

MBar[®]
MBrace[®]

Rinforzo di strutture con FRP

Quaderno tecnico



 **BASF**
The Chemical Company



BASF Construction Chemicals in Italia

Degussa Construction Chemicals Italia Spa, azienda leader nel mercato italiano dei materiali ad alta tecnologia per l'edilizia, dal 1° agosto 2006 ha variato la propria denominazione in **BASF Construction Chemicals Italia Spa**. Tale cambiamento è conseguenza dell'acquisizione della Divisione Construction Chemicals di Degussa da parte della BASF AG. L'operazione ha messo insieme due forti partner: **Degussa Construction Chemicals**, al primo posto nel mondo nel comparto della chimica per le costruzioni e **BASF**, società chimica leader mondiale.

La storia di **BASF Construction Chemicals Italia Spa** è una storia ricca di successi ed innovazione al servizio del cliente. Ha maturato una lunga esperienza nella ricerca e sviluppo di prodotti e tecnologie destinate sia a migliorare le prestazioni meccaniche, chimiche e di lavorabilità del calcestruzzo preconfezionato, prefabbricato e proiettato,

che per realizzare ripristini di strutture ed opere in calcestruzzo armato. Ha inoltre sviluppato anche avanzate tecnologie per il recupero e la deumidificazione delle murature di edifici storici, con specifiche linee di prodotti ad alta compatibilità chimico-fisica.

Importanti tappe sono state la Certificazione di Qualità CERTICHIM UNI EN ISO 9001 del 1992 (prima società del settore) ed il Premio Qualità 1995 di Unindustria che completano la lunga storia di successi ed innovazione dei 48 anni di leadership della **BASF Construction Chemicals Italia Spa**.

Da settembre 2003 **BASF Construction Chemicals Italia Spa** è certificata anche secondo la Certificazione Ambientale UNI EN ISO 14001.

Indice:

1. INTRODUZIONE	Pag. 4
2. TERMINOLOGIE RICORRENTI PRODOTTI FRP	Pag. 6
3. L'INQUADRAMENTO NORMATIVO	Pag. 9
4. QUALI SONO I VANTAGGI E GLI SVANTAGGI DEGLI FRP PER INTERVENTI DI RIPARAZIONE / RINFORZO	Pag. 10
5. REGOLE GENERALI PER LA BUONA RIUSCITA DI UN INTERVENTO DI RIPARAZIONE / RINFORZO	Pag. 12
6. REGOLE BASILARI PER LA PROGETTAZIONE	Pag. 14
6.1 Rinforzi a flessione	Pag. 14
6.2 Rinforzi a taglio	Pag. 19
6.3 Rinforzi a confinamento	Pag. 20
7. SISTEMA COMPOSITO FIBROSO MBRACE / MBAR - ESEMPI DI APPLICAZIONE	Pag. 22
7.1 Portali	Pag. 22
7.2 I nodi trave-colonna	Pag. 23
7.3 Rinforzo di travi da ponte ammalorate	Pag. 24
7.4 Rinforzo di travetti di solai	Pag. 24
7.5 Rinforzo di capriate	Pag. 25
7.6 Rinforzo di travi in c.a.	Pag. 25
7.7 Rinforzo di elementi in legno	Pag. 25
7.8 Rinforzo di strutture in muratura	Pag. 26
8. PRODOTTI BASF FRP PER IL RINFORZO DI STRUTTURE	Pag. 27
9. SISTEMA COMPOSITO FIBROSO MBRACE / MBAR: STRUMENTI PER LA PROGETTAZIONE	Pag. 29

1. Introduzione

Forte di una decennale esperienza, sia in termini di realizzazioni, sia in termini di ricerca, BASF CC Italia Spa offre un "**approccio integrato**" ad ogni specifico problema strutturale, offrendo al progettista una ampia casistica di prodotti FRP, di malte da riparazione, di manuali di calcolo, una documentazione tecnica completa ed un servizio di consulenza progettuale affidato a professionisti esterni esperti della tecnologia. L'obiettivo è quello di 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 positivi, sia considerazioni critiche riguardanti le reali potenzialità e gli abbagli che ogni tecnica può celare. Tutte le considerazioni che si riportano in questo documento sono, pertanto, basate su esperienze sperimentali.

Quattro sono le tipologie di prodotto FRP usualmente utilizzate in edilizia:

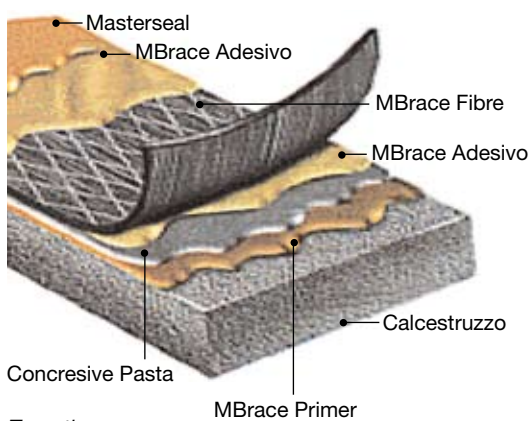
- **SISTEMA MBAR** costituito da barre specificatamente orientate alla durabilità del prodotto e alla riduzione dei problemi di protezione al fuoco. La matrice scelta garantisce un'elevata temperatura di transizione vetrosa T_g e quindi una spiccata resistenza alle alte temperature. Le fibre scelte sono quelle in carbonio ad alta resistenza ed in carbonio ad alto modulo elastico. Il sistema così composto può essere abbinato ai ripristini dei conglomerati con malte Emaco, eliminando completamente la presenza di resina tradizionale.
- **SISTEMA MBRACE LAMINATE** costituito da piatti di carbonio e da resina in pasta epossidica. Il sistema è tarato per la messa in opera rapida del rinforzo. Le resine sono particolarmente indicate per interventi di rasatura e di incollaggio, sono dotate di buon pot-life e facilità di miscelazione, riducendo al minimo la tempistica necessaria al rinforzo.
- **SISTEMA MBRACE FIBRE** costituito da tessuti unidirezionali e da una resina di impregnazione di tipo epossidico, dotata di una adeguata viscosità per permettere la corretta impregnazione dei tessuti Mbrace Fibre. 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.
- **SISTEMA MBRACE FIBRE NET** costituito da reti di carbonio applicabili con resine epossidiche o con malte cementizie.



Lamine



Barre



Tessuti

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:

- 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;
- non esiste trasferimento tensionale tra una fibra posta in direzione longitudinale ed un'altra posta nella direzione trasversale;
- tutti i prodotti FRP non possono essere saldati, il collegamento tra uno strato e l'altro avviene esclusivamente per mezzo di una resina;
- 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, a causa del creep che si manifesta nel polimero che impregna le fibre.

I sistemi MBrace/MBar si impiegano per il rinforzo di strutture: tre sono le applicazioni utili al rinforzo

- **incollaggio di tessuti, reti o laminati** sulla faccia tesa di travi o pilastri aventi calcestruzzo sano;
- **incollaggio di tessuti, reti o laminati** sulla faccia tesa di travi o pilastri previo rifacimento del calcestruzzo degradato;
- **inserimento di barre** nella faccia tesa di travi o pilastri previa formazione di tasche nel calcestruzzo sano o di ringrossi e/o di ripristini del copriferro.

Accclarato che l'intervento di rinforzo non avviene solo su travi sane, ma che risulta molto più frequente l'intervento su strutture esistenti degradate, è molto importante l'accoppiamento del sistema di rinforzo MBrace / MBar 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 MBrace - MBar, quindi, è integrato anche da una serie di prodotti cementizi per il ripristino strutturale noti con il nome di Emaco Formula, Emaco Nanocrete, Emaco Fast.

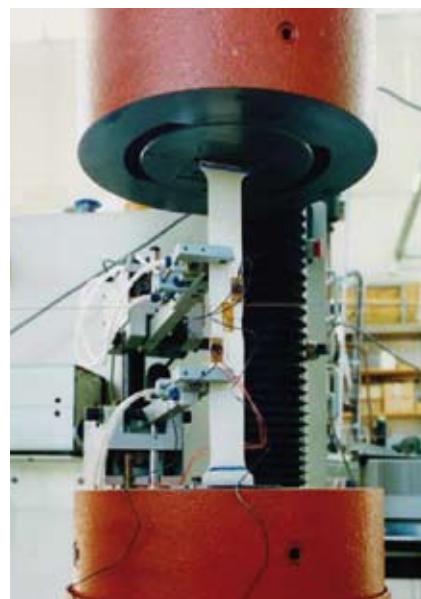
MBrace/MBar sono prodotti in controllo di qualità

Il sistema MBrace / MBar si inquadra tra le "Applicazioni tipo A" , secondo la Tab. 3.2 del CNR DT 200/2004, 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 vastissima gamma di prove sperimentali comparative che ne attestano la rispondenza normativa e l'affidabilità dei metodi di calcolo.



1.1 Prove di trazione su tessuto MBrace



1.2 Prova di trazione sull'adesivo MBrace Adesivo

Il sistema MBrace / MBar, quindi, ai sensi della norma CNR DT 200/2004, gode di un coefficiente di sicurezza sul materiale $\gamma_m = 1.1$ (nei riguardi dei problemi di flessione e trazione) e 1.2 (nei riguardi dei problemi legati alla perdita dell'aderenza), anziché rispettivamente 1.2 e 1.5. Ciò comporta un più elevato regime tensionale ammesso sul rinforzo e, di conseguenza, una sensibile riduzione del materiale necessario all'esecuzione dell'intervento rispetto ad altri prodotti che non ottemperano ai predetti requisiti normativi.

COEFFICIENTI PARZIALI γ_m PER I MATERIALI ED I PRODOTTI

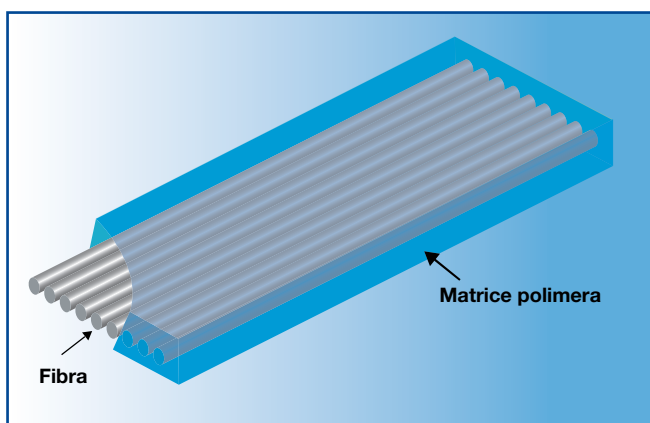
Modalità di collasso	Coefficiente parziale	Applicazione tipo A	Applicazione tipo B
Rottura	γ_f	1.10	1.20
Delaminazione	$\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

2. Terminologie ricorrenti prodotti FRP

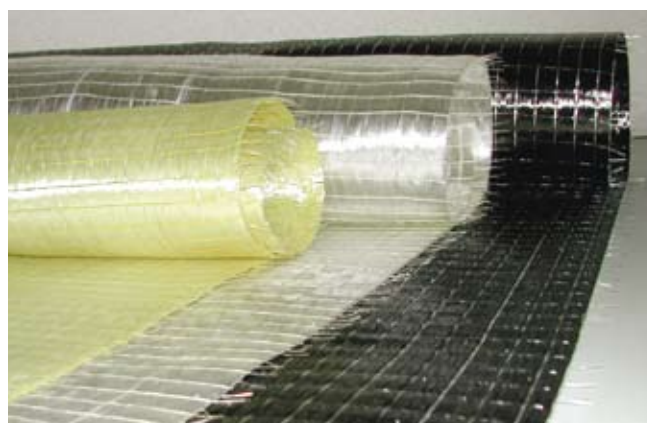
Per la corretta divulgazione della tecnologia, è quanto mai indispensabile la chiarezza dei termini relativi ai prodotti FRP. Vediamoli in dettaglio.

TESSUTI (MBRACE FIBRE)

- **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 BASF riportano tutti i valori utili al progettista.
- **Tessuto unidirezionale:** è un tessuto fibroso in cui le fibre sono tutte poste in una sola direzione. I tessuti BASF sono tutti unidirezionali.
- **Tessuto bidirezionale:** è un tessuto fibroso in cui una parte di fibre è posta in una direzione ed un'altra parte di fibre è posta in un'altra direzione.
- **Tessuto quadriassiale:** è un tessuto fibroso in cui le fibre sono suddivise in 4 direzioni differenti.
- **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.



2.1 Tutti i tessuti della linea MBrace hanno le fibre allineate in una sola direzione



2.2 I tessuti MBrace Alto Modulo ed MBrace Alta Resistenza hanno larghezza 50 cm. Il tessuto MBrace CFRP ha larghezza di 30 cm. Sono venduti in rotoli da 50 m, tagliabili a misura con forbice

BARRE (MBAR GALILEO, MBAR LEONARDO)

- **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. È un dato certificato dal Produttore.



PIATTI (MBRACE LAMINATE)

- **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.



2.3 Le lamine MBrace Lamine hanno spessore 1.4 mm, larghezza 50 o 100 mm e sono avvolte in rotoli di 50 m di lunghezza. Possono essere tagliate a misura con seghetto

TERMINOLOGIE RICORRENTI PER IL CONTROLLO QUALITÀ

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

- **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 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. Il frattile viene calcolato, secondo ACI 440, con l'espressione: $f_{tk} = f_{medio} - 3 \cdot dev. std$; tale valore è quello da considerarsi nel calcolo, come indicato nella raccomandazione CNR DT 200/2004.

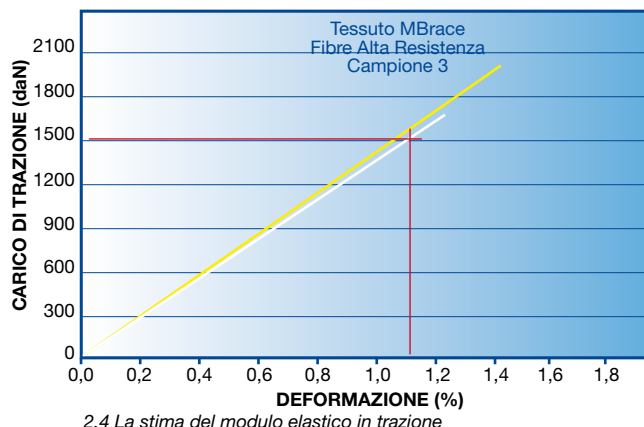
UN RECENTE CONTROLLO DEL LOTTO DI PRODUZIONE DEL TESSUTO MBrace ALTO MODULO

MBrace alto modulo					
Contr.	Larghezza mm	Spessore nominale mm	f_t MPa	E GPa	Allung. %
1	29.97	0.165	3331	393.9	0.8
2	29.19	0.165	4146	353.9	1.2
3	30.06	0.165	3734	373.4	1.0
4	29	0.165	3664	387.0	0.9
5	29.83	0.165	3700	435.4	0.8
Valore medio			3715	388.7	1.0
Valore minimo			3331		
Deviaz. Std			290		
Valore caratteristico: $f_m - 3 \text{ dev.}$			2844		

Come si può vedere dalla tabella di cui sopra, il **valore minimo** può essere molto più elevato del **valore caratteristico**

- **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 $\sigma-\epsilon$ in trazione nel tratto tra 0.1 e 0.4 ftk per ciascuna direzione di stesa delle fibre. Se il prodotto è di buona qualità il diagramma $\sigma-\epsilon$ è perfettamente lineare. Se le fibre non sono tutte perfettamente allineate si presenta una concavità verso il basso. Se le fibre non sono tutte della stessa qualità si presenta una concavità verso l'alto.



- **Temperatura di transizione vetrosa:** la temperatura oltre la quale si manifesta una repentina riduzione delle proprietà meccaniche del polimero. Per la prova sperimentale si utilizzano le norme ASTM FRTO Certificated. Ad esempio la temperatura di transizione vetrosa del polimero impiegato per realizzare le normali barre in carbonio è pari a circa 150°C. I prodotti della linea MBar Galileo HTG presentano invece temperature di transizione vetrosa certificate superiori a 250°C, con i conseguenti vantaggi nell'ambito delle strutture da proteggere in caso d'incendio.
- **Adesione per trazione:** la prova di pull-out di un tondo o di un riquadro 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.
- **Impregnazione manuale:** i tessuti di carbonio si impregnano in situ con il polimero epossidico. 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.



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

Può accadere che particolari modalità di tessitura (ad esempio su tessuti a grammatura maggiore di 600 gr/mq spesso si trovano filamenti raggruppati tra loro e non omogeneamente distribuiti) 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. 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 di conseguenza risultare inefficace.



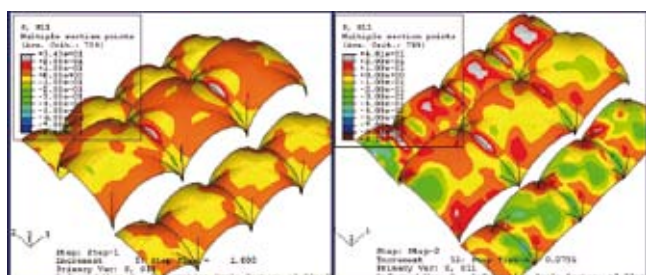
2.6 Le elevate grammature formano gruppi filamenti al cui interno l'adesivo non arriva (a sinistra un tessuto di 1200 gr/mq, a destra un tessuto di 800 gr/mq)

3. L'inquadramento normativo

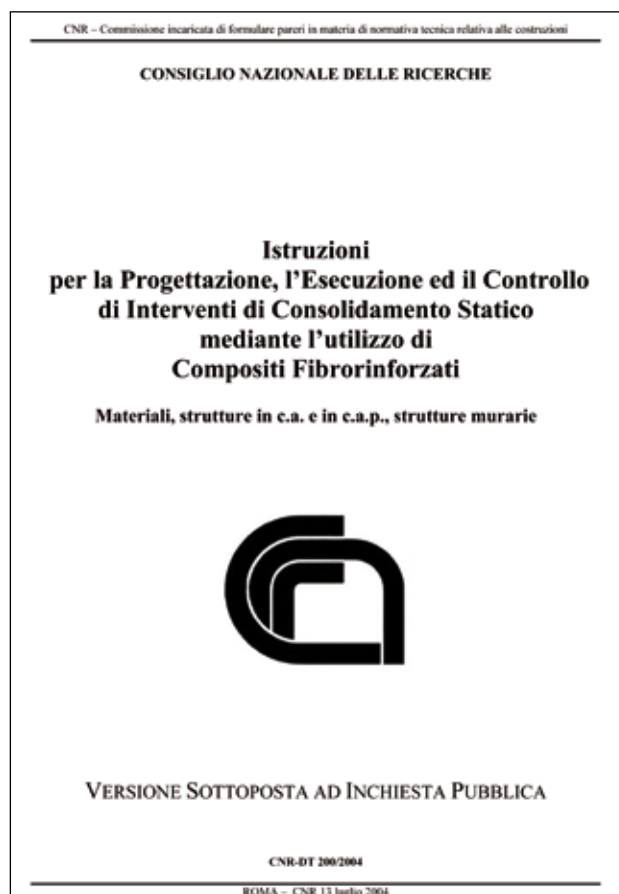
Sebbene i prodotti MBrace / MBar possano essere impiegati per la realizzazione di nuove strutture in c.a., il campo principale di impiego è sicuramente quello della riparazione e del rinforzo di elementi strutturali esistenti. In questo ambito l'FRP rappresenta un miglioramento di tecniche esistenti 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, 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'incamiciatura** con profilati metallici dei pilastri per l'incremento della resistenza a compressione, anche in questo caso l'invasità 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 largamente 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. In primo luogo si deve precisare che esiste una notevole differenza di comportamento tra progettisti di differenti Paesi. In Italia esiste una forte presenza della legislazione nel campo delle costruzioni, dalla 1086 del 1971 non solo si è voluto regolarizzare i ruoli e le competenze delle singole entità coinvolte nel settore delle costruzioni e definire le sollecitazioni di riferimento, ma si sono anche regolamentate le regole del progetto. Questa imposizione, se da un lato tutela il lavoro del progettista, dall'altro obbliga ad una stagnazione dell'innovazione, preferendo tecniche consolidate a metodi innovativi.



In molti altri Paesi la situazione è completamente differente, al progettista viene lasciata piena competenza nella identificazione dei metodi di progetto, mentre spetta al legislatore o, addirittura, al singolo proprietario la definizione dei carichi e degli obiettivi strutturali da raggiungere. In questo panorama, molto differente da Paese a Paese, esiste quindi una linea comune, e numerosi comitati di esperti hanno pubblicato "raccomandazioni", normalmente impiegate da Progettisti di tantissimi Paesi. Normative con carattere di legge NON esistono, per esse occorre attendere ancora perché il processo che porta alla redazione di tali norme impone il consolidamento della tecnologia. Uno specifico comitato di esperti riunito dal CNR italiano pubblicò nel 2004 una "raccomandazione" sull'argomento; questo testo si può definire uno strumento molto utile, ma non completo e, a volte, poco o troppo cautelativo. Dopo questo lungo, ma necessario, inquadramento entriamo nel dettaglio della normativa per fornire al Progettista uno strumento ed un metodo adeguato. Le considerazioni che seguono sono largamente basate sulla **norma CNR DT 200/2004** con qualche distinguo che sarà opportunamente evidenziato nel corso della lettura. Con la Circolare esplicativa del Testo Unico 2008 del 2/2/09 n. 617, 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 200/2004. Per interventi in campo sismico l'uso dei materiali FRP è autorizzato per il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- aumento della resistenza al taglio di pilastri e pareti mediante applicazione di fasce con le fibre disposte secondo la direzione delle staffe;
- aumento della resistenza di travi e pilastri mediante applicazione di fasce con le fibre disposte secondo la direzione delle barre longitudinali ed opportunamente ancorate;
- aumento della duttilità nelle parti terminali di travi e pilastri mediante fasciatura con fibre continue disposte lungo il perimetro;
- miglioramento dell'efficienza delle giunzioni per sovrapposizione, sempre mediante fasciatura con fibre continue disposte lungo il perimetro;
- cerchiature esterne di elementi murari, purché i tratti rettilinei della cerchiatura non siano troppo estesi e si smussino gli spigoli;
- iniezioni armate nelle strutture murarie;
- rinforzi delle strutture voltate, purché si evitino i meccanismi di spinta a vuoto;
- irrigidimento dei solai lignei mediante placcaggio incrociato.

4. Quali sono i vantaggi e gli svantaggi degli FRP per interventi di riparazione / rinforzo

Il successo dei materiali FRP deriva essenzialmente da tre proprietà: la maggiore durabilità del materiale rispetto agli acciai tradizionali, la leggerezza e la possibilità di ottimizzare le proprietà meccaniche del materiale per lo scopo specifico dell'intervento. Su quest'ultimo aspetto bisogna chiarire che, sebbene siano infinite le possibilità di combinazione di filamenti, numero di strati e orientamenti, solo alcune definite famiglie di prodotti FRP sono destinate ad un uso corrente nel modo dell'edilizia.

Esiste, infatti, una notevole differenza tra fibre di carbonio, di vetro e di aramide, in particolare per quanto riguarda:

- le proprietà meccaniche di resistenza e modulo elastico in 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 vi sono diverse qualità, 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, comporta 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 640 GPa a 230 GPa.

I filamenti di carbonio, pertanto, possiedono rigidità 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.

Al contempo 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, al contempo il modulo elastico in 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.

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

La famiglia dei filamenti di fibra aramidica ha resistenze e moduli elastici intermedi ai precedenti.

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

È altresì noto che le fibre aramidiche sublimano intorno a 400°C.

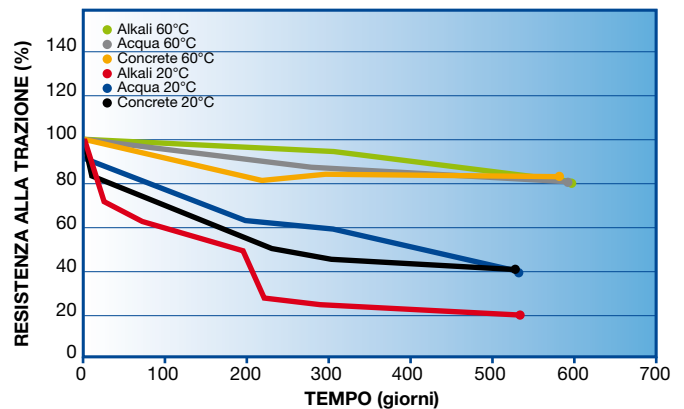
In funzione poi dell'aggressività dell'ambiente cui è posta l'opera da rinforzare e del regime tensionale permanente sulle fibre, tutte le raccomandazioni internazionali reperibili introducono coefficienti riduttivi delle resistenze caratteristiche dichiarate dal Produttore, al fine di pervenire ad un "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, vedi Tab. 2.

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.

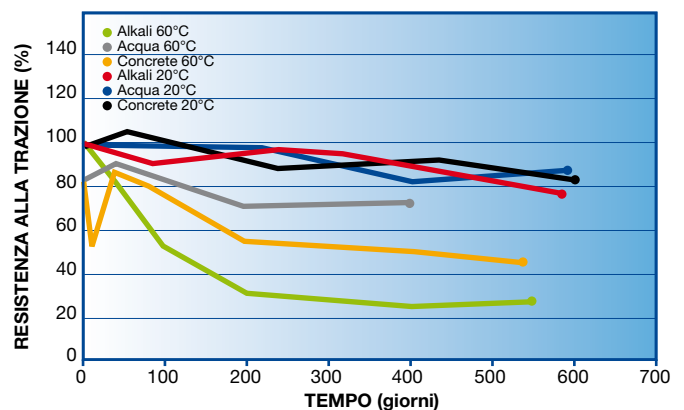
Non esiste una precisa normativa che classifica i polimeri per le applicazioni nel settore delle costruzioni, né è pensabile di identificare una formulazione ottima, che risolva, cioè, tutti i problemi specifici dell'ingegneria delle costruzioni: durabilità, resistenza al calore, propagazione della fiamma,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

Il raggiungimento di un obiettivo spesso comporta la perdita di un altro requisito utile.

Basf ha scelto tre diverse formulazioni di polimero al fine di ottimizzare, per ciascuna famiglia di prodotti FRP, alcune specifiche caratteristiche.



4.1 Dati tipici di barre in fibra di vetro E + resina poliesteri immerse nella matrice di cemento; dopo circa 1-2 anni la riduzione di resistenza nell'ambiente alcalino è molto rilevante



4.2 Dati tipici di barre in fibra di vetro AR + resina vinilesteri, immerse nella matrice di cemento; dopo circa 1-2 anni la riduzione di resistenza nell'ambiente alcalino è molto rilevante solo in presenza di ambiente alcalino

5. Regole generali per la buona riuscita di un intervento di riparazione / rinforzo

Molto spesso nella progettazione/realizzazione di un intervento di rinforzo con FRP vengono tralasciati importanti aspetti. Da questo testo si estraggono alcune indicazioni pratiche basate sull'evidenza sperimentale, riassunte nei 3 punti seguenti.

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 a lato).

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 (max. 6 strati di tessuto), l'impiego di fasce ad U trasversali di tessuto (vedi figura a lato).



b) SPINTA A VUOTO:

si devono evitare i “punti di spinta a vuoto”. Il fenomeno, ben noto ai progettisti di strutture in c.a., si manifesta come mostra lo schema della Figura seguente. Quando il rinforzo assume sforzo di trazione si stacca per la modesta resistenza a trazione posseduta dall’adesivo.



c) PREPARAZIONE SUPERFICIALE:

quando il supporto esistente è degradato, non coerente, non planare, l'intervento di placcaggio con FRP deve essere preceduto da una scarifica profonda e dalla adozione di una malta da riparazione avente stabilità volumetrica, elevata adesione al supporto, compatibilità di modulo elastico ed elevata energia di frattura dell'interfaccia. La linea Emaco Formula, in special modo i prodotti fibrorinforzati come Emaco Formula Tixofiber, Emaco Tixo Fiber, Emaco Fast Fiber ed Emaco SFR, hanno prodotto risultati sperimentali di grande rilievo. Quando invece il calcestruzzo di supporto è di buona qualità, allora occorre una idrosabbatura che metta in vista l'inerte (vedi figura a lato), in sintesi la semplice pulizia del supporto NON è sufficiente.



d) OTTIMIZZAZIONE DEL RINFORZO FIBROSO:

è importante ottimizzare il prodotto fibroso per la particolare applicazione che si deve realizzare. Per gli interventi di rinforzo a flessione o a taglio di travi e pilastri 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 bi direzionali o quadriassiali, purchè si garantisca una adeguata lunghezza di sovrapposizione per ciascuna direzione. Questa lunghezza di sovrapposizione è consigliata almeno pari a 20 cm e deve essere certificata dal Produttore del sistema di rinforzo con specifiche prove di trazione. Si evidenzia inoltre che l'impregnazione di tessuti multidirezionali risulta piuttosto difficile, considerando la presenza di filato disposto secondo differenti direzioni.

6. Regole basilari per la progettazione

6.1 RINFORZI A FLESSIONE

Le raccomandazioni italiane, ed i test di verifica compiuti da BASF, 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. 1a), dove la massima tensione di compressione è $f_{cd}=0.83 \times 0.85 \times R_{ck} / 1.5$ alla deformazione dello 0.0035;
- l'acciaio è considerato elasto-plastico vedi Fig. 1b);
- MBrace è considerato un "sistema certificato" ai sensi della Tab. 3.2 del documento CNR DT 200/2004, avente cioè controllo di qualità su lotto di produzione e schede tecniche conformi ai requisiti richiesti dal CNR DT 200/2004. Il legame costitutivo è riportato in Fig. 1c);
- MBrace 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.

Le seguenti relazioni, allora, legano le deformazioni della fibra a quella del calcestruzzo e a quella dell'acciaio, vedi Fig. 2:

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

Nel calcolo di progetto o di verifica, perciò, si dovranno

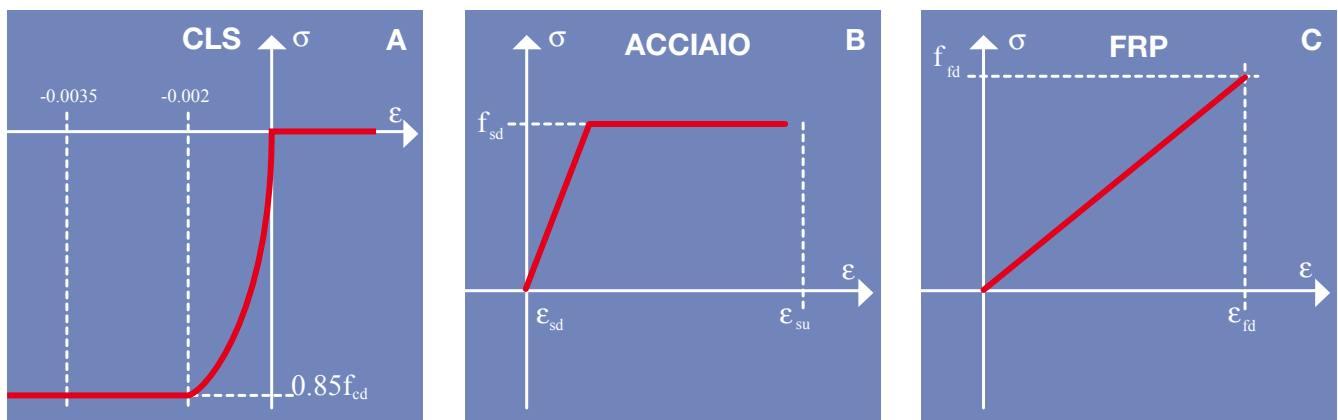
eseguire quattro analisi:

a) valutare le tensioni iniziali nel conglomerato e nell'acciaio al momento dell'esecuzione del rinforzo e la deformazione ϵ_{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'armatura $< 0.8 f_{yk}$. Se questa situazione NON è verificata si deve scaricare o puntellare la trave;

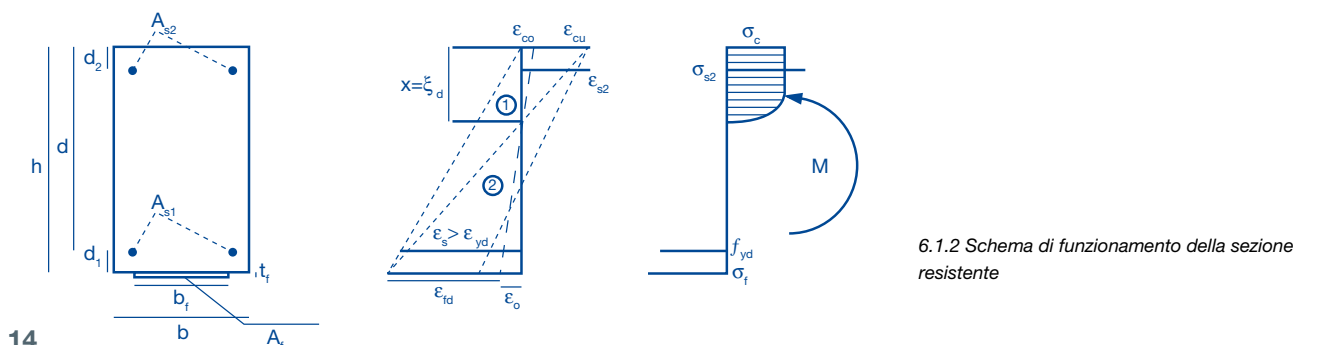
b) determinare il momento resistente ultimo M_{Ru} tenendo conto dei fattori di sicurezza da applicare sulla resistenza a trazione caratteristica. Se M_{Ru} è maggiore delle sollecitazioni esterne si procede al passo seguente;

c) determinare il momento resistente di servizio M_{Rs} e verificare che il calcestruzzo possieda tensione complessiva di compressione $< 0.45 f_{ck}$ e l'acciaio possieda tensione complessiva $< 0.8 f_{yk}$. 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 fibroso. In effetti l'inerzia della trave rinforzata non si modifica sostanzialmente, mentre aumentano i carichi esterni che vengono sostenuti dalla stessa.



6.1.1 Legami costitutivi per conglomerato (A), acciaio (B) ed MBrace (C)



6.1.2 Schema di funzionamento della sezione resistente

La raccomandazione CNR DT 200/2004 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. Acciaio e fibra FRP, quindi, compartecipano 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.

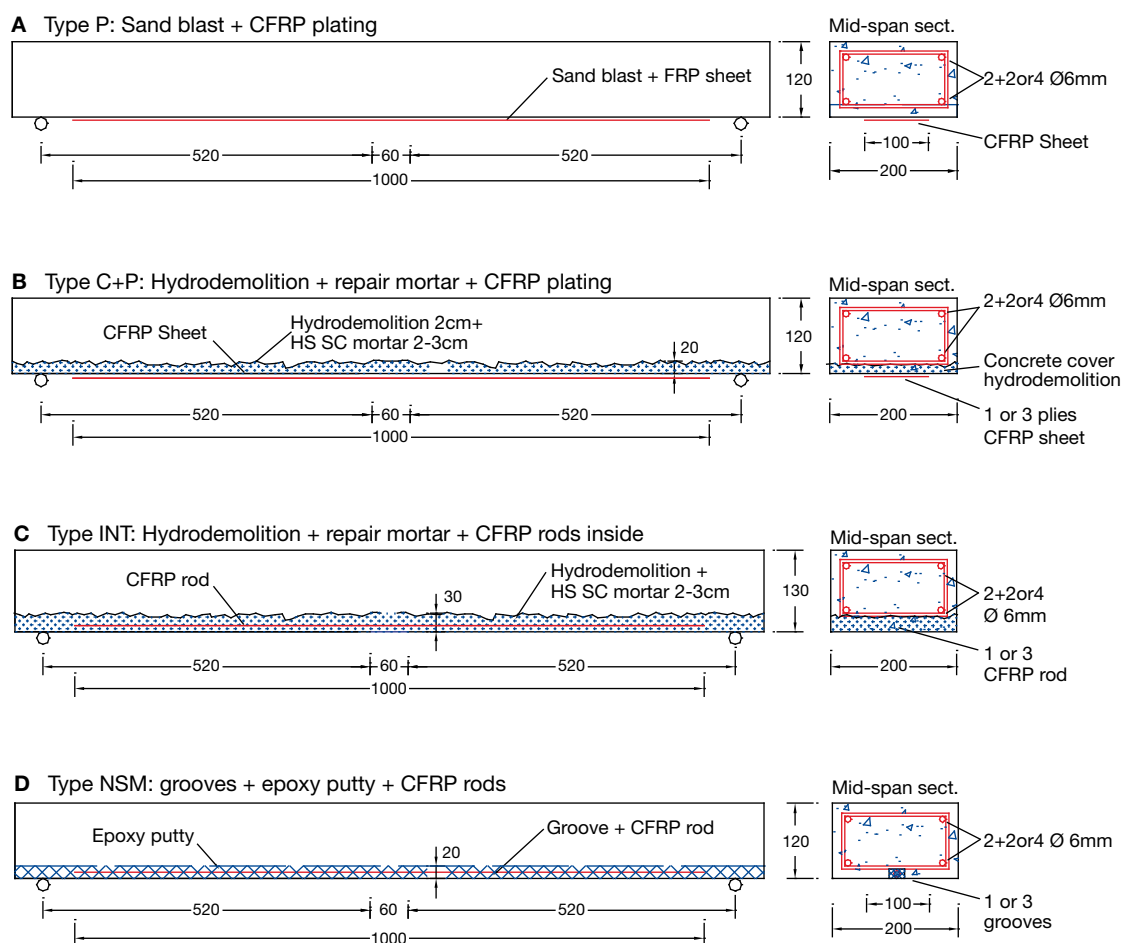
Sebbene una gran quantità di studi abbiano riguardato l'incollaggio di lamiere e tessuti su travi in c.a. nuove (vedi schema di Fig. 6.3 A) e a questi tipi di elementi strutturali si rivolge il CNR DT 200/2004, il maggior campo di applicazione per questa tecnologia è il rinforzo di una trave vetusta, 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. 6.3 B, 6.3 C, 6.3 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 3x3cm circa, realizzate (evidentemente su calcestruzzo di buona qualità) con bilama.

Le ragioni del rifacimento 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.

Purtroppo su questo aspetto il CNR DT 200/2004 non formula specifiche considerazioni, e sono pochi, infatti, i sistemi di rinforzo integrati: malte di ripristino - FRP. Ancora nessuna specifica indicazione è offerta per le tecnologie che prevedano l'inserimento del rinforzo all'interno del ripristino.

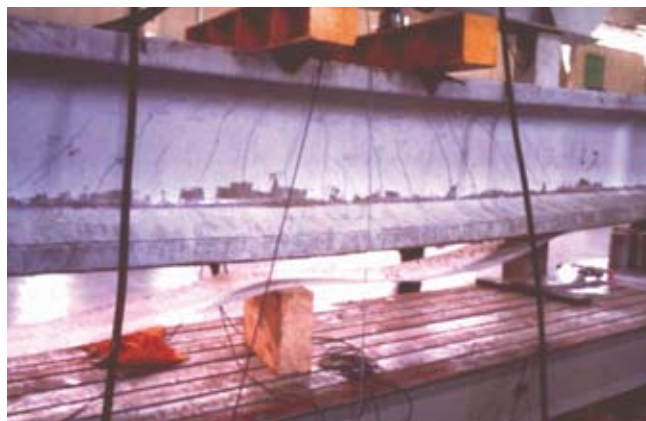


6.1.3 - I principali metodi di rinforzo a flessione

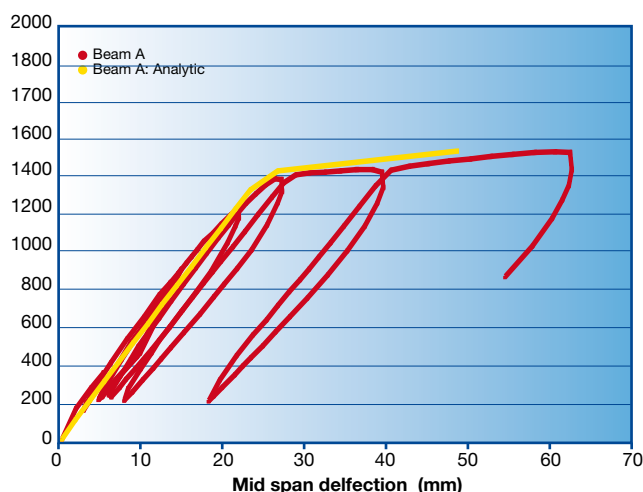
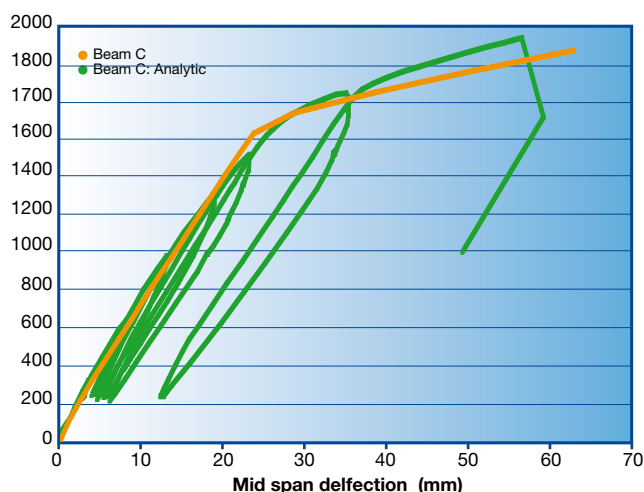
Un altro aspetto molto importante, sebbene spesso trascurato, è la garanzia della risposta elastica per quelle combinazioni di carico che si possono considerare frequenti o permanenti (combinazioni di carico di servizio). È abbastanza ovvio che l'aumento della resistenza, dovuto alla fibra, si ottenga insieme allo snervamento delle armature di acciaio e alla comparsa di un esteso quadro fessurativo, vedi 6.4.

Oltre alla verifica del momento resistente, quindi, occorre identificare il momento massimo della risposta elastica e l'ampiezza delle fessure alla sollecitazione di stato limite di servizio.

Su questi aspetti il CNR DT 200/2004 è lacunoso, ma come si vedrà nella sezione dedicata alle prove sperimentali, la sua identificazione permetterà di ottenere adeguati coefficienti di sicurezza.



6.1.5 Test a rottura a flessione



6.1.4 L'incremento di resistenza è ottenuto a scapito dello snervamento delle armature interne e alla comparsa di un esteso quadro fessurativo

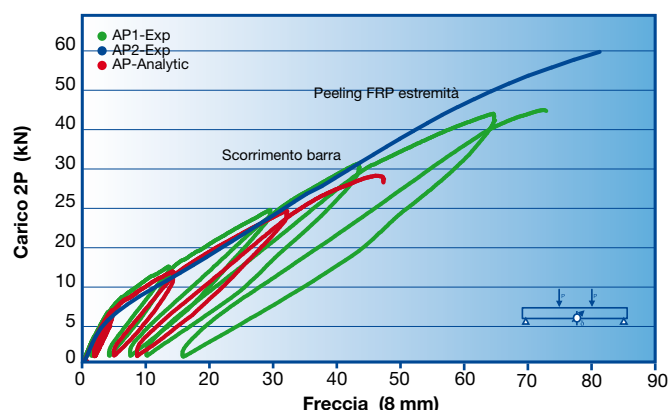
Nella normativa CNR DT 200/2004 vi sono 3 importanti parametri che il Produttore del “sistema di rinforzo” è tenuto a certificare e mostrare nella scheda tecnica:

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 G

Essi sono legati dalle equazioni seguenti:

$$f_{fd} = \min\left(\eta_a \frac{f_{fk}}{\gamma_m}, f_{fdd}\right) \quad f_{fdd,2} = \frac{3}{\gamma_{fd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{Fk}}{t_f}} \quad \Gamma_{Fk} = \alpha k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}$$

Se non sono forniti specifici dati sull'energia di frattura di interfaccia, la norma italiana fissa $\alpha=0.03$. Su questo aspetto la norma non chiarisce quali siano le prove sperimentali utili alla caratterizzazione; inoltre, alcuni ricercatori hanno osservato una grande variazione del valore di α con la bontà e l'accuratezza della preparazione superficiale e con il tipo di malta da riparazione. La 6.8, ad esempio, mostra come si riduca il carico massimo rispetto a quello potenzialmente ottenibile semplicemente non avendo sabbiato con cura il supporto. Senza una adeguata preparazione superficiale la delaminazione si manifesta inaspettatamente a carichi sensibilmente inferiori a quelli teoricamente raggiungibili.



6.1.6 La differenza di risposta carico-freccia tra un campione placcato con preventiva sabbiatura ed un campione placcato con preventivo idrolavaggio



6.1.7 Negli interventi di placcaggio la sabbiatura è indispensabile



6.1.8 Negli interventi di rifacimento dei copriferro l'idroscarifica ad alta pressione consente una adeguata adesione di interfaccia

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

- **tipo di conglomerato esistenti**, 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 della prima;
- **entità dell'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 rifacimento del copriferro e il successivo incollaggio del rinforzo avvengono in regime dinamico (traffico aperto) e restano attivi solo per l'incremento di carico;

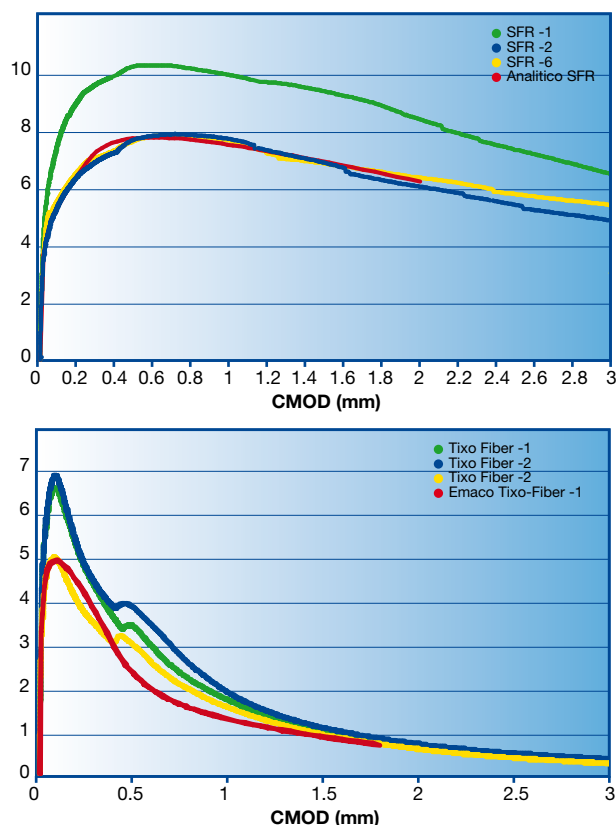
- **tipo di ambiente**: in presenza di umidità elevata le resine di incollaggio presentano polimerizzazioni problematiche, in presenza di acqua salata i calcestruzzi porosi possono degradare più velocemente le loro proprietà meccaniche di interfaccia e l'acciaio può continuare a corrodersi se il copriferro risulta fessurato;
- **tipo di malta da riparazione**: in commercio esistono malte cementizie di differenti caratteristiche reologiche: malte espansive all'aria (linea Emaco Formula), malte fibrorinforzate con fibre polimeriche dotate di una modesta "duttilità", malte di elevatissima resistenza a trazione ma perfettamente fragili, malte cementizie normali che ritirano, ecc.

In termini energetici tali malte mostrano una resistenza alla propagazione della fessura molto differenti l'una dall'altra, vedi 6.9.

- **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 riparazione e rinforzo;

- **tipo di rinforzo:** i materiali resistenti a trazione applicati nella zona tesa 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.



6.1.9 L'energia di frattura di alcune malte della linea Emaco (Emaco Formula Tixo, Emaco Formula Tixofiber, Emaco SFR)

La norma del CNR DT 200/2004, infine, dovrebbe tendere a fornire un progetto "sufficientemente sicuro", cioè un progetto in cui il rapporto γ tra carico massimo reale e carico limite ultimo di progetto, vedi Fig. 6.10, sia almeno pari a 1.5, cioè al fine di disporre di una adeguata sicurezza a lungo termine, o, almeno, poter disporre di una sicurezza a lungo termine simile a quella correntemente impiegata per i metodi standard del costruire.

Questa valutazione, come potrete verificare nel capitolo dedicato agli approfondimenti tecnici, non è sempre vera.

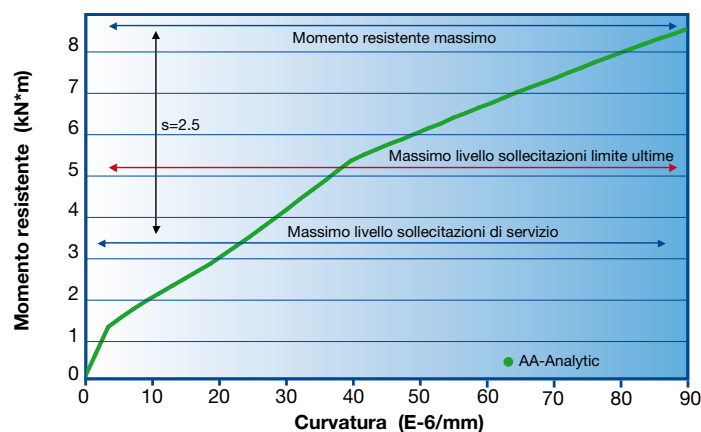


Fig. 6.1.10 Valutazione del coefficiente di sicurezza g

6.2 RINFORZI A TAGLIO

Il meccanismo del taglio è spesso modellato con il traliccio di resistenza di Moersch. 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 200/2004 la resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata secondo la relazione:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,ct} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max})$$

dove:

$V_{Rd,ct}$ = contributo a taglio del calcestruzzo calcolato secondo la normativa vigente;

$V_{Rd,s}$ = contributo a taglio delle staffe calcolato secondo la normativa vigente;

$V_{Rd,f}$ = contributo a taglio del rinforzo FRP valutato come nel seguito riportato;

$V_{Rd,max}$ = resistenza della biella compressa di 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 del calcolo valutata ai successivi punti 2.1 e 2.2;

t_f = spessore delle fasce di tessuto;

w_f = larghezza delle fasce di tessuto;

p_f = passo delle fasce di tessuto;

θ = angolo di inclinazione delle fessure a taglio rispetto all'asse dell'elemento (45°);

β = angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse dell'elemento.

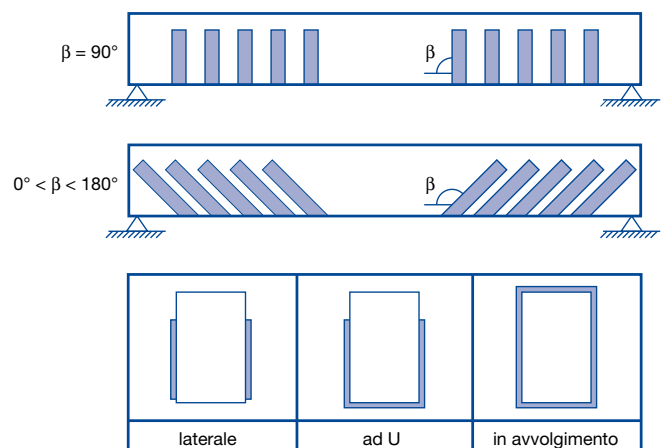
Gli schemi di riferimento sono illustrati nella Figura 6.11.

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 cls o dalla rottura a trazione della fibra, vedi schema di 6.10



6.2.1 Fasciature MBrace Alto Modulo ad U per il rinforzo al taglio



6.2.2 Schemi di rinforzo al taglio con FRP

6.3 RINFORZI A 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, ad esempio mentre si accorcia, si schiaccia, subisce una dilatazione trasversale che è pari a circa il 15% 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.

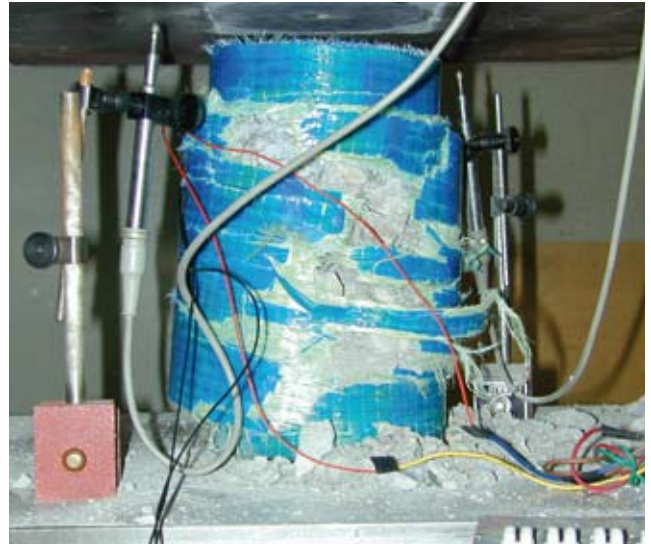
I test di verifica sperimentale individuano i seguenti benefici strutturali:

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

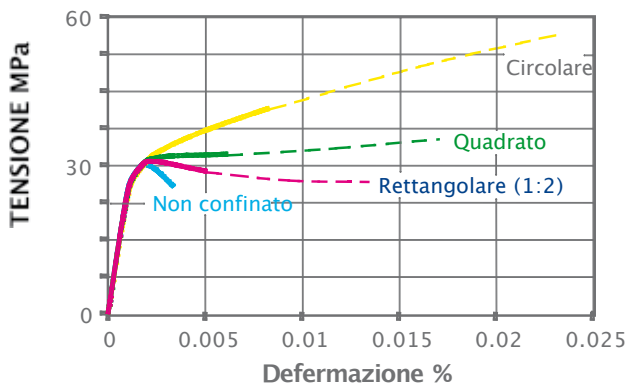
L'area sottesa dal diagramma carico assiale ed accorciamento assiale aumenta fortemente dal caso non confinato a quello confinato. Il primo risultato è importante per interventi di riparazione o rinforzo, il secondo è utilissimo per l'incremento della sicurezza contro azioni sismiche. L'efficacia della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



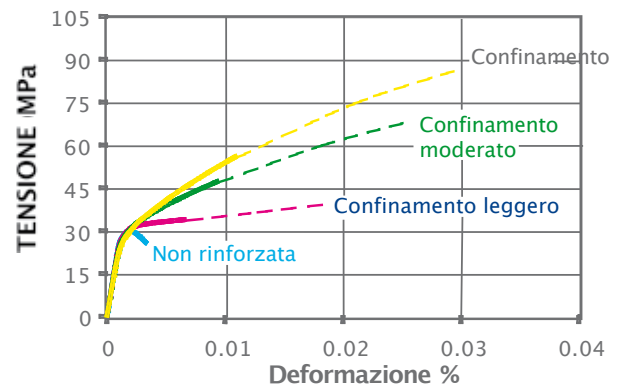
6.3.1 Confinamento pilastro in cemento armato



6.3.2 Prove di rottura a compressione di pilastri in c.a.



6.3.3 Variazione del grado di rinforzo al variare della forma dell'elemento cerchiato



6.3.4 Variazione degli incrementi di resistenza al variare dell'entità di rinforzo

La raccomandazione del CNR DT 200/2004 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.

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

dove:

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

D = diametro della sezione trasversale;

t_f = spessore totale del tessuto MBrace impiegato;

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

b_f = larghezza del tessuto;

p_f = passo delle strisce di tessuto;

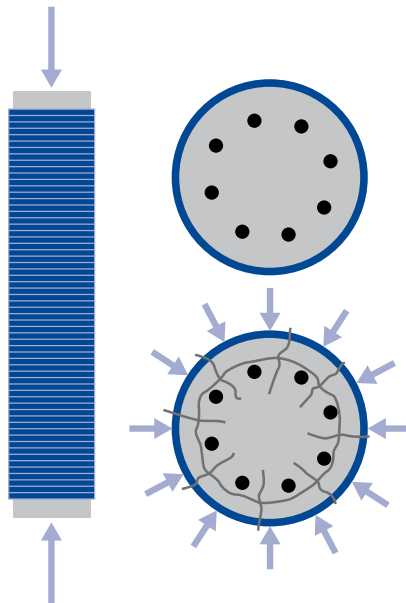
$\epsilon_{fd,rid}$ = deformazione limite dell'FRP valutata come:

$$\min \left[\frac{\eta_a \cdot \epsilon_{fk}}{\gamma_f}, 0.004 \right]$$

dove il coefficiente ambientale η_a è il fattore di sicurezza γ_f per il confinamento vale 1.1, trattandosi di "sistema certificato" e la deformazione caratteristica a rottura ϵ_{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.



6.3.3 Schemi di rinforzo per confinamento con tessuto FRP

7. Sistema composito fibroso MBrace / MBar esempi di applicazione

I compositi fibrosi MBrace / MBar si possono impiegare ogni qualvolta vi sia da assorbire uno sforzo di trazione pura o di trazione prodotta dalla flessione o dal taglio. Basf ha condotto innumerevoli test e ricerche sperimentali in ognuno degli ambiti sotto indicati. Vediamo i casi più classici:

- Portali
- Nodi trave colonna
- Rinforzo travi da ponte ammalorate
- Rinforzo di solai
- Rinforzo di capriate
- Rinforzo di travi in c.a.
- Rinforzo strutture in legno
- Rinforzo strutture in muratura

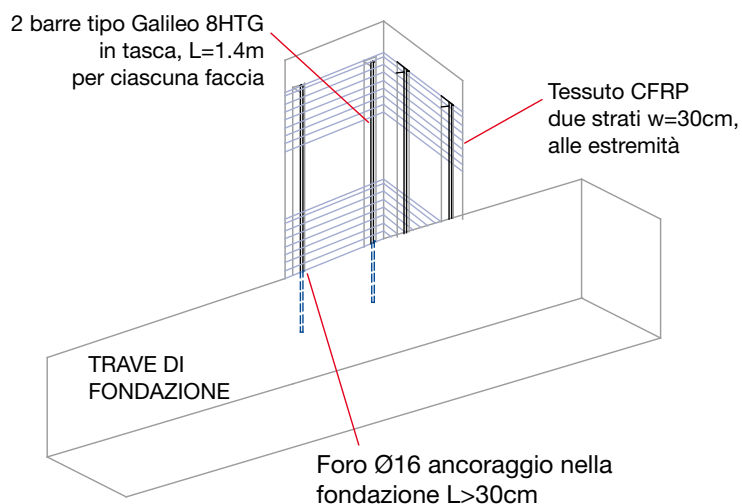
7.1 PORTALI

La trave di sommità è soggetta ad un carico verticale, il pilastro di destra 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 MBrace, 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 MBar in tasca, vedi gli schemi nel seguito riportati.

Terminato il rinforzo flessionale si applicano fasciature orizzontali anti delaminazione.



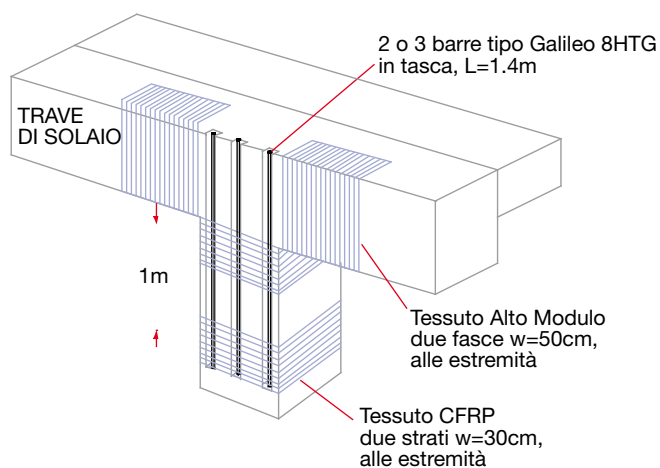
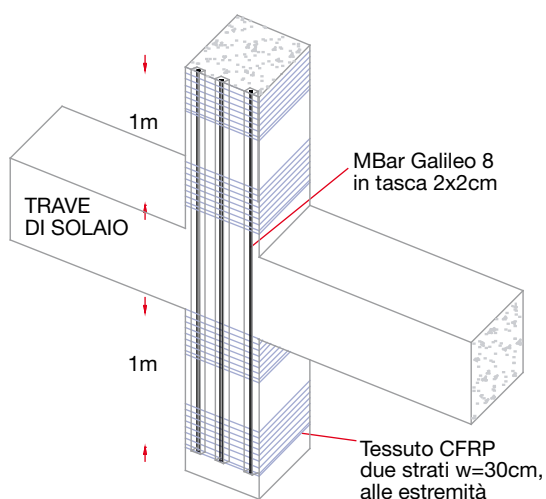
7.2 I NODI TRAVE-COLONNA

I nodi trave-colonna sono comunemente sottodimensionati ai carichi sismici, hanno poche armature verticali perché prevalentemente calcolati per sforzo assiale puro. L'incremento di resistenza può essere ottenuto facilmente nei riguardi della flessione con l'inserimento di MBar in fori passanti di piccolo diametro.

Gli schemi seguenti mostrano alcune modalità pratiche per realizzare il rinforzo. BASF dispone di una serie corposa di risultati sperimentali condotti su provini al vero e sottoposti a carichi orizzontali ciclici simulanti il sisma.

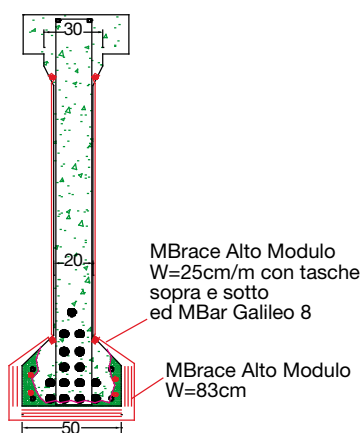
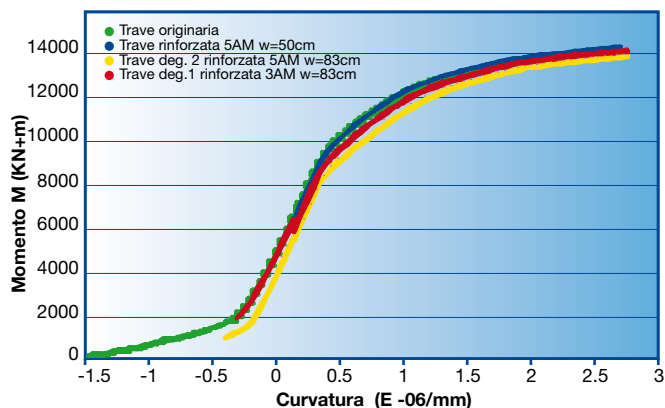
Nel caso in cui il pilastro sia soggetto a flessione e con una azione assiale minima, tipica situazione da sisma, si ottengono maggiori benefici in termini di resistenza andando ad incrementare l'armatura longitudinale. Due sono le tecniche operative che si consigliano:

- per pilastri con modesto carico assiale di compressione ed elevato M si indica la tecnica N.S.M. (Near Surface Mounted) che consiste nell'inserimento di barre in fibra di carbonio in tasche 2x2cm sigillate con pasta epossidica;
- per pilastri con carico assiale di compressione rilevante ma sezione parzializzata si indica il rifacimento del copriferro con malta cementizia ad espansione contrastata in aria Emaco Tixo Fiber, inserimento nella malta di MBar Galileo e fasciatura orizzontale di 1 fascia di 2 strati di MBrace CFRP di altezza pari alla lunghezza delle MBar.



7.3 RINFORZO DI TRAVI DA PONTE AMMALORATE

Questa è una situazione molto comune nel nostro Paese, a causa della vetustà delle costruzioni e all'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 Emaco, ed è più conveniente optare per l'inserimento di barre MBar 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-cls fino al raggiungimento della tensione ultima di lavoro della fibra secondo CNR DT 200. La trave rinforzata con MBrace - MBar riacquista, in modo molto semplice, una resistenza a rottura maggiore o uguale a quella originaria.

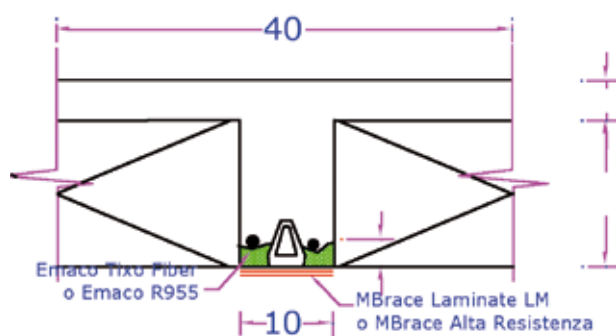


7.4 RINFORZO DI SOLAI

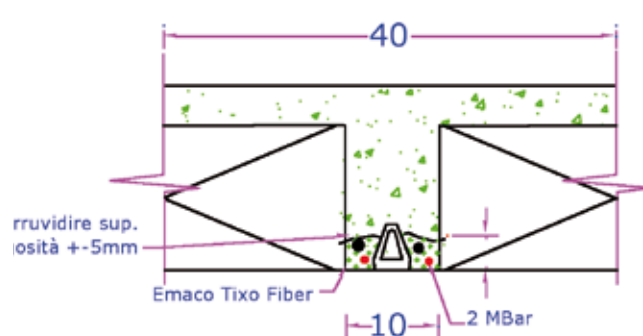
È l'intervento più comune; con l'incollaggio di lamine o di strisce di tessuto MBrace si ottiene l'incremento di resistenza a flessione. Nei casi più comuni è sufficiente l'apporto di un MBrace Laminare LM 50x1.4mm per avere un 20-25% di incremento di resistenza. Esistono anche casi particolari dove il degrado del travetto è rilevante e l'armatura esistente di intradosso è corrosa. In questi casi è indispensabile procedere sia al rinforzo sia al ripristino del calcestruzzo di copriferro. Per questi casi BASF mette a disposizione del progettista la combinazione delle malte Emaco Formula con MBar Galileo 8 HTG. Ancora una volta si comprende come sia importante disporre di un sistema di rinforzo completamente integrato. Le malte Emaco, con la loro elevata resistenza ed aderenza al supporto e la loro perfetta aderenza all'armatura MBar consentono il recupero della originaria resistenza della struttura riparata. Le barre MBar, inoltre, sono specificatamente studiate per garantire una resistenza alle elevate temperature.



RINFORZO CON MBRACE



RINFORZO CON MBAR



7.5 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 MBrace / MBar disponendo i filamenti FRP nella direzione longitudinale dello stesso.

Il tessuto, in particolare, ha una versatilità molto importante, per superare brillantemente il problema dell'ancoraggio di estremità. Infatti, è sufficiente risvoltare il tessuto stesso sulle facce ortogonali, oppure estenderlo sull'intero tirante e richiuderlo su se stesso per almeno 20 cm a formare così una vera e propria cintura.



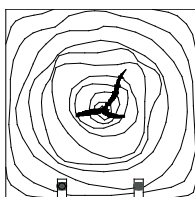
7.6 RINFORZO DI TRAVI IN C.A.

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.

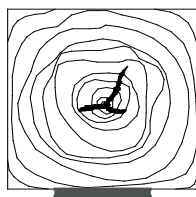
La trave non ha sufficiente armatura sulle pareti laterali. Con la tecnologia MBar si può limitare lo spessore del ringrosso a soli 3-4 cm, in quello spazio esiguo trovano alloggio barre MBar Galileo con lo scopo di aumentare notevolmente la resistenza a flessione deviata.

7.7 RINFORZO DI ELEMENTI IN LEGNO

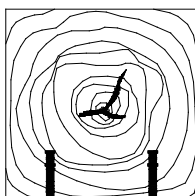
Il rinforzo a flessione di strutture in legno può essere realizzato con barre e lamine di FRP incollate sulla superficie esterna della trave o all'interno di appositi alloggiamenti predisposti nel corpo della trave. Gli schemi seguenti illustrano alcune possibilità di intervento.



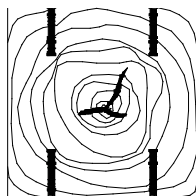
Applicazione barre in zona tesa



Applicazione lamine esterne in zona tesa



Applicazione lamine interne in zona tesa

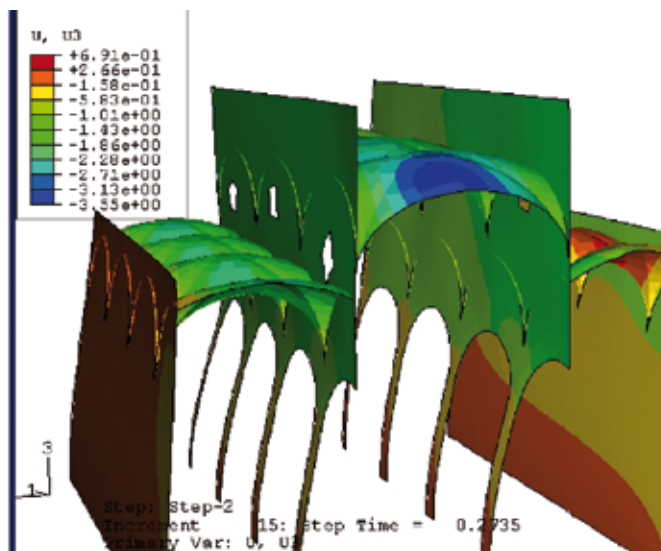
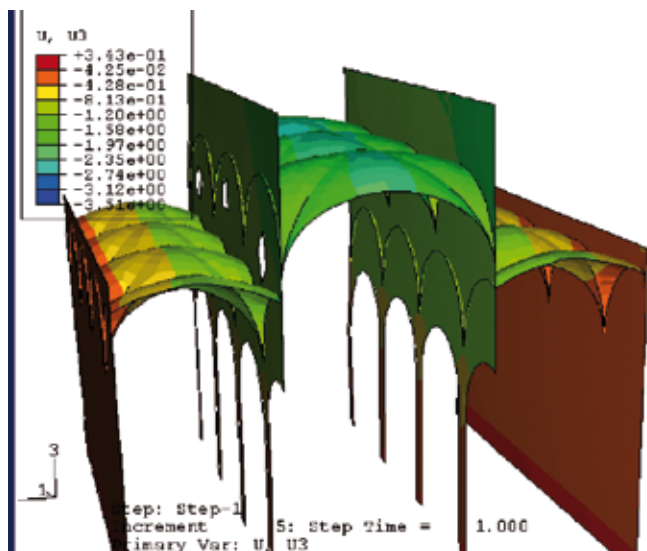
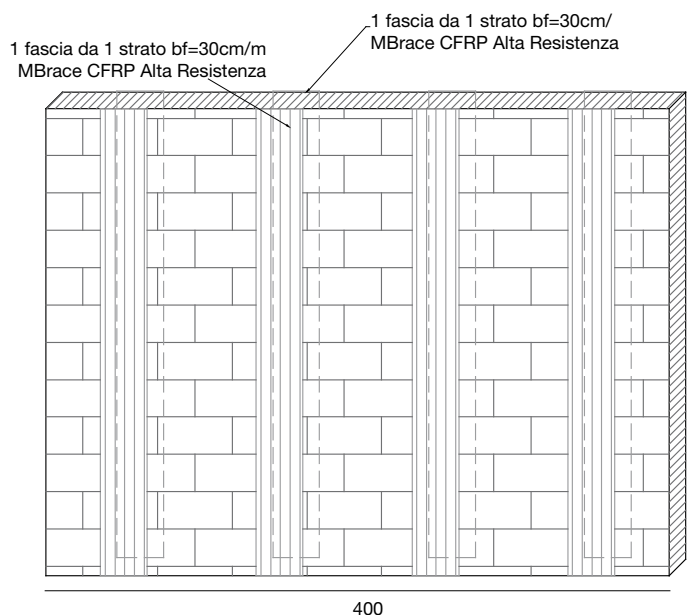


Applicazione lamine interne in zona tesa e compressa



7.8 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 si presenti danneggiata o disomogenea prima dell'applicazione del rinforzo si dovrà prevedere un preconsolidamento con tecniche tradizionali (cuciscuci, 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 è in modo di rottura fragile. Molte sono le applicazioni effettuate, alcune delle quali illustrate nelle foto seguenti.



8. Prodotti BASF per il rinforzo di strutture

BASF propone una organica gamma di prodotti FRP.

Vediamo nel dettaglio:

8.1 TESSUTI

La gamma di prodotti BASF comprende tessuti monodirezionali, con le prestazioni di seguito riportate:



	MBrace Fibre Alta resistenza	MBrace Fibre Alto modulo	MBrace Fibre Aramide	MBrace Fibre Vetro	MBrace CFRP Alta resistenza
Tipo di fibra	Carbonio	Carbonio	Aramidica	Vetro alcali resistente	Carbonio
Spessore equivalente di tessuto secco	0.165 mm	0.165 mm	0.214 mm	0.230 mm	0.165 mm
Modulo elastico medio a trazione, ASTM D3039	230.000 MPa	390.000 MPa	105.000 MPa	65.000 MPa	230.000 MPa
Deformazione ultima media a trazione, ASTM D3039	1.3 %	0.8 %	1.7 %	2.5 %	1 %
Resistenza caratteristica a trazione f_{tk} , ASTM D3039	2.500 MPa	2.500 MPa	1.500 MPa	1.300 MPa	1.500 MPa

N.B. Resistenza caratteristica = resistenza media - 3 x scarto quadratico medio

8.2 RETI

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



	MBRACE FIBRENET CF 200B	MBRACE FIBRENET CF 160	MBRACE FIBRENET GA 120B
Tipo di fibra	Carbonio	Carbonio	Vetro alcali resistente
Densità superficiale	200 g/m ²	160 g/m ²	120 g/m ²
Distribuzione filato nelle due direzioni (trama-ordito)	Bilanciata (50-50%)	80-20 %	Bilanciata (50-50%)
Modulo elastico caratteristico a trazione, ASTM D3039	230.000 MPa	230.000 MPa	65.000 MPa
Deformazione ultima, ASTM D3039	1,5%	1,5 %	2,5 %
Resistenza caratteristica a trazione f_{tk} , ASTM D3039	> 2500 MPa	> 2500 MPa	1.300 MPa

N.B. Resistenza caratteristica = resistenza media - 3 x scarto quadratico medio

8.3 BARRE

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



	MBAR Galileo HTG 8	MBAR Galileo HTG 10	MBAR Leonardo HTG 8	MBAR Leonardo HTG 10
Sezione nominale	50 mm ²	78,5 mm ²	78,5 mm ²	78,5 mm ²
Diametro nominale	8 mm	10 mm	10 mm	10 mm
Resistenza a trazione caratteristica f_{tk} , ASTM D3039	1.800 MPa	1.800 MPa	2.300 MPa	2.300 MPa
Modulo elastico medio, ASTM D3039	130.000 MPa	130.000 MPa	200.000 MPa	200.000 MPa
Deformazione ultima media, ASTM D3039	1,8%	1,8%	1,5%	1,5%
Temperatura di transizione vetrosa, ASTM E1356 o ASTM E1640	> 250°C	> 250°C	--	--

N.B. Resistenza caratteristica = resistenza media - 3 x scarto quadratico medio

8.4 LAMINE

MBrace Laminate 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 plaqué) di elementi in calcestruzzo, legno ed acciaio. È disponibile in varie configurazioni, come indicato nella tabella di seguito riportata:



	MBRACE Laminate LM 5/1,4	MBRACE Laminate LM 10/1,4	MBRACE Laminate HM 5/1,4	MBRACE Laminate HM 15/1,4
Resistenza a trazione caratteristica f_{tk} , ASTM D3039	2.300 MPa	2.300 MPa	2.050 MPa	2.300 MPa
Modulo elastico medio a trazione, ASTM D3039	165.000 MPa	165.000 MPa	200.000 MPa	250.000 MPa
Deformazione ultima media a trazione, ASTM D3039	1,8 %	1,8 %	1,4 %	1,4 %
Spessore nominale	1,4 mm	1,4 mm	1,4 mm	1,4 mm
Larghezza	5 cm	10 cm	5 cm	15 cm

N.B. Resistenza caratteristica = resistenza media - 3 x scarto quadratico medio

8.5 ADESIVI ED ACCESSORI

La gamma dei prodotti BASF per il rinforzo di strutture è completata da resine epossidiche strutturali, connettori in carbonio (**MBrace Connect**), ancoraggi per barre (**MBar Ancoraggio**), malte cementizie (Linea Emaco e Albaria) ed accessori per la corretta ed efficace applicazione dei materiali compositi.



9. Sistema composito fibroso MBrace / MBar: strumenti per la progettazione

BASF mette a disposizione dei Progettisti strumenti fondamentali, quali:

- **DOCUMENTAZIONE TECNICA**, dove specifici esempi sono svolti passo-passo al fine di spiegare in dettaglio la procedura di calcolo a flessione, a taglio e a confinamento;
- **SERVIZIO DI CONSULENZA**; BASF mette a disposizione dei propri clienti, Professionisti qualificati con cui colloquiare ed ottenere soluzioni personalizzate ai più disparati problemi strutturali;
- **VOCI DI CAPITOLATO E ANALISI PREZZI** per poter riportare le informazioni corrette all'interno dei documenti amministrativi e di contabilità, al fine di assicurare che il progetto corrisponda perfettamente con la realizzazione finale;
- **SOFTWARE MBRACE-MBAR** per la verifica a flessione di sezioni in c.a. rettangolari a T e a doppio T riparate con malte Emaco e rinforzate con FRP. Con questo strumento le verifiche a flessione sono condotte in modo molto semplice. Il software è caratterizzato da una verifica sperimentale diretta che garantisce, soddisfacendo tutti i requisiti previsti, un fattore di sicurezza sempre maggiore di 1.5 nei riguardi della reale crisi strutturale.

La verifica è basata sulle raccomandazioni del Comitato CNR DT 200 - 2004 per "Applicazioni TIPO 1" ed è specificatamente tarata per i sistemi di rinforzo denominati MBrace / MBar prodotti e distribuiti in Italia da BASF Construction Chemicals. Tre sono le tecniche qui considerate:

- **Placcaggio**: cioè incollaggio in zona tesa di tessuti o lamine MBrace;
- **Ringrosso + Placcaggio**: cioè ripristino del copriferro ed eventuale modesto ringrosso con malte della linea Emaco e successivo placcaggio dei prodotti FRP;
- **Ringrosso + Barre**: cioè inserimento nel ripristino di Emaco di barre in fibra di carbonio MBar Galileo.

Il software è il risultato di una esperienza sperimentale, di ricerca ed applicativa durata circa 10 anni. I risultati ottenuti, confrontati con una serie molto corposa di dati sperimentali dimostrano che il coefficiente di sicurezza che si raggiunge con il metodo adottato è sempre superiore a 1.5, per una disamina di quanto asserito si invita il lettore a consultare il capitolo degli approfondimenti tecnici. Per ulteriori approfondimenti contattare il servizio tecnico BASF.



Il software è scritto in Visual Basic, compilato in formato .exe, compatibile con sistemi operativi Windows XP e superiori. Risolve sezioni in calcestruzzo armato rettangolari a T, T rovescia e doppio T con una fila di armature posta all'estradosso (zona compressa) ed una fila all'intradosso (zona tesa). Una sola unità di misura è pre-impostata: tutte le dimensioni devono essere imputate in millimetri, tutte le sollecitazioni in N*mm. Il programma ha campi attivi, cioè sensibili alla posizione del mouse, posizionando quindi il mouse sopra alle celle si otterrà un menu a tendina con alcune utili indicazioni. Cliccando sul file si apre la schermata iniziale dove si trovano i quattro essenziali passaggi per svolgere la progettazione:

Menu 1: Definisci la sezione resistente

Menu 2: Definisci il tipo di intervento

Menu 3: Definisci il tipo di rinforzo

Menu 4: Esegui la verifica

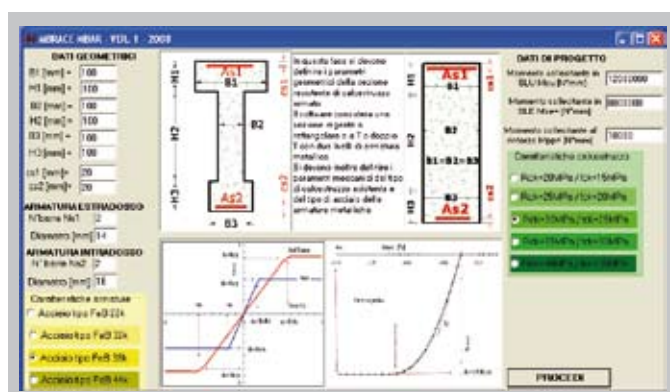
Entriamo nel dettaglio di ciascuna schermata.

MENU 1

DEFINISCI LA SEZIONE RESISTENTE

In questa sezione del programma si devono inserire i dati della sezione resistente attuale:

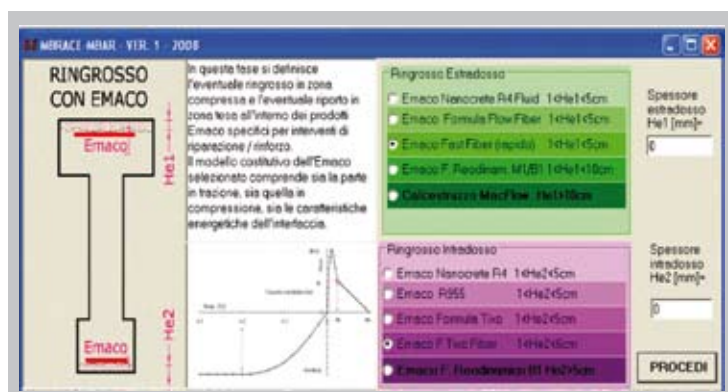
- Larghezza ala superiore B1
- Larghezza anima B2
- Larghezza ala inferiore B3
- Altezza ala superiore H1
- Altezza anima H2
- Altezza ala inferiore H3
- Copriferro superiore cs1 ed inferiore cs2
- N° barre superiore ed inferiore di acciaio Ns1 e Ns2
- Diametro delle armature di acciaio
- Qualità del calcestruzzo e dell'acciaio
- Momento sollecitante di progetto Msu
- Momento sollecitante in Stato Limite di Servizio
- Momento sollecitante presente quando si rinforza la trave. Quest'ultimo parametro deve essere ben ponderato, senza scaricare la trave prima del rinforzo la fibra non fornirà alcun contributo alla resistenza.



MENU 2

DEFINISCI IL TIPO DI INTERVENTO

In questa sezione del programma si deve decidere quale intervento di ripristino è necessario prima di procedere al rinforzo. All'intradosso e/o all'estradosso, infatti, può essere necessario realizzare il rifacimento del copriferro, oppure un vero e proprio ringrosso centimetrico. Per tutte queste operazioni il Progettista può scegliere tra 5 malte Emaco colabili (indicate per riporti all'estradosso) e 5 malte tixotropiche (indicate per ripristini a spruzzo dell'intradosso). Ciascun prodotto ha particolari specificità in termini di aderenza, energia di frattura di interfaccia, resistenza a compressione e modulo elastico.

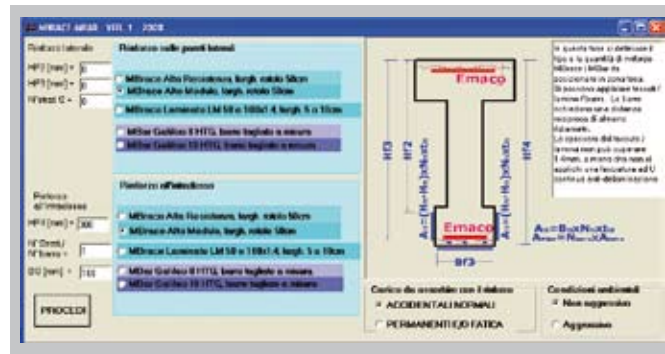


MENU 3

DEFINISCI IL TIPO DI RINFORZO

In questa sezione del programma si devono inserire i dati del rinforzo MBrace / MBar che si vuole impiegare.

Il rinforzo può essere inserito sia all'intradosso e sulle pareti laterali, ci sono alcune limitazioni sul numero massimo degli strati e/o sulle spessore del laminato, si veda al proposito il capitolo dedicato all'approfondimento tecnico. Il Progettista deve, inoltre, scegliere il tipo di aggressività ambientale in cui si trova l'elemento strutturale da rinforzare e se la sollecitazione prevalente è di tipo permanente (ad esempio impianti industriali o altre applicazioni dove la percentuale del carico permanente assorbito dal rinforzo è prevalente rispetto a quella accidentale).



MENU 4

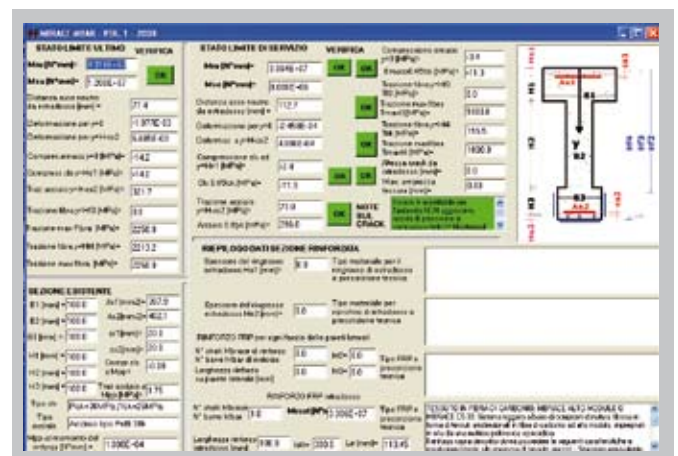
ESEGUI LA VERIFICA

Durante la fase di inserimento dati possono apparire alcune schermate di avviso riguardanti errori di battitura, parametri fuori standard ecc. Si deve ottemperare alle prescrizioni per poter ritornare alla schermata iniziale ed essere pronti ad eseguire la verifica. Cliccando su 4 - Esegui la verifica si lancia la procedura iterativa basata sui concetti prima evidenziati ed aderente con le indicazioni della norma CNR DT 200/2004. In pochi secondi dovrebbe apparire la schermata seguente contenente il risultato della verifica. In caso contrario sarà necessario ricominciare l'intera procedura di input, avendo cura di verificare con esattezza i numeri inseriti.

Il menu dei risultati contiene tutte le informazioni necessarie per la verifica a flessione. Se tutte le verifiche sono OK con sfondo verde la sezione è verificata, la schermata può essere salvata cliccando ctrl+stamp e salvando l'immagine nel proprio foglio di lavoro. Nel menu principale si attiva la possibilità di salvare i dati di input cliccando sul menu a tendina file - save input data. Ricordarsi di salvare i dati con nome file.txt in questo modo potranno essere riutilizzati senza dover digitare nuovamente i dati semplicemente usando il menu a tendina file - open input file.

Più complessa la situazione se almeno una delle verifiche riporta NO su sfondo rosso. A questo punto si tratta di comprendere quale possa essere l'entità del rinforzo aggiuntivo necessario.

Nella zona inferiore della schermata di output sono riportati i segni distintivi del rinforzo selezionato. Come si è compreso dai ragionamenti precedenti, la soluzione progettuale che si ottiene è personalizzata sulla base dei materiali scelti, perché i parametri di interfaccia e le prestazioni meccaniche che intervengono nel calcolo sono specifici per i materiali selezionati. Per questo motivo vengono riportate le prescrizioni meccaniche da inserire nel capitolato, senza queste prescrizioni il progetto NON è completo e l'applicazione non può garantire la corrispondenza con il progetto.



Soluzioni intelligenti per il mondo delle Costruzioni

Ovunque guardiate, in qualsiasi tipo di edificio o di struttura di ingegneria civile, sopra terra o sotto terra, troverete uno dei nostri marchi, con la funzione di migliorare, proteggere o conservare il Vostro mondo.

EMACO® - Sistemi per il ripristino del calcestruzzo

MBrace® - Sistemi per il rinforzo strutturale con materiali compositi

EMACO® S55/S33 - Ancoraggi di precisione

MASTERFLEX® - Sigillanti elastomerici per giunti

MASTERSEAL® - Rivestimenti protettivi e sistemi impermeabilizzanti

UCRETE® - Sistemi di pavimentazioni ad alte prestazioni

MASTERTOP® - Pavimenti decorativi e industriali

CONCRESEIVE® - Malte, adesivi e sistemi di iniezione a base di resine

CONIDECK - Sistemi di rivestimento con membrane impermeabilizzanti

CONIROOF - Sistemi di copertura poliuretanici

CONICA® - Pavimentazioni sportive

GLENIUM®, RHEOBUILD® e POZZOLITH® - Additivi per calcestruzzo

PCI® - Sistemi per la posa di piastrelle, sottofondi cementizi e sistemi impermeabilizzanti

THORO® - Impermeabilizzazione e deumidificazione delle strutture

ALBARIA® - Sistemi per il recupero delle murature

**BASF Construction
Chemicals Italia Spa**
Via Vicinale delle Corti, 21
31100 Treviso - Italy

Tel: +39 0422 304251
Fax: +39 0422 421802
www.basf-cc.it
e-mail: infomac@basf.com