispensabile



FIG. 5.16 - Negli interventi di ripristino dei copriferro l'idroscarifica ad alta pressione consente una adeguata adesione di interfaccia

## 5.2 RINFORZI A TAGLIO

Il meccanismo del taglio è spesso modellato con il traliccio di resistenza di Morsch. Secondo questa teoria lo sforzo di taglio si contrasta con la formazione di un “traliccio” di ideali “puntoni” inclinati e di “tiranti” orizzontali e verticali. I primi sono formati dal conglomerato, i secondi dalle armature resistenti a trazione (barre longitudinali e staffe).

All'interno di questa schematizzazione è possibile eseguire il rinforzo al taglio delle travi aggiungendo fasciature trasversali di tessuto di carbonio; lo schema più adottato è quello della fasciatura ad U discontinua, dove le fasce necessitano della smussatura degli spigoli dell'ala della trave e l'ancoraggio all'intradosso della soletta.

Secondo le raccomandazioni del CNR-DT 200 R1/2013 la resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata secondo la relazione:

$$V_{Rd} = \min \{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c}\}$$

dove:

- $V_{Rd,s}$  = capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale d'acciaio
- $V_{Rd,f}$  = capacità a taglio-trazione del sistema di rinforzo FRP
- $V_{Rd,c}$  = capacità a taglio-compressione del calcestruzzo

Nel caso in cui le fasce di rinforzo possano essere disposte a U o in avvolgimento di una sezione quadrata o rettangolare, il contributo del rinforzo di FRP in stato limite ultimo,  $V_{Rd,f}$  può essere valutato con la seguente equazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fcd} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{w_f}{p_f}$$

dove:

- $d$  = altezza utile della sezione trasversale;
- $f_{fcd}$  = è la resistenza efficace;
- $t_f$  = spessore delle fasce di tessuto;
- $w_f$  = larghezza delle fasce di tessuto;
- $p_f$  = passo delle fasce di tessuto;
- $\theta$  = angolo di inclinazione delle fessure a taglio rispetto all'asse dell'elemento (45°);
- $\beta$  = angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse dell'elemento.

Gli schemi di riferimento sono illustrati nella Figura 5.2.2. Il concetto è quello di solidarizzare un elemento resistente a trazione al calcestruzzo nella sua zona tesa. Se l'adesione è perfetta, il rinforzo si comporterà in conservazione delle sezioni piane e la rottura della trave sarà originata o dalla rottura per compressione del calcestruzzo o dalla rottura a trazione della fibra.



FIG. 5.2.1 - Fasciature SikaWrap® FIB ad U per il rinforzo al taglio

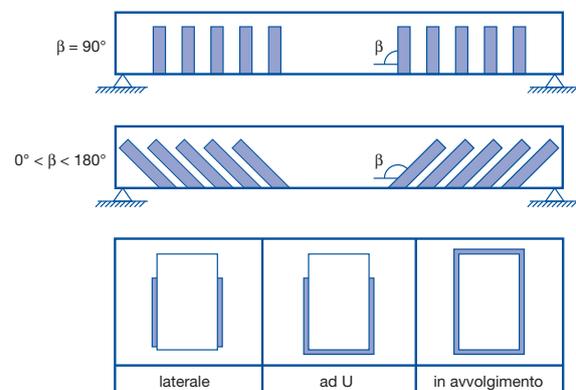


FIG. 5.2.2 - Schemi di rinforzo al taglio con FRP

### 5.3 INTERVENTI DI CONFINAMENTO

In tutti i materiali da costruzione ad ogni sollecitazione applicata su una direzione corrisponde una deformazione anche nelle direzioni ortogonali (il cosiddetto effetto Poisson). Ad esempio un pilastro in calcestruzzo compresso, mentre si accorcia, si schiaccia, subisce una dilatazione trasversale che è pari a circa il 15-20% dello schiacciamento. Superata la soglia di limite elastico la proporzionalità tra deformazioni longitudinali e trasversali è perduta, il coefficiente di Poisson aumenta ma non esiste una chiara legge che ne descriva il comportamento. Se si applica una fasciatura di tessuto di fibre nella direzione orizzontale, si genera un "confinamento passivo" del pilastro. Ai carichi modesti tale confinamento è sottoposto a modeste dilatazioni trasversali, a carichi elevati la fasciatura aumenta molto il suo effetto proprio in relazione all'aumento del coefficiente di Poisson. Tale effetto termina nel momento in cui la dilatazione trasversale supera la deformazione

massima di rottura per trazione della fibra, oppure quando la sovrapposizione del tessuto si rompe per eccessivo sforzo di taglio di interfaccia.

I test di verifica sperimentale individuano i seguenti benefici strutturali:

- incremento di resistenza a compressione;
- consistente incremento di duttilità.

L'area sottesa dal diagramma carico assiale ed accorciamento assiale aumenta fortemente dal caso non confinato a quello confinato. Il primo risultato è importante per interventi di riparazione o rinforzo, il secondo è utilissimo per l'incremento della sicurezza contro azioni sismiche.

L'efficacia della fasciatura di confinamento dipende dalla forma geometrica del solido. Se esso è circolare l'effetto sarà massimo, se il solido ha sezione rettangolare allungata, l'effetto del confinamento si concentrerà solo sugli spigoli e l'efficacia sarà molto minore.

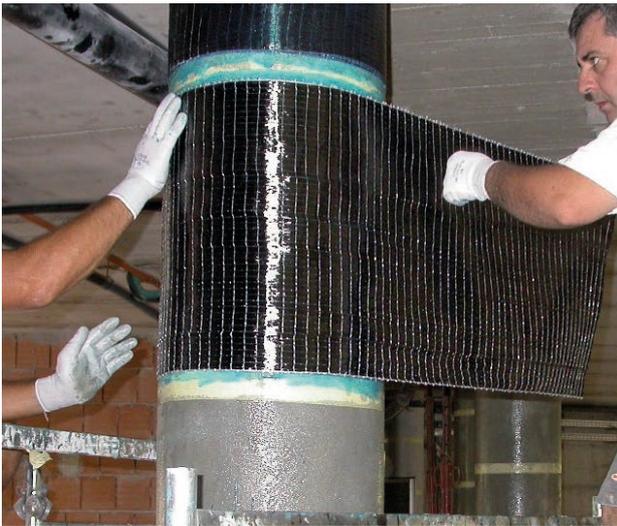


FIG. 5.3.1 - Confinamento pilastro in cemento armato con SikaWrap® FIB

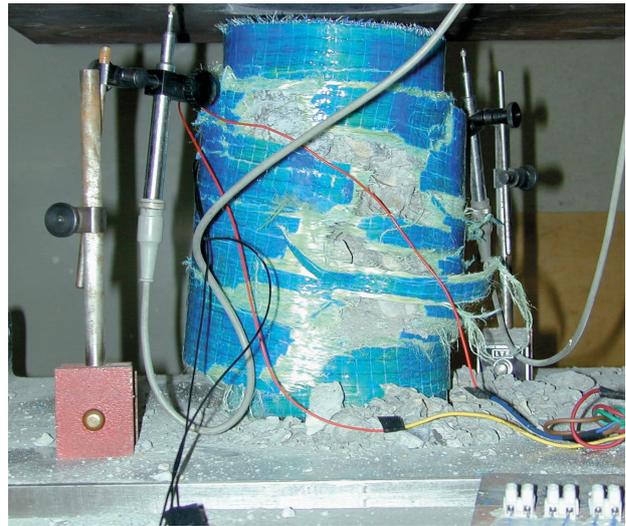


FIG. 5.3.2 - Prove di rottura a compressione di pilastri in c.a. confinati con SikaWrap® FIB

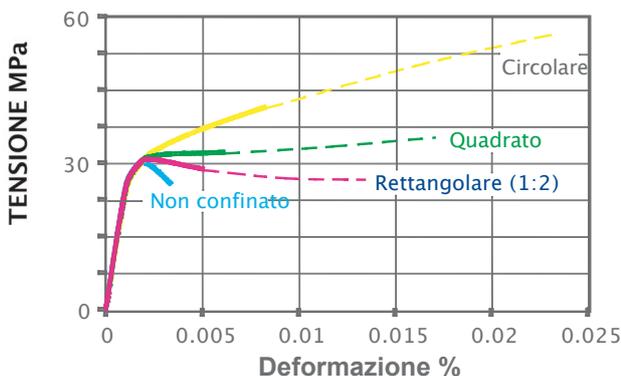


FIG. 5.3.3 - Variazione del grado di rinforzo al variare della forma dell'elemento confinato

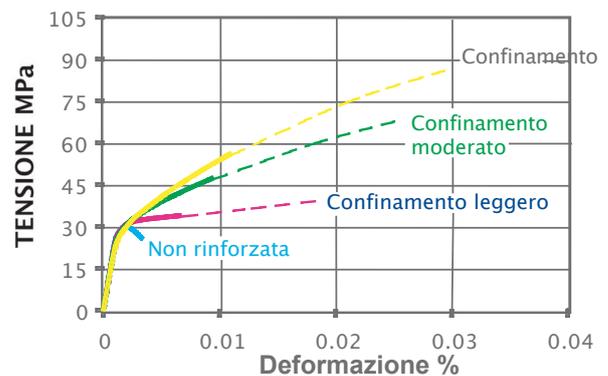


FIG. 5.3.4 - Variazione degli incrementi di resistenza al variare dell'entità di rinforzo

La raccomandazione del CNR-DT 200 R1/2013 fornisce alcune formulazioni per il calcolo della resistenza del pilastro confinato, nel caso di elementi a sezione circolare, la resistenza di calcolo del calcestruzzo confinato,  $f_{ccd}$ , può essere valutata con la seguente relazione:

$$f_{ccd} = f_{cd} \left[ 1 + 2.6 \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3} \right]$$

dove:

$f_{cd}$  = resistenza di calcolo del calcestruzzo non confinato da valutarsi come prescritto nella Normativa vigente

$f_{l,eff}$  = è la pressione laterale efficace di confinamento da valutarsi come di seguito.

$$f_{l,eff} = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid} \cdot k_v \cdot k_a$$

dove:

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{D \cdot p_f}$$



FIG. 5.3.5 - Esempio di applicazione di SikaWrap® FIB per confinamento



FIG. 5.3.6 - Esempio di applicazione di SikaWrap® FIB per confinamento

dove:

$D$  = diametro della sezione trasversale;

$t_f$  = spessore totale del tessuto SikaWrap® FIB impiegato;

$E_f$  = modulo di elasticità del materiale in direzione delle fibre;

$b_f$  = larghezza del tessuto;

$p_f$  = passo delle strisce di tessuto;

$\varepsilon_{fd,rid}$  = deformazione limite dell'FRP valutata come:

$$\min \left[ \frac{\eta_a \cdot \varepsilon_{fk}}{\gamma_f}; 0.004 \right]$$

dove:

$\eta_a$  = coefficiente ambientale

$\gamma_a$  = fattore di sicurezza  $f$  per il confinamento vale 1.1, trattandosi di "sistema certificato" e la deformazione caratteristica a rottura  $\varepsilon_{fk}$  è certificata dal Produttore.

$k_v$  = coefficiente di efficienza verticale nel caso di fasciature discontinue;

$k_a$  = coefficiente di orientamento, nel caso di avvolgimenti elicoidali.

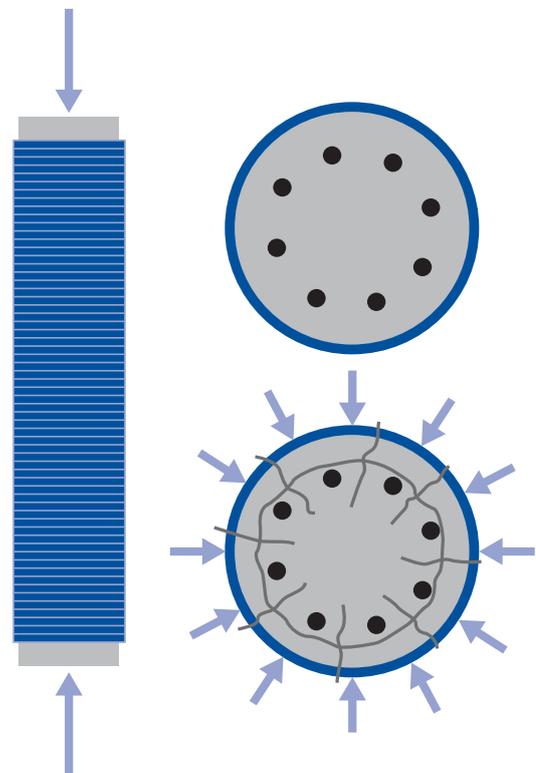


FIG. 5.3.7 - Schemi di funzionamento del rinforzo per confinamento con tessuto FRP

# 6. REGOLE GENERALI PER LA BUONA RIUSCITA DI UN INTERVENTO DI RINFORZO

Molto spesso nella progettazione e nella realizzazione di un intervento di rinforzo con FRP vengono trascurati importanti aspetti. Si riportano quindi nel dettaglio alcune indicazioni pratiche basate sull'evidenza sperimentale.

## A) PEELING O DELAMINAZIONE DI ESTREMITÀ:

negli interventi di placcaggio su muratura o calcestruzzo non si devono applicare prodotti con spessore di riferimento  $>2$  mm (ad esempio due lamine sovrapposte, vedi figura 6.1). Il rischio è la prevalenza della crisi per delaminazione, meccanismo fragile che si manifesta a carichi inferiori alle attese progettuali. Per contenere questi fenomeni indesiderati ci sono tre buone pratiche: l'estensione del rinforzo fin verso gli appoggi, l'adozione di piccoli spessori, l'impiego di fasce ad U trasversali di tessuto possibilmente ancorate in apposite tasche nell'elemento strutturale superiore (vedi figura 6.2).

## B) SPINTA A VUOTO:

si devono evitare i "punti di spinta a vuoto". Il fenomeno si manifesta come mostra lo schema della figura 6.3. Quando il rinforzo assume sforzi di trazione si stacca per la modesta resistenza a trazione posseduta dall'adesivo o per un intervento eseguito in maniera approssimativa.



FIG. 6.1- Esempio di delaminazione di estremità



FIG. 6.2 - Intervento di rinforzo eseguito a regola d'arte mediante l'impiego di fasce ad U



FIG. 6.3 - Esempio schematico del fenomeno di "spinta a vuoto"

### C) PREPARAZIONE SUPERFICIALE:

quando il supporto esistente è degradato, non coerente, non planare, l'intervento di placcaggio con FRP deve essere preceduto da una idrodemolizione o altra idonea preparazione meccanizzata e dalla adozione di una malta da ripristino o resina epossidica avente stabilità volumetrica, elevata adesione al supporto, compatibilità di modulo elastico ed elevata energia di frattura dell'interfaccia.

Le linee di malte SikaEmaco® e resine Sikadur® impiegate per il ripristino e la rasatura del supporto, offrono una gamma di prodotti che garantiscono risultati di grande rilievo prestazionale e durabilità agli interventi realizzati. Quando invece il calcestruzzo di supporto è di buona qualità, allora occorre una idrosabbatura che metta in vista l'inerte, in sintesi la semplice pulizia del supporto non è sufficiente.



FIG. 6.4.1 - Preparazione del substrato mediante idrosabbatura

### D) CORRETTA SCELTA DEL RINFORZO IN FIBRA DI CARBONIO:

è importante scegliere in maniera corretta il prodotto in fibra di carbonio per la particolare applicazione che si deve realizzare. Per gli interventi di rinforzo a flessione o a taglio e per gli interventi di confinamento di pilastri è ottimale l'impiego di tessuti unidirezionali dato che il regime degli sforzi che si vuole assorbire è tutto in una sola direzione. Per gli interventi di rinforzo che devono assorbire stati di sforzo in più direzioni si possono impiegare tessuti unidirezionali in più strati, dove ogni strato di fibra ha una specifica direzione, oppure più strati di tessuti bidirezionali o quadriassiali, purché si garantisca una adeguata lunghezza di sovrapposizione per ciascuna direzione. Si evidenzia comunque che l'impregnazione di tessuti multidirezionali risulta piuttosto difficile, considerando la presenza di filato disposto secondo differenti direzioni.



FIG. 6.4.2 - Esempio di intervento di confinamento di pilastro

# 7. ESEMPI DI APPLICAZIONE DEI SISTEMI FRP SIKA®

I sistemi FRP Sika® si possono impiegare ogni qualvolta vi sia da assorbire uno sforzo di trazione pura o di trazione prodotta dalla flessione o dal taglio.

Vediamo i casi più classici in cui sia richiesto il rinforzo anche con riferimento all'adeguamento o miglioramento sismico delle seguenti strutture:

- 1) Portali
- 2) Nodi trave-pilastro
- 3) Rinforzo travi da ponte ammalorate
- 4) Rinforzo di solai
- 5) Rinforzo di capriate
- 6) Rinforzo di travi in c.a.
- 7) Rinforzo strutture in legno
- 8) Rinforzo strutture in muratura

## 7.1 PORTALI

La trave di sommità è soggetta ad un carico verticale, il pilastro laterale è soggetto a carico orizzontale di vento. Nasce trazione all'intradosso della trave, sulle zone esterne vicino ai nodi trave-colonna e alla base dei pilastri.

Quali possibilità esistono?

A cavallo del nodo trave-colonna si può predisporre il placcaggio con tessuto SikaWrap® FIB, all'intradosso della trave si può pensare di intervenire con placcaggio di lamine o ringrosso con barre, alla base dei pilastri si possono aggiungere barre Sika® CarboDur® BAR in tasca, secondo gli schemi nel seguito riportati. Terminato il rinforzo flessionale si applicano fasciature orizzontali anti delaminazione.



FIG. 7.1.1 - Intervento mediante materiale composito su portale

## 7.2 I NODI TRAVE-PILASTRO

I nodi trave-pilastro non confinati sono tipicamente quelli posti sul perimetro della struttura, o all'angolo (nodo d'angolo), ovvero in facciata (nodo intermedio). L'intervento deve garantire anche un incremento della resistenza a taglio e aumento di duttilità delle travi e dei pilastri nelle loro parti terminali convergenti nel nodo ed un confinamento delle estremità dei pilastri, dove si concentrano le massime richieste di duttilità in pressoflessione. Le tipologie d'intervento qualitativamente descritte sintetizzano quanto riportato in modo più esteso nelle "Linee guida per riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni" del Dipartimento Protezione Civile - Reluis, con indicazione dei relativi sistemi. Gli interventi vengono di seguito descritti nelle loro diverse componenti, ciascuna dedicata a prevenire un meccanismo di collasso.

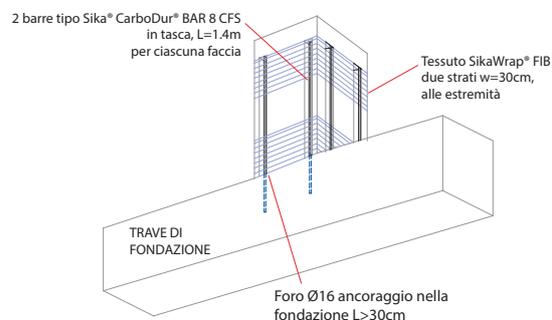


FIG. 7.2.1 - Schema di messa in opera di intervento alla base del pilastro con opportune tasche in cui inserire Sika® CarboDur® BAR



FIG. 7.2.2 - Intervento con materiale composito su nodo trave-pilastro

Generalmente sono previste le seguenti fasi:

**FASE 1)**

Incremento della capacità del pannello di nodo e della porzione di sommità del pilastro rispetto all'azione di taglio esercitata dalla tamponatura con tessuti unidirezionali SikaWrap® FIB inclinati (fig. 7.2.3)

**FASE 2)**

Rinforzo a taglio della zona di nodo con tessuto FRP quadriassiale (fig. 7.2.4). L'incremento di resistenza a taglio del pannello di nodo può essere conseguito, nel caso di utilizzo di materiali compositi, mediante disposizione di tessuto quadriassiale in carbonio SikaWrap® FIB 380 4D ovvero di tessuto unidirezionale con fibre orientate nella direzione delle staffe del pilastro SikaWrap® FIB CFS.

**FASE 3) E 4)**

Confinamento delle estremità dei pilastri con tessuto unidirezionale in carbonio SikaWrap® FIB.

Il confinamento delle estremità dei pilastri (fig. 7.2.5) consente di conferire alle stesse un significativo incremento della resistenza a taglio e della capacità deformativa; esso ha anche un effetto benefico nei riguardi della potenziale instabilità delle barre longitudinali laddove il passo delle staffe sia molto rado.

**RISULTATO DELL'INTERVENTO**

L'incremento di resistenza a taglio delle estremità delle travi consente di prevenire una eventuale crisi per taglio, secondo un meccanismo fragile che potrebbe attivarsi nel caso in cui la resistenza del calcestruzzo è relativamente bassa e/o le armature a taglio sono carenti.

Per il dimensionamento del sistema di rinforzo dei nodi con FRP può essere di ausilio il software messo a disposizione dalla Reluis "Joint FRP" ( Del Vecchio C., Di Ludovico M., Balsamo A., Prota A., JOINT FRP v.1.0, Software per la progettazione del rinforzo di nodi trave-pilastro con FRP), disponibile al seguente link: <https://www.reluis.it/it/progettazione/software/joint-frp.html>

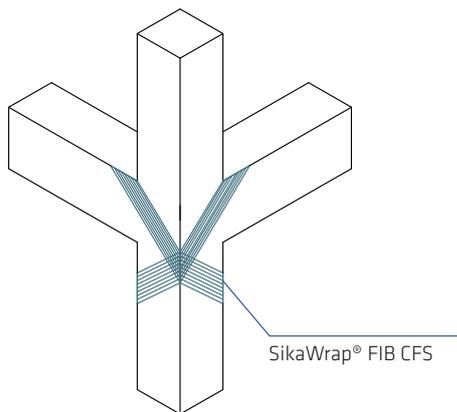


FIG. 7.2.3 - Fase 1: Rinforzo con fasce unidirezionali per pilastri d'angolo e pilastri perimetrali intermedi

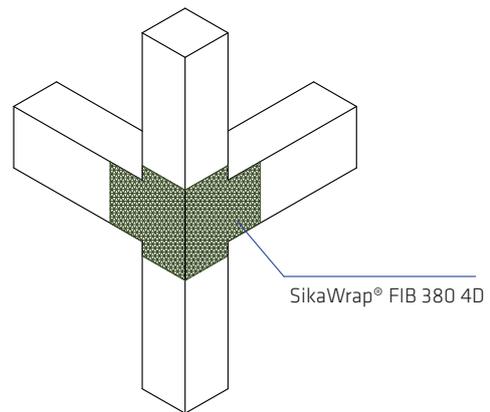


FIG. 7.2.4 - Fase 2: Rinforzo con fasce quadriassiali per pilastri d'angolo e pilastri perimetrali intermedi

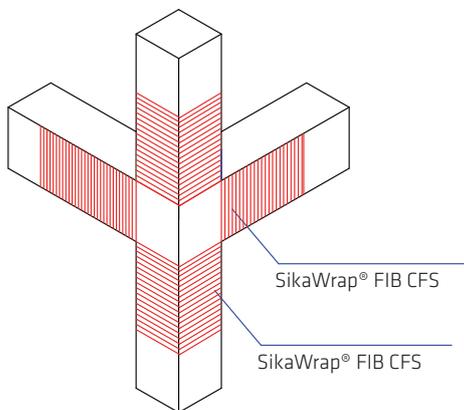


FIG. 7.2.5 - Fase 3 e 4: Rinforzo con confinamento estremità pilastri con tessuto unidirezionale in avvolgimento della sezione e incremento resistenza al taglio delle estremità delle travi con SikaWrap® FIB

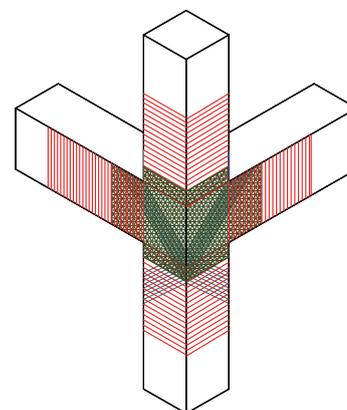


FIG. 7.2.6 - Risultato finale

### 7.3 RINFORZO DI TRAVI DA PONTE AMMALORATE

Questa è una situazione molto comune nel nostro Paese, a causa della vetustà delle costruzioni e dell'ambiente aggressivo in cui si trovano.

Nelle travi appoggiate si interviene all'intradosso con lamine o tessuti, in alcuni casi dove il copriferro viene integralmente rifatto con apporto di almeno 3 cm di SikaEmaco®, ed a volte è conveniente optare per l'inserimento di barre Sika® CarboDur® BAR all'interno del ripristino.

Il calcolo delle travi da ponte è abbastanza complesso, ma pur sempre basato sulle regole generali di conservazione delle sezioni piane e perfetta aderenza fibra-clt fino al raggiungimento della tensione ultima di lavoro della fibra. La trave rinforzata con SikaWrap® FIB riacquista, in modo molto semplice, una resistenza a rottura maggiore o uguale a quella originaria.

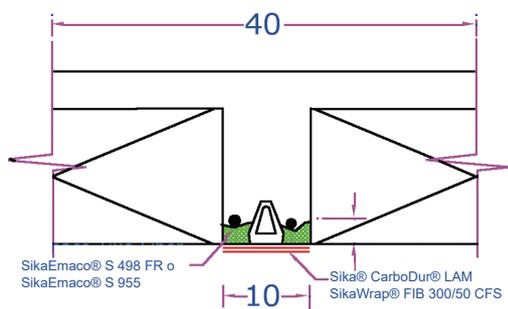


FIG. 7.3.2 - Schema di intervento su trave mediante Sika® CarboDur® LAM

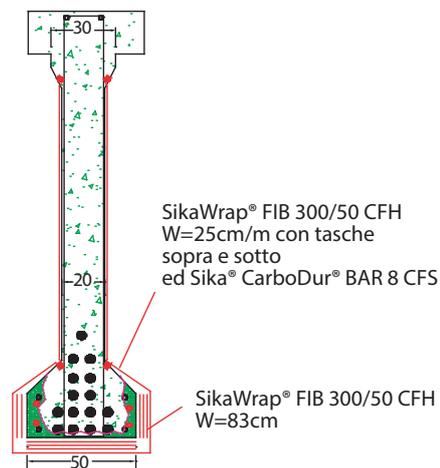


FIG. 7.3.1 - Schema di applicazione combinato SikaWrap® FIB e Sika® CarboDur® BAR

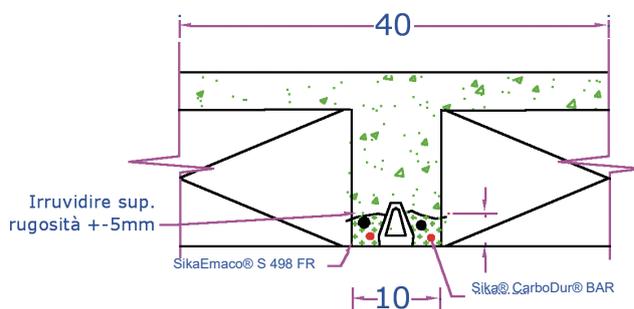


FIG. 7.3.3 - Schema di intervento su trave mediante Sika® CarboDur® BAR

### 7.4 RINFORZO DI CAPRIATE

Le capriate sono elementi strutturali particolari che scompongono la sollecitazione flessionale in elementi semplicemente tesi (tiranti) ed elementi semplicemente compressi (puntoni). I tiranti possono essere rinforzati con il sistema di rinforzo FRP Sika® disponendo i filamenti FRP nella direzione longitudinale dello stesso.

Con la tecnologia Sika® CarboDur® BAR si può limitare lo spessore del ringrosso a soli 3-4 cm, in quello spazio esiguo trovano alloggio barre Sika® CarboDur® BAR con lo scopo di aumentare notevolmente la resistenza a flessione.

In alternativa si può optare per l'incollaggio di tessuti o lamine sulla faccia tesa.



FIG. 7.4.1 - Esempio di rinforzo mediante ringrosso effettuato con Sika® CarboDur® BAR

## 7.5 RINFORZO DI TRAVI IN C.A.

Vi sono casi in cui il ringrosso di una trave risulta estremamente complesso, o dove la combinazione di azioni sismiche o distorsioni con carichi verticali genera elevate sollecitazioni flessionali in direzione ortogonale.



FIG. 7.5.1 - Esempio di intervento mediante fasciatura con SikaWrap® FIB

## 7.6 RINFORZO DI ELEMENTI IN LEGNO

Il rinforzo a flessione di strutture in legno può essere realizzato con tessuti o lamine di FRP incollate sulla superficie esterna della trave o all'interno di appositi alloggiamenti predisposti nel corpo della trave. Gli schemi seguenti illustrano alcune possibilità di intervento.

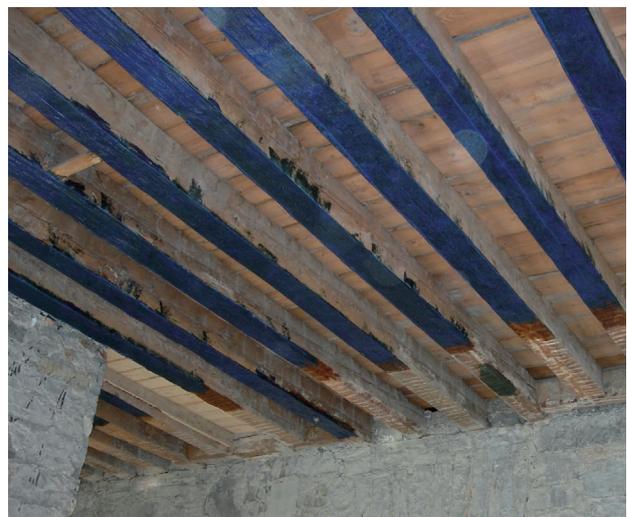


FIG. 7.6.1 - Rinforzo di travi in legno mediante SikaWrap® FIB

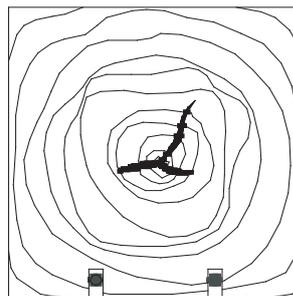


FIG. 7.6.2a - Applicazione barre in zona tesa

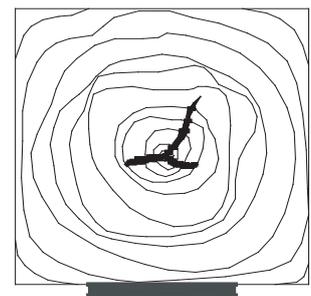


FIG. 7.6.2b - Applicazione tessuti in zona tesa

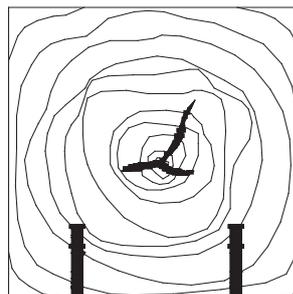


FIG. 7.6.2c - Applicazione lamine interne in zona tesa

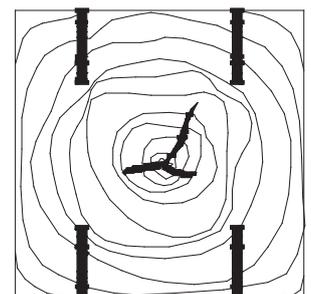


FIG. 7.6.2d - Applicazione lamine interne in zona tesa e compressa

## 7.7 RINFORZO DI STRUTTURE IN MURATURA

L'utilizzo di rinforzi FRP su strutture in muratura rappresenta una diffusa modalità di consolidamento ed adeguamento che deve essere progettata ed eseguita con opportuni accorgimenti.

Ad esempio l'applicazione del rinforzo in FRP deve essere effettuata su elementi strutturali di adeguate proprietà meccaniche. Nel caso in cui la muratura sia presente danneggiata o disomogenea prima dell'applicazione del rinforzo si dovrà prevedere un preconsolidamento con tecniche tradizionali (cuci-scuci, iniezioni, ristilatura dei giunti, ecc.).

Inoltre, nel rinforzo ad esempio di pannelli murari mediante applicazione di tessuto FRP, il ruolo dell'aderenza tra muratura e composito è di grande importanza, perché la crisi per perdita di aderenza avviene con una modalità di rottura fragile. Molte sono le applicazioni effettuate, alcune delle quali illustrate nelle foto seguenti.

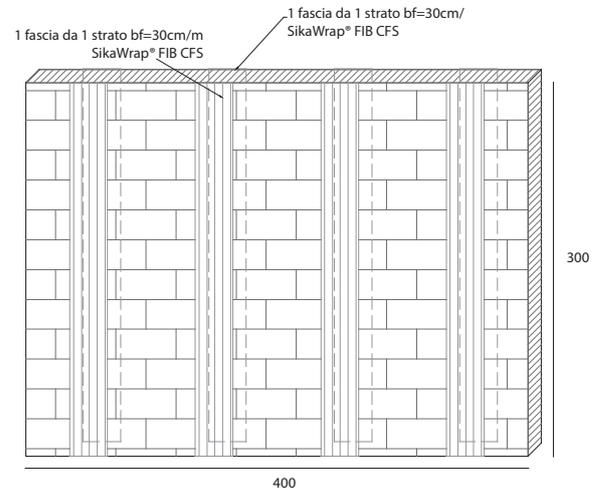


FIG. 7.71 - intervento su maschio murario mediante SikaWrap® FIB



FIG. 7.72 - Intervento su volta all'estradosso con Sika® CarboDur® BAR



FIG. 7.73 - Intervento su volta all'intradosso con SikaWrap® FIB

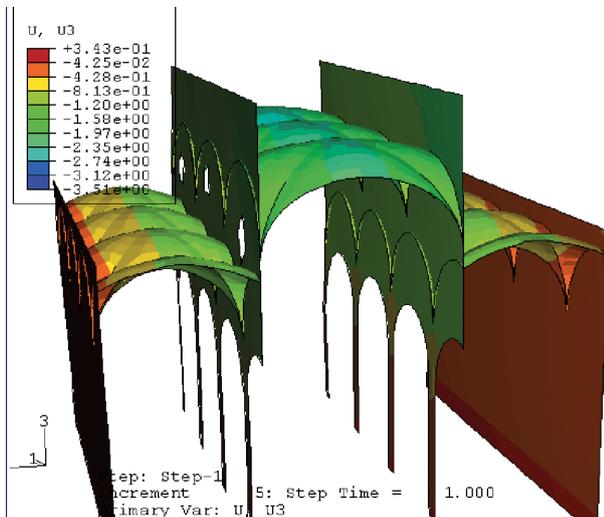
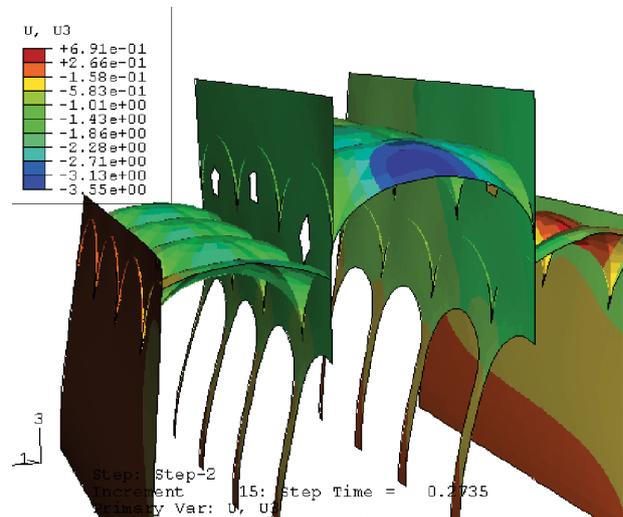


FIG. 7.74 - Progettazione di intervento mediante materiali compositi di struttura voltata

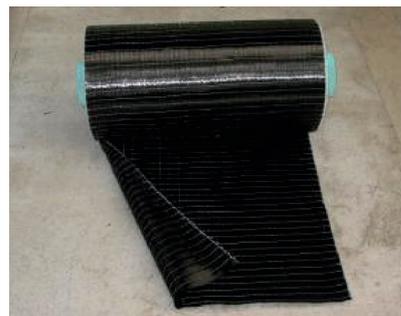


# 8. PRODOTTI SikaWrap® FIB E Sika® CarboDur® LAM PER IL RINFORZO DI STRUTTURE

Sika propone una organica gamma di materiali compositi.

## 8.1 TESSUTI

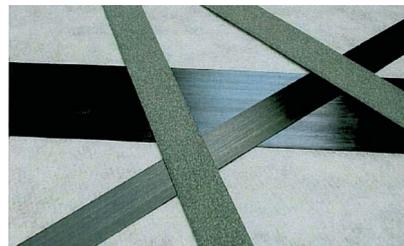
La gamma di prodotti Sika comprende tessuti con le prestazioni di seguito riportate:



	SikaWrap® FIB 230/50 CFS	SikaWrap® FIB 300/50 CFS	SikaWrap® FIB 400/50 CFS	SikaWrap® FIB 600/50 CFS	SikaWrap® FIB 300/50 CFH
Tipo di fibra	Carbonio ad alta resistenza	Carbonio ad alto modulo elastico			
Orditura delle fibre	unidirezionale	unidirezionale	unidirezionale	unidirezionale	unidirezionale
Grammatura del tessuto, gr/mq	230 ± 10	300 ± 10	400 ± 10	600 ± 10	310 ± 10
Massa del tessuto per unità di area, px	230 g/m <sup>2</sup>	300 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>	600 g/m <sup>2</sup>	300 g/m <sup>2</sup>
Spessore equivalente teq	0,126 mm	0,165 mm	0,220 mm	0,330 mm	0,165 mm
Modulo elastico del laminato riferita all'area netta fibre, Ef	1 str.: 263 GPa 3 str.: 273 GPa	1 str.: 269 GPa 3 str.: 270 GPa	1 str.: 251 GPa 3 str.: 255 GPa	1 str.: 238 GPa 3 str.: 234 GPa	1 str.: 401 GPa 3 str.: 397 GPa
Resistenza del laminato riferita all'area netta fibre, f <sub>fi</sub> Valore medio	1 str.: 3560 MPa 3 str.: 3987 MPa	1 str.: 3938 MPa 3 str.: 3774 MPa	1 str.: 3752 MPa 3 str.: 3655 MPa	1 str.: 4123 MPa 3 str.: 4350 MPa	1 str.: 2511 MPa 3 str.: 2589 MPa
Resistenza del laminato riferita all'area netta fibre, f <sub>fib</sub> Valore caratteristico	1 str.: 3225 MPa 3 str.: 3549 MPa	1 str.: 3312 MPa 3 str.: 3375 MPa	1 str.: 3429 MPa 3 str.: 3102 MPa	1 str.: 3558 MPa 3 str.: 4083 MPa	1 str.: 1910 MPa 3 str.: 1955 MPa
Deformazione a rottura, ε <sub>fib</sub>	1 str.: 1,4 % 3 str.: 1,5 %	1 str.: 1,4 % 3 str.: 1,4 %	1 str.: 1,4 % 3 str.: 1,5 %	1 str.: 1,7 % 3 str.: 1,9 %	1 str.: 0,6 % 3 str.: 0,6 %
Classe secondo certificato di valutazione tecnica (C.V.T.)	210 C	210 C	210 C	210 C	350/1750 C

## 8.2 LAMINE

Sika® CarboDur® LAM è un rinforzo di natura fibrosa in forma di lamine pultruse in fibra di carbonio caratterizzate da prestazioni meccaniche superiori a quelle dell'acciaio armonico indicato per i rinforzi flessionali (placcaggio o beton plaqu ) di elementi in calcestruzzo, legno ed acciaio.   disponibile in varie configurazioni, come indicato nella tabella di seguito riportata:



	Sika® CarboDur® LAM CFS	Sika® CarboDur® LAM CFH
Spessore nominale lamina	1,4 mm	1,4 mm
Larghezza	50-60-80-100-120-150 mm	50-60-80-100-120-150 mm
Modulo elastico E	153 GPa	201 GPa
Resistenza a trazione, $f_{fb}$	3198 MPa	3080 Mpa
Resistenza a trazione, $f_{fb}$	3042 MPa	2769 MPa
Deformazione a rottura, $\epsilon_{fi}$	1,9 %	1,3 %
Classe secondo certificato di valutazione tecnica (C.V.T.)	C150/2300	C200/1800

## 8.3 RETI

Sika dispone di reti in carbonio o vetro per l'utilizzo nel rinforzo di strutture anche con impiego di malte cementizie, con le seguenti caratteristiche:



	SikaWrap® NET 200/100 CFS	SikaWrap® NET 240/100 GF
Materiale	Carbonio	Vetro AR
Densit� superficiale complessiva	200 g/m <sup>2</sup>	240 g/m <sup>2</sup>
Maglia	15x15 mm	25x25 mm
Tipologia di rete	Bilanciata	Bilanciata
Modulo elastico caratteristico a trazione	230 GPa	65 GPa
Deformazione ultima	1,4 %	2,5 %
Resistenza caratteristica a trazione	2.500 MPa	1.600 MPa

#### 8.4 ADESIVI ED ACCESSORI

La gamma dei prodotti Sika per il rinforzo di strutture è completata da resine epossidiche strutturali, connettori in carbonio ed in vetro SikaWrap® CON, ancoraggi per barre, malte cementizie ed a base calce (Linea SikaEmaco®) ed accessori per la corretta ed efficace applicazione dei materiali compositi.



#### 8.5 BARRE

Sika propone un'ampia gamma di barre pultruse. Di seguito si riportano le principali caratteristiche delle barre in carbonio e di quelle in vetro, particolarmente indicate in caso di strutture resistenti al fuoco. Si evidenzia l'elevata resistenza alle alte temperature.



	Sika® CarboDur® BAR 8 CFS	Sika® CarboDur® BAR 10 CFS	Sika® CarboDur® BAR 8 CFH	Sika® CarboDur® BAR 10 CFH	Sika® CarboDur® BAR 8-12-14-16-18-20-24 GF
Materiale	carbonio	carbonio	carbonio	carbonio	vetro
Sezione nominale	50 mm <sup>2</sup>	78,5 mm <sup>2</sup>	50 mm <sup>2</sup>	78,5 mm <sup>2</sup>	50-78,5-153-254- 314-452 mm <sup>2</sup>
Diametro nominale	8 mm	10 mm	8 mm	10 mm	8-12-14-16-20 mm
Resistenza a trazione caratteristica f <sub>tk</sub> , ASTM D3039	1.800 MPa	1.800 MPa	1.800 MPa	1.800 MPa	800 MPa
Modulo elastico medio, ASTM D3039	160.000 MPa	160.000 MPa	200.000 MPa	200.000 MPa	45.000 MPa
Deformazione ultima media, ASTM D3039	1,8 %	1,8 %	1,1 %	1,1 %	3,0 %
Temperatura di transizione vetrosa, ASTM E1356 o ASTM E1640	> 190 °C	> 190 °C	> 190 °C	> 190 °C	> 190 °C

# SIKA: LEADER MONDIALE DI PRODOTTI CHIMICI PER L'EDILIZIA



PER MAGGIORI INFORMAZIONI  
SULLE TECNOLOGIE SIKA®:



## SIKA SIAMO NOI

Sika è un'azienda attiva in tutto il mondo nella chimica integrata applicata all'edilizia e all'industria, leader nei processi di produzione di materiali per sigillatura, incollaggio, isolamento, impermeabilizzazione, rinforzo e protezione di strutture.

Sika produce additivi per calcestruzzo di elevata qualità, malte speciali, sigillanti e adesivi, prodotti per l'isolamento, l'insonorizzazione e il rinforzo strutturale, pavimentazioni industriali e prodotti impermeabilizzanti. La presenza locale in tutto il mondo, con filiali in 103 Paesi ed oltre 30.000 collaboratori, assicura il contatto diretto con Sika dei nostri Clienti.

Si applicano le condizioni generali di vendita in vigore. Prima dell'uso, consultare la Scheda Tecnica di Prodotto più recente disponibile.



## SIKA ITALIA S.P.A.

Via Luigi Einaudi, 6  
20068 - Peschiera Borromeo (MI)  
Italia

## Contatti

Tel. +39 02 54778 111  
Fax +39 0254778 119  
www.sika.it

**BUILDING TRUST**

