

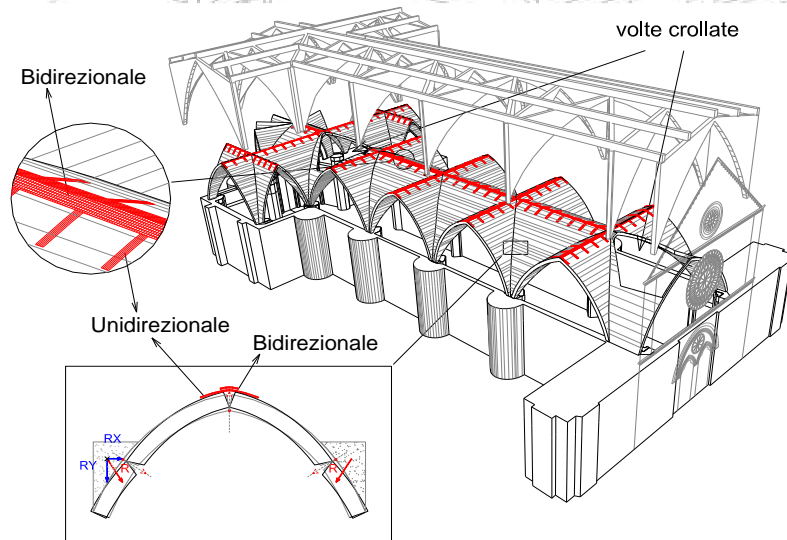


RESTAURO MONUMENTALE E ARCHITETTONICO
CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE

IL RINFORZO CON NASTRI E TESSUTI IN FIBRA DI
CARBONIO
PER CONSOLIDAMENTI INNOVATIVI E ANTISMICI

Carboniar®

DRAPPEGGIABILTA'
LEGGEREZZA
RESISTENZA



LA "FASCIA" CHE RINFORZA LE STRUTTURE CON
LEGGEREZZA ED EFFICACIA

Il sistema Carboniar®

Il sistema Carboniar® nasce nel 1996 a seguito di una specifica richiesta della Soprintendenza ai Beni Architettonici di Verona in merito al rinforzo di volte in laterizio di Villa Caldogno di A. Palladio – in Caldogno (VI). La richiesta era motivata dal fatto che il rinforzo previsto (cappa di calcestruzzo o malta di resina epossidica, armati) non poteva essere realizzato per motivi di spessore in quanto si sarebbe superata la quota originaria con perdita di antichi pavimenti in battuto veneziano. La nostra proposta si concretizzò nell'utilizzo delle fibre di carbonio, fino ad allora ai primordi nel settore delle costruzioni storiche. La ricerca avviata, le indagini di laboratorio e la realizzazione dell'opera furono momenti esaltanti per le grandi prospettive che si intravedevano. Da qui è nata l'idea del Carboniar®, un sistema di materiali, prove sperimentali e realizzazioni sul campo che ci ha accompagnato fino ad oggi. Nella continuità con quanto avviato nel '96, oggi possiamo presentare la linea IARnet®, un sistema di rinforzo costituito da rete in carbonio avente per matrice calce idraulica naturale, IAR CALX ROMANA, che rende il rinforzo efficace e perfettamente traspirante (vedere scheda specifica).

Le nostre proposte di intervento sono sempre state in linea con le indicazioni del CNR, ed ora anche con gli indirizzi operativi del Dipartimento della Protezione Civile nelle sue: “Linee guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni”, in fatto di restauri in zona sismica.

La società IAR.
Revisione Ottobre 2009

1.0 I SISTEMI COMPOSITI IN GENERALE

2.0 IL **Carboniar®**

2.1 *Caratteristiche e proprietà meccaniche delle fibre del sistema Carboniar®*

2.2 *Standard qualitativo del sistema Carboniar®*

2.3 *Durabilità degli interventi con sistema Carboniar® – l'Eurocodice 8*

2.4 *Comportamento agli UV, alle temperature di esercizio ed al fuoco dei materiali compositi*

2.5 *L'effetto protettivo del sistema Carboniar®, il controllo dello stato fessurativo, la vita utile della struttura*

2.6 *L'anisotropia delle fibre di carbonio, i criteri di scelta del materiale*

3.0 TIPOLOGIE DI INTERVENTO REALIZZABILI CON IL **Carboniar®**

4.0 CONSERVAZIONE E RECUPERO DEI BENI STORICI

4.1 *Principi generali*

4.2 *Il sistema Carboniar® per il recupero di edifici e monumenti storici; il pronto intervento sulle volte della Basilica Superiore di Assisi*

4.3 *Modelli di calcolo per il rinforzo con sistema Carboniar®*

4.4 *Prove di laboratorio*

4.4.1 *Adhesion Test*

4.4.2 *Pressoflessione*

4.4.3 *Confinamento di pilastri in muratura*

4.5 *Analisi delle variazioni di rigidità di elementi portanti rinforzati con il sistema Carboniar®*

4.6 *Le raccomandazioni degli Eurocodici, in particolare sulla durabilità*

4.7 *I trattamenti di finitura*

5.0 IL **Carboniar®** PER IL RECUPERO DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

5.1 *Il rinforzo a flessione; generalità*

5.1.1 *Modello di calcolo*

5.1.2 *Meccanismi di collasso di travi rinforzate con sistemi compositi*

5.1.3 *Prove di laboratorio a flessione*

5.2 *Il rinforzo a taglio; generalità e modello di calcolo*

5.3 *Il rinforzo a compressione mediante confinamento; generalità*

5.3.1 *Modello di calcolo*

5.3.2 *Prove di laboratorio a confinamento*

5.4 *Prove di adesione*

5.5 *L'adeguamento strutturale di edifici in c.a. in zone sismiche*

5.6 *La normativa*

5.7 *Voce di capitolato*

1.0 I SISTEMI COMPOSITI IN GENERALE

Con il termine *composito* s'identifica ogni materiale in cui una o più fasi discontinue, generalmente costituite da materiali di elevate caratteristiche meccaniche (rinforzo), sono annegate in una fase continua (matrice).

Gli antichi egizi, mescolando argilla e paglia, fabbricavano mattoni in materiale composito.

I compositi, di cui tratteremo in questa sede, sono realizzati in fibre di carbonio ed individuati dall'acronimo CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) (fig.1).

Le fibre costituiscono l'elemento di rinforzo vero e proprio mentre la matrice, costituita da resina epossidica, rende collaborante il rinforzo con la struttura e consente la *ridistribuzione* delle tensioni causate dai carichi esterni; il risultato è un materiale che combina alti valori di resistenza e rigidità con ottime caratteristiche di leggerezza e durabilità, essendo i CFRP sostanzialmente immuni da problemi di corrosione.

Gli elementi in fibre di carbonio sono formati da gruppi di filamenti continui, costituiti da cristalli di grafite derivati da un sottoprodotto dell'industria petrolifera (denominato poliacrilonitrile - PAN), ed ottenuti mediante una serie di gradienti di riscaldamento ad alte temperature.

I materiali compositi annoverano tutta una serie di caratteristiche ottimali, quali:

- l'eccellente spettro prestazionale con pesi contenuti;
- l'efficace comportamento in caso di evento sismico;
- la straordinaria resistenza a fatica;
- la chemioresistenza nei confronti di solventi, acidi e basi;
- lo spessore irrilevante;
- la drappeggiabilità, che li rende adattabili a forme comunque complesse, nel caso di tessuti secchi (wet lay-up).

L'esperienza dei compositi nell'ingegneria risale ad oltre 50 anni nel settore aerospaziale, e ad oltre 20 anni nel settore civile, nel quale l'impiego preponderante è quello del *ripristino strutturale*, del *pronto intervento per la messa in sicurezza di edifici storici e moderni danneggiati da sisma* e del *consolidamento*

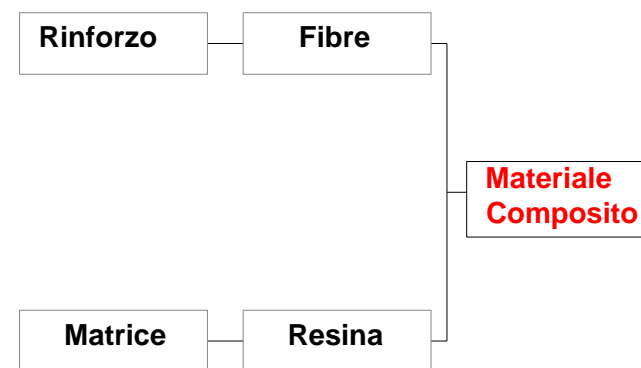


Figura 1

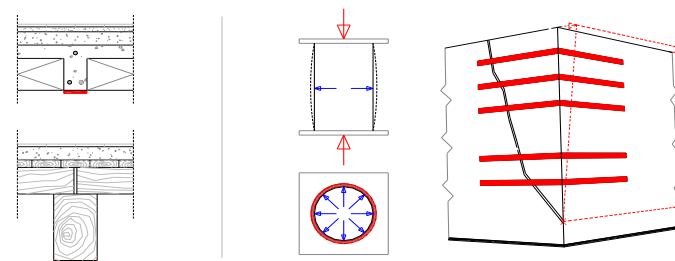


Figura 2

preventivo di manufatti, dove i compositi trovano naturale applicazione nel placcaggio di elementi prevalentemente inflessi, nel confinamento di elementi prevalentemente compressi, e nella 'legatura' di edifici in muratura (fig.2).

In tali applicazioni i materiali compositi si propongono dunque come vantaggiosa alternativa all'acciaio.

I materiali compositi fibrorinforzati possono essere ottenuti seguendo due diverse impostazioni:

- *nella prima*, resina e fibre sono assemblate direttamente in stabilimento facendo ricorso a pressioni e temperature elevate, tecnica cosiddetta della *pultrusione*. Si ottengono così delle lamine di spessore superiore al millimetro, generalmente con le fibre disposte ad andamento unidirezionale.
- *nella seconda*, invece, si utilizza la tessitura delle fibre di carbonio per ottenere nastri e tessuti secchi, che consentono di creare il composito direttamente in opera, per impregnazione e saturazione, come nel caso del sistema Carboniar®.

2.0 IL SISTEMA Carboniar®

Carboniar® è molto più di un semplice materiale: è un *sistema* costituito da ricerca e sviluppo, prove di laboratorio, elaborazione di modelli di calcolo, studio di fattibilità, analisi preliminare dei costi, sviluppo del progetto, sia architettonico che strutturale, collaborazione con docenti universitari e laboratori autorizzati, convegni di livello internazionale, sviluppo di tesi sia in facoltà di Architettura che di Ingegneria, realizzazione e collaudo dei lavori.

Questo consente di offrire al progettista procedimenti di calcolo sia alle tensioni ammissibili che agli stati limite ultimi, sviluppabili con metodi tradizionali oppure con adeguati software ottenuti dall'analisi scientifica di prove di laboratorio che individuano il reale comportamento della struttura rinforzata.

La proposta della IAR consente quindi una visione complessiva, in quanto vengono analizzate tutte le variabili del progetto di consolidamento.

L'elemento di rinforzo del sistema Carboniar® è un nastro secco di fibre di carbonio, perfettamente drappeggiabile e permeabile dalla resina epossidica

costituente la matrice: questo consente di creare in opera un rinforzo monolitico, anziché un semplice incollaggio.

La IAR ha particolarmente curato il ciclo applicativo, ottenendo risultati che assicurano l'assoluta adesione del rinforzo al supporto ed evitano la *delaminazione per eccesso di tensioni tangenziali*, che può verificarsi con cicli non altrettanto validi o con materiali di diversa concezione; ne consegue che i limiti dell'intervento vanno individuati esclusivamente nelle caratteristiche di resistenza del supporto, sul quale il sistema Carboniar® va a produrre un effetto di rafforzamento.

2.1 **Caratteristiche e proprietà meccaniche delle fibre del sistema Carboniar®**

- *Peso assolutamente contenuto*: in genere < 1% del peso proprio della struttura da rinforzare, il che risulta particolarmente vantaggioso in presenza di eventi sismici.
- *Spessore estremamente ridotto*: circa 1 mm.
- *Reversibilità dell'intervento*: è possibile la rimozione dei nastri con opportuno trattamento ad aria calda.
- *Compatibilità con il supporto*: valutata solamente nei confronti della resina poiché le fibre di carbonio, materiale peraltro chimicamente neutro, non vengono a contatto con le superfici da rinforzare. In tal senso i risultati sono molto confortanti, sia per l'inerzia chimica delle resine epossidiche e sia, nel caso di strutture armate, per la protezione che le stesse producono nei confronti delle armature (si genera un ambiente a pH > 13 e quindi decisamente passivante).
- *Inerzia all'umidità*: il carbonio assorbe quantità di umidità irrilevanti e tali da non pregiudicare la qualità dell'adesione; tale caratteristica è fondamentale per interventi nel settore edile, condizionato dalle caratteristiche idrometriche del cantiere spesso sfavorevoli, anche per la sola umidità contenuta nell'aria.
- *Tempi di intervento e di messa in esercizio molto contenuti*.
- *Resistenza a compressione paragonabile a quella a trazione*, a differenza di altri tipi di fibre sintetiche.
- *Elevata bagnabilità da parte delle resine*.
- *Mantenimento dell'agibilità delle strutture durante la fase applicativa* nella

maggior parte dei casi.

- *Chemoresistenza*, in particolare in ambiente alcalino;
- *Interventi di rapida esecuzione*: non sono richieste attrezzature particolari di sollevamento o per la posa.
- *Possibilità di far coincidere la larghezza della struttura da rinforzare con quella del rinforzo* riducendone di conseguenza lo spessore a parità di sezione resistente; in tale modo si riducono drasticamente le pericolose tensioni tangenziali all'interfaccia (fig.3).

L'elemento resistente del sistema è costituito da fibre di carbonio di seconda generazione le cui caratteristiche sono (fibre standard, dette ad alta resistenza – sigla HR, High Resistance):

- | | |
|--|------------------------|
| • Resistenza a trazione MPa | 4.900 |
| • Modulo elastico GPa | 230 |
| • Allungamento a rottura % | 2.1 |
| • Densità gr/cm ³ | 1.8 |
| • Coefficiente di dilatazione termica °C ⁻¹ | - 0,4·10 ⁻⁶ |
- (valore irrilevante e comunque negativo)

Tali rinforzi sono ottenibili con pesi per unità di area variabili da 300 a 1200 gr/m²; le grammature più alte, abitualmente necessarie nel settore edile, consentono di evitare numerose sovrapposizioni di strati.

Molto significativi risultano poi i rapporti di *resistenza a trazione/densità* e di *modulo elastico/densità*, che raffrontati con gli analoghi valori dell'acciaio danno rispettivamente 2,7 MPa/kgm⁻³ e 130 MPa/kgm⁻³ per il carbonio e 0,07 – 26 per l'acciaio FeB44K.

I dati dimostrano che a parità di peso la superiorità delle fibre è nettissima, anche rispetto all'acciaio da precompresso.

Per specifici consolidamenti flessionali, la IAR propone l'impiego di fibre aventi modulo elastico più elevato rispetto alle fibre ad alta resistenza, e pari a 377 Gpa (sigla HM, High Modulus); queste fibre hanno resistenza a trazione pari a 4.400 MPa ed allungamento a rottura 1.2 %.

I rinforzi in fibre di carbonio del sistema Carboniar® sono accompagnati da un "Test

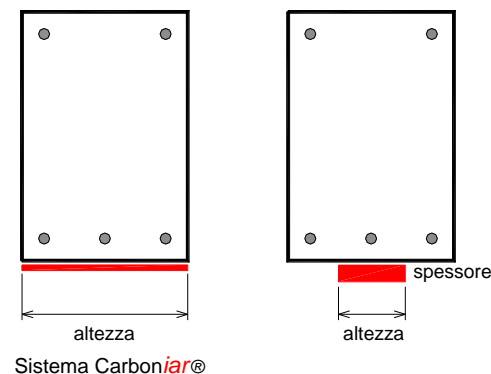


Figura 3

Report" del produttore delle fibre, dove sono certificate le caratteristiche meccaniche.

Nastri e tessuti unidirezionali sono dotati di *indicatore di corretta impregnazione*, che consente di verificare il grado di saturazione del tessuto, il che di fatto attesta l'efficacia della collaborazione tra rinforzo e struttura da rinforzare

2.2 Standard qualitativo del Sistema Carboniar®

Il sistema Carboniar® garantisce elevate prestazioni, purché supportato da una corretta progettazione e dal rispetto del ciclo applicativo.

Per questi motivi la IAR non propone la vendita dei materiali costituenti il proprio sistema, bensì offre al Committente l'assistenza in fase di progettazione, con adeguati modelli di calcolo, e la realizzazione dell'intervento tramite proprio personale specializzato ed esperto.

I criteri progettuali e i modelli di calcolo sono avallati dalla ricerca scientifica e sperimentale che la IAR realizza in collaborazione con atenei italiani ed esteri.

Le elevate prestazioni del sistema Carboniar® sono ascrivibili in particolare alla drappeggiabilità del nastro, o del tessuto, ed alla permeazione della resina nel supporto e attraverso le fibre, che avviene in fase applicativa, cosa non possibile per i rinforzi ottenuti da pultrusione e per i tessuti pre-impregnati di resina. Infatti, le varie fasi del ciclo, compiutamente realizzate nel rispetto dei tempi di catalizzazione della resina, consentono di formare un tutto omogeneo e monolitico grazie alla reticolazione tridimensionale delle resine epossidiche.

2.3 Durabilità degli interventi con sistema Carboniar®

La letteratura tecnica sulle fibre di carbonio indica che in un periodo di circa 50 anni non si manifestano riduzioni nelle caratteristiche meccaniche.

La resina epossidica utilizzata nel sistema Carboniar® è certificata ISO 9001 ed il produttore dichiara che per almeno 40 anni non si hanno riduzioni nelle caratteristiche della resina tali da pregiudicare l'efficacia dell'adesione. E' comunque opportuno, secondo le indicazioni degli Eurocodici, programmare già in fase progettuale controlli periodici per individuare eventuali necessità di

manutenzioni o sostituzioni, facilmente attuabili grazie alla reversibilità.

2.4 Comportamento agli UV, alle temperature di esercizio e al fuoco dei sistemi compositi

Nel caso di applicazioni all'esterno, è bene utilizzare resine epossidiche o poliuretatiche resistenti agli UV, oppure proteggere il rinforzo con intonaco.

La temperatura di esercizio del sistema Carboniar® è compresa tra - 40°C e +80°C; in caso di temperature di esercizio continuative maggiori di *80 °C è necessario proteggere il sistema mediante opportuno isolamento termico, realizzabile con uno speciale intonaco o con un pannello termoisolante.

Il problema va affrontato con la dovuta attenzione: spesso la protezione non è necessaria per la funzione di “incremento dei carichi accidentali” che è chiamato a svolgere il rinforzo in CFRP, come previsto anche dagli Eurocodici.

Nel caso invece la protezione risulti necessaria, la normativa per la “Determinazione della resistenza al fuoco secondo i criteri della stabilità al fuoco (R), della tenuta al fuoco (E), dell’isolamento termico (I)” (circolare 52 del 20 novembre 1982) consente di raggiungere, sulla faccia non esposta al fuoco, la temperatura di 150 °C; poiché tale temperatura è collassante per la resina epossidica costituente la matrice, occorre verificare in tal senso la scelta del sistema termoisolante.

Nella combustione le resine epossidiche utilizzate nel sistema Carboniar® raggiungono un limite di tossicità inferiore al valore massimo consentito (pari a 2), secondo le norme CEI – N 50267/CEI 20-37 parte 2; quindi non emettono sostanze tossiche.

2.5 L'effetto protettivo del sistema Carboniar®, il controllo dello stato fessurativo, la vita utile della struttura

Molto positivo risulta l'effetto indotto dal sistema Carboniar®, grazie anche all'efficace controllo dello stato fessurativo della struttura rinforzata. Ne consegue che si passa da uno stato fessurativo collassante (poche fessure molto aperte), ad

una serie di microfessure distribuite, il che significa, oltre alle migliorie strutturali, ottenere anche un consistente aumento della vita utile della struttura ed una drastica riduzione dei costi di manutenzione.

L'intervento consente dunque di soddisfare le direttive sugli stati limite di fessurazione, secondo le indicazioni dell'Eurocodice EC2.

2.6 L'anisotropia delle fibre di carbonio; i criteri di scelta del materiale

Le caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio sono fortemente influenzate dall'angolo tra la direzione delle tensioni di trazione e l'asse delle fibre.

Resistenza e rigidità raggiungono i massimi valori quando tale angolo assume il valore zero, e i valori minimi, di fatto solo quelli della resina, quando l'angolo assume il valore 90°. Ne deriva una importante riflessione: i materiali compositi, a differenza degli acciai, sono materiali a comportamento anisotropo: ciò non costituisce un inconveniente, ma è indispensabile conoscere tale caratteristica e tenerne conto in fase progettuale; infatti se l'angolo risulta pari a 90° i materiali compositi non sono efficaci.

Poiché progettualmente interessa il comportamento a trazione nella direzione delle fibre, l'anisotropia permette di ritagliare le proprietà del rinforzo su misura per i requisiti di progetto; consente cioè di applicare un rinforzo in grado di esplicare le proprie resistenze nelle direzioni dove servono e non in altre direzioni, dove sarebbero superflue.

Per questo motivo i rinforzi in materiali compositi vengono definiti "tailor made" anche in senso progettuale.

In altri termini viene offerta al progettista la possibilità di scegliere il rinforzo strutturale "su misura", anche se contestualmente viene richiesto un maggior impegno progettuale, poiché aumenta la gamma di soluzioni disponibili.

Il sistema Carboniar® mette a disposizione del progettista diverse tipologie di nastri e tessuti in fibre di carbonio; la differenza tra i termini "nastri" e "tessuti" è sostanzialmente solo formale, intendendosi con nastri i materiali di minore altezza (fino a 20 cm) e con tessuti i materiali aventi altezza maggiore.

Tali rinforzi sono caratterizzati dal diverso orientamento delle fibre (fig.4):

- 1) di tipo *unidirezionale*, in cui le fibre sono orientate secondo un'unica direzione
- 2) di tipo *bidirezionale*, in cui le fibre sono orientate secondo le direzioni 0° e 90°
- 3) di tipo *biassiale*, con fibre inclinate a $\pm 45^\circ$.

Questa grande flessibilità di tipologie, dimensioni e grammatura, caratteristica esclusiva del sistema Carboniar®, consente di individuare per ogni caso la soluzione ottimale, evitando sprechi di materiale ed eccessive sovrapposizioni di strati che, nel caso di rinforzi massicci, potrebbero indurre ad errori di non rispetto dei tempi di catalizzazione della resina epossidica di incollaggio e quindi pericolose delaminazioni.

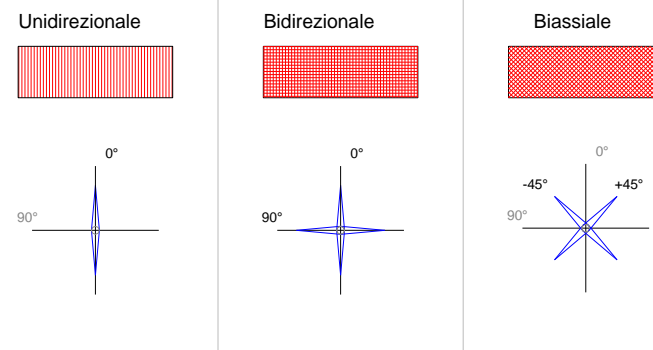


Figura 4

3.0 TIPOLOGIE DI INTERVENTO REALIZZABILI CON IL SISTEMA Carboniar®

Sinteticamente, i principali utilizzi del sistema Carboniar® sono i seguenti:

Nelle strutture in muratura:

- per la legatura di edifici lesionati (o parti di essi) in modo da conferire il comportamento scatolare all'intera struttura;
- per il contenimento dei fuori-piombo;
- per l'assorbimento dei carichi di trazione derivanti da pressoflessione su archi, volte e cupole;
- per adeguare la resistenza delle murature alle azioni orizzontali, nel piano e fuori del piano, derivanti da varie cause come cedimenti delle fondazioni, spinte di tetti non contrastate, eventi sismici, etc.
- per fasciature di pilastri, anche con interventi limitati ai soli corsi di malta.

Nelle strutture lignee (fig. 5):

- per aumentare la capacità portante;
- per il contenimento delle deformazioni entro i limiti di accettabilità richiesti dalle normative.

Nelle strutture inflesse in materiale lapideo (balconi, aggetti, architravi, cornicioni):

- per la messa in sicurezza, conferendo comportamento assimilabile a quello di

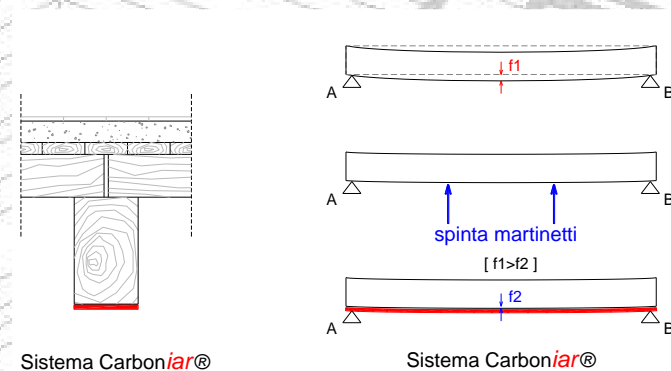


Figura 5

una trave inflessa.

Nelle strutture in calcestruzzo armato (fig.6 e 7):

- per aumentare le resistenze a flessione e a taglio, per contenere le deformazioni e per adeguarle ai carichi sismici;
- per il confinamento di elementi prevalentemente compressi, allo scopo di aumentarne la capacità portante e la duttilità, intesa come capacità di sopportare consistenti deformazioni in campo plastico, fattore di grande importanza in caso di eventi sismici;
- per adeguare il comportamento a carichi ciclici (fatica) in strutture soggette a forte traffico veicolare;
- per il rinforzo di strutture a mare, in quanto resistente alla corrosione

Nelle strutture in calcestruzzo armato precompresso:

- per sopperire alla perdita di parte del tiro dei trefoli o alla rottura di alcuni di essi.

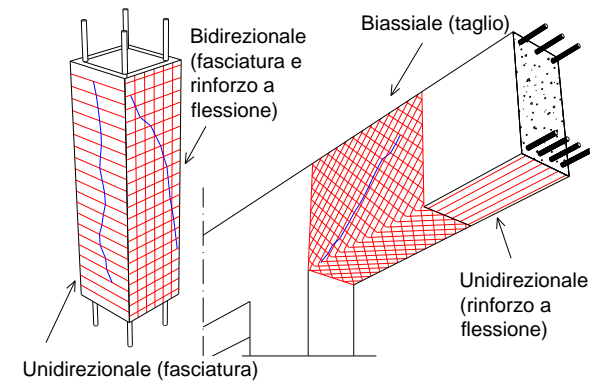


Figura 6

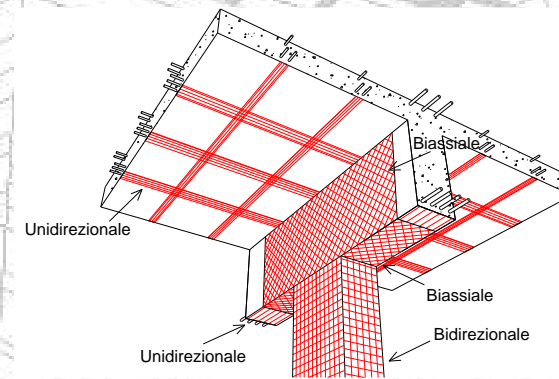


Figura 7

4.0 IL SISTEMA Carboniar® NELLA CONSERVAZIONE E RECUPERO DI BENI STORICI

4.1 Principi generali

Quando nel 1996 la IAR ha iniziato a studiare possibilità e problematiche inerenti il rinforzo di strutture storiche con fibre di carbonio, è emersa come prioritaria la

necessità di progettare un materiale drappeggiabile, che consentisse l'adattamento ottimale a superfici complesse ed irregolari. Accanto a ciò, le tradizionali carenze meccaniche della muratura storica hanno stimolato la ricerca verso la possibilità di aumentarne la resistenza, prima di procedere all'applicazione del rinforzo.

Un altro elemento di grande importanza, ai fini della buona riuscita dell'intervento, era legato alla necessità che l'estensione dello stesso fosse la massima possibile, ma che venisse al contempo raggiunto il miglior compromesso tra superficie interessata dal rinforzo e mantenimento della traspirabilità, in modo da non danneggiare le murature, e ancor meno le eventuali superfici dipinte o affrescate. Infine la capacità di adesione doveva essere la massima possibile.

Questi input hanno portato alla nascita del sistema Carboniar®, vedi prima parte della presente relazione, che consente l'ottimale soluzione di tutte le problematiche emerse, come dimostrato dalle numerose ed importanti applicazioni realizzate dalla nostra società in questo delicato settore.

Il motivo per cui la nostra società è intervenuta con materiali di derivazione aerospaziale su edifici di grande importanza storica, basti pensare alla Basilica Superiore di S. Francesco in Assisi, alla Cattedrale S. Feliciano di Foligno, alla villa Caldogno-Nordera di A. Palladio in Caldogno (VI), è dovuto alle tipologie di carico gravanti su tali strutture e alle enormi potenzialità offerte dai compositi.

Analizzando tali tipologie, risulta che i carichi possono essere di *compressione* (sopportabili dalle murature storiche) e di *trazione* (non sopportabili dalle stesse strutture).

- *Nel primo caso*, l'intervento di recupero della struttura è realizzato attraverso iniezioni di malte che utilizzano come legante calce idraulica naturale, simili quanto più possibile alle malte originarie in modo da ripristinare la continuità di resistenza a compressione.

Particolare attenzione va riservata nell'evitare pericolosi irrigidimenti localizzati e la perdita delle capacità traspiranti della muratura, ragion per cui si ricorre ad iniezioni di leganti costituiti da calce idraulica naturale e non a base cementizia. Una attenta lettura delle schede tecniche fa orientare la scelta in base al modulo elastico ed alla resistenza alla diffusione del vapore d'acqua del prodotto (μ).

La I.A.R. propone una linea di materiali a base di calce idraulica naturale (*IAR Calx Romana* ad effetto pozzolanico) in diverse formulazioni, e precisamente: prodotti da iniezione, prodotti da allettamento, per stuccature e scuci-cuci, prodotti da intonaci, anche del tipo macroporoso per lo smaltimento dell'umidità e per il contenimento dei sali solubili.

- *Nel secondo caso*, o si ricorre all'utilizzo di materiali resistenti a trazione o si va inevitabilmente verso la perdita della struttura.

Le eventualità che nascono carichi di trazione sono numerose e spesso tragiche: basti pensare alla pressoflessione, ai fuori piombo provocati da cedimenti di fondazioni o da spinte non contrastate di tetti e di volte, ad eventi sismici - sempre possibili in zone ad elevato rischio, come ad Assisi dove, oltre alla perdita delle preziose volte affrescate da Giotto e Cimabue, vi sono state perdite di vite umane. Nel terremoto che ha colpito l'Umbria e le Marche nel 1997, la scossa che ha provocato il crollo di due delle volte della Basilica Superiore di S. Francesco ad Assisi aveva una magnitudo di 5,8 Richter (pari all' 8° - 9° grado Mercalli); il fatto che tale valore non siano elevatissimo dimostra l'accentuata vulnerabilità delle strutture storiche.

Dopo l'intervento di cucitura delle lesioni con il sistema Carboniar®, le volte hanno subito uno sciame di 400 scosse, di cui 2 di magnitudo superiore a 5 Richter, anche se di minor durata, senza dimostrare alcun danno.

Anche i giusti criteri che spingono al riutilizzo di edifici, altrimenti destinati alla fatiscenza, dovendo prevedere sovraccarichi accidentali molto più elevati rispetto a quelli previsti o possibili originariamente, portano sovente a carichi di trazione sulle strutture.

4.2 Il sistema Carboniar® per il recupero di edifici e monumenti storici; il pronto intervento sulle volte della basilica superiore di san Francesco d'Assisi dopo l'evento sismico del settembre 1997

Il sistema Carboniar® consente interventi non invasivi e reversibili - le fibre possono essere asportate con adeguato trattamento termico -, non incrementa, di fatto, il peso proprio della struttura - e questo è un dato di grande importanza, in particolare nei confronti di eventi sismici -, non richiede giunzioni, è di rapida esecuzione, non prevede l'impiego di particolari attrezzature né una successiva

manutenzione, risulta compatibile con i materiali storici, non altera negativamente il *carattere architettonico* dell'opera e *non altera la funzionalità* degli elementi strutturali: ciò spiega perché l'uso di questi materiali innovativi stia incontrando il favore via via crescente dei Progettisti e delle Soprintendenze.

Gli interventi proposti con tali materiali realizzano il compromesso ottimale tra le necessità del consolidamento, il rispetto delle Carte del Restauro e dei più recenti EuroCodici, che ripropongono i noti principi di *compatibilità, reversibilità, efficacia, durabilità*.

Con il sistema Carboniar® è stato realizzato il pronto intervento sulle volte della Basilica Superiore di San Francesco d'Assisi, secondo lo schema di fig 8, subito dopo il tragico evento sismico del 26 settembre 1997.

Sono stati applicati, in senso trasversale alle crepe, che si erano manifestate per la maggior parte in chiave con apertura verso l'estradosso, nastri in fibre di carbonio di tipo unidirezionale, mentre lungo la direzione longitudinale delle crepe sono stati disposti tessuti di tipo bidirezionale (0° e 90°). Per l'incollaggio è stata utilizzata resina epossidica, mentre per la saturazione e per la finitura è stata utilizzata resina epossipoliuretana, caratterizzata da maggiore elasticità rispetto all'epossidica.

In totale sono stati applicati circa 800 ml di nastri e tessuti, con i quali si è realizzato un esoscheletro leggerissimo ma di grande resistenza ed in grado di realizzare una efficace legatura degli elementi costituenti la struttura.

Il monitoraggio dell'intervento ha escluso interferenze negative con i preziosi affreschi.

4.3 Modelli di calcolo per il rinforzo di murature verticali, fasciature di pilastri e di cupole, consolidamenti di campanili, di volte, di travi in legno

Come si è detto, alle fibre di carbonio bisogna fare assorbire i carichi non sopportabili dai materiali storici, e precisamente quelli di trazione. Il modello di calcolo da adottare utilizza i principi tradizionali della Scienza delle Costruzioni in cui due materiali diversi, uno resistente a trazione e l'altro no, sono chiamati a collaborare tra loro, ciascuno apportando il proprio contributo secondo le

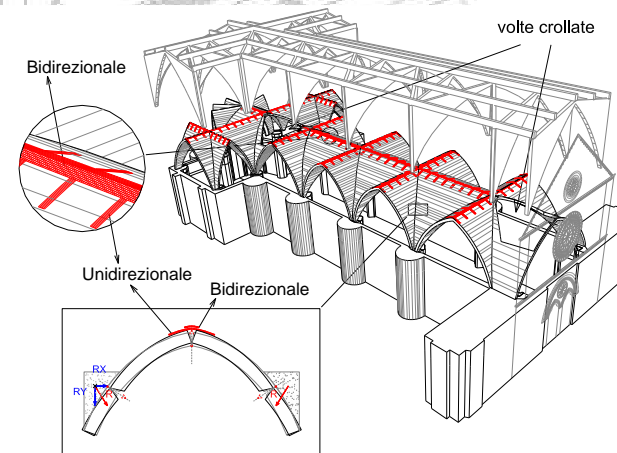


Figura 8

caratteristiche intrinseche, in particolare la resistenza ed il modulo elastico, e le reciproche posizioni.

L'utilizzo delle fibre di carbonio, nel caso di sollecitazioni esterne tali da generare carichi di trazione nel materiale di cui è costituito il supporto, consente all'asse neutro di posizionarsi all'interno della struttura, perciò parte della sezione può riprendere il suo corretto e naturale comportamento a compressione, mentre i carichi di trazione - quelli insistenti in zona tesa al di sotto dell'asse neutro - saranno trasferiti sulle fibre di carbonio. Tale trasferimento sarà tanto più efficace quanto maggiore è il modulo elastico del rinforzo, o meglio, il rapporto tra il modulo elastico delle fibre di carbonio e quello del supporto storico.

Nel caso di strutture murarie si affiderà alle fibre di carbonio il compito di assorbire le componenti orizzontali delle forze; si riportano alcuni esempi:

- **Fasciatura** di una chiesetta nelle Marche colpita dal recente terremoto (fig.9), dove ai nastri in fibre di carbonio è stato affidato il compito di assorbire le forze orizzontali di origine sismica insistenti sulla facciata (le murature storiche sono in grado di resistere efficacemente a carichi verticali, ma difficilmente possono offrire adeguate resistenze alle azioni orizzontali), che risultava completamente scollegata dal resto della struttura.

La verifica strutturale è stata condotta sia nei confronti delle forze orizzontali che dei momenti generati dalle stesse forze, sia attraverso il calcolo della superficie di contatto fibre/muratura, che consente l'equilibrio tra le forze orizzontali e le forze tangenziali di adesione.

Si noti che l'efficacia dell'intervento, così come proposto, non si limita ad impedire il ribaltamento della facciata ma, creando una sorta di rete sulle pareti murarie, consente alle stesse di resistere a forze nel piano e fuori del piano, in sostituzione ai tradizionali "intonaci armati" che comportano, tra l'altro, perdita di spazi utili, interventi molto costosi su serramenti ed impianti, drastica riduzione della traspirabilità.

- **Confinamento di pilastri in muratura (Wrapping):** le fibre di carbonio consentono l'instaurarsi di uno stato triassiale di compressione, molto più efficace del classico stato monoassiale che supera facilmente i carichi ammissibili causando la formazione di un sistema di bielle parallele molto fragili; nel caso di

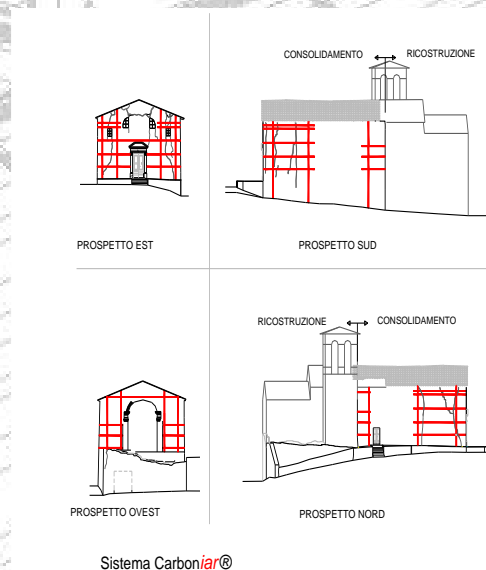


Figura 9

murature faccia a vista si può utilizzare un nastro di altezza molto ridotta (circa 1 cm) inseribile nei corsi di malta e completamente dissimulabile (fig.10).

Con tale nastro è stata effettuata la legatura degli angoli in pietra di un antico edificio, evitando fori e tiranti di acciaio, intervento decisamente invasivo (fig.11).

- *Fasciatura di cupole* realizzata nelle zone critiche di trazione (fig.12), individuabili dall'analisi strutturale ad elementi finiti (fig. 13), solitamente alla base e alla sommità in corrispondenza della lanterna, qualora questa vi sia.
- *Rinforzo di campanili*, in cui la complessità dello stato tensionale, specifica delle strutture snelle, spesso vincolate asimmetricamente, ha condotto ad interventi di rinforzo con strati sovrapposti di tessuti di carbonio, di tipo bidirezionale e biassiale, applicati all'interno (fig.14) e successivamente ricoperti con intonaco in cocchiopesto
- *volte ed archi*, molto efficace per un pre-dimensionamento risulta l'utilizzo del classico metodo grafico di Mery, che consente l'utilizzo delle sole equazioni di equilibrio senza ricorrere alle equazioni di congruenza. Di fatto, la formazione spontanea di cerniere in chiave e nelle reni trasforma la struttura da iperstatica ad isostatica, potendosi configurare la volta come un arco a tre cerniere: il rinforzo in fibre di carbonio la rende in grado di assorbire i carichi di trazione, derivanti da pressoflessione, in quelle zone dove il centro di spinta esce dal nocciolo centrale d'inerzia (terzo medio), per aumento dei carichi accidentali o per evento sismico.

Approfondendo l'argomento, nella maggior parte dei casi le volte collassano a causa dell'instaurarsi di un cinematismo dovuto alla progressiva formazione di cerniere, che si aprono alternativamente all'estradosso e all'intradosso: in questo modo il grado di iperstaticità si riduce via via finché l'intera struttura diviene labile, con conseguente crollo.

Un simile meccanismo di collasso è dunque associato alla scarsa ed inaffidabile resistenza a trazione tipica delle strutture murarie e si verifica quando la struttura possiede ancora ampie riserve di resistenza a compressione, tipologia di carico per cui è stata progettata e costruita; in altre parole non si riesce a sfruttare adeguatamente la resistenza attribuita alla struttura dall'impostazione

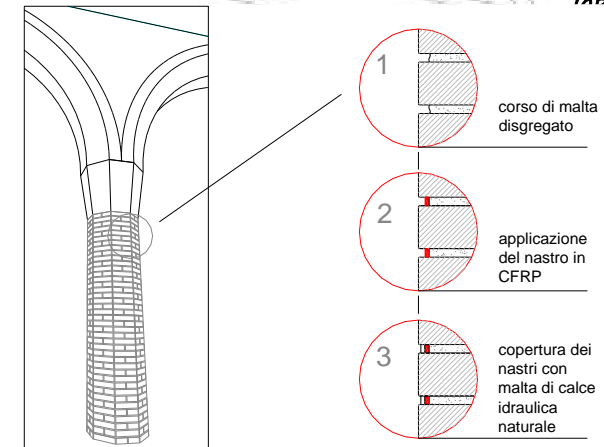


Figura 10

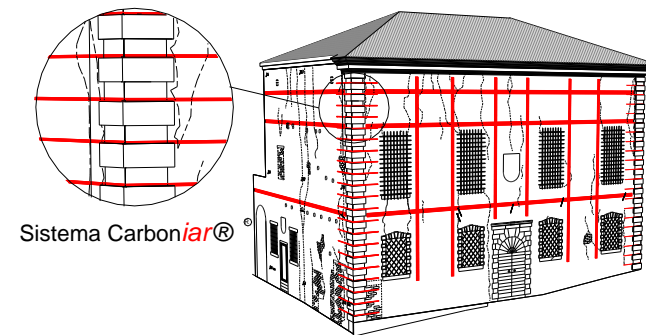


Figura 11

architettonica di progetto originaria.

Dal punto di vista teorico qualunque disposizione di cerniere tale da rendere labile la struttura è una disposizione ammissibile: in realtà ad ognuna di esse corrisponde un preciso contenuto energetico, ovvero un lavoro che le forze esterne devono compiere per far sì che la struttura collassi per formazione proprio di quel particolare cinematismo tra gli infiniti possibili; ne consegue immediatamente che a portare al collasso la struttura sarà il cinematismo cui è associato il contenuto energetico più basso: è stato dimostrato che i cinematismi più probabili sono sempre quelli che prevedono l'apertura alternata delle cerniere all'intradosso ed all'estradosso, generalmente in chiave, alle reni e presso le imposte, in questa successione, con incrementi di carico di almeno il 50% tra le successive formazioni di cerniere.

Si arriva così al punto chiave: è sufficiente impedire, tramite il rinforzo con nastri in fibre di carbonio, la formazione di una delle due famiglie di cerniere (intradosali o estradosali) per escludere tutti i meccanismi di collasso a basso contenuto energetico, tali cioè da comportare un crollo della struttura per cinematismo, il che avviene a carichi effettivamente modesti, neppure confrontabili con i carichi che la possono condurre al collasso per compressione, come detto.

In altre parole l'intervento di rinforzo innalza notevolmente il carico critico della struttura, perché restano ammissibili solo configurazioni di cerniere associate a carichi critici confrontabili con quelli che determinano il normale collasso della volta per superamento dei limiti di compressione del materiale che la costituisce, come previsto in fase di progetto; ribadiamo quindi che viene ripristinata "l'architettura di progetto".

- *travi in legno* le problematiche maggiori sono dovute più alla lenta deformazione nel tempo sotto carico (fluage) piuttosto che alla carenza di resistenza. Con opportuni accorgimenti è possibile recuperare almeno in parte la freccia presente e impedirne ulteriori sviluppi. Il recupero della freccia prima dell'applicazione del rinforzo in fibre di carbonio consente alle stesse di sviluppare la propria efficacia non solo nei confronti dei carichi accidentali ma contestualmente nei confronti del peso proprio; prove di laboratorio hanno confermato la possibilità di contenere la freccia entro i limiti di progetto.

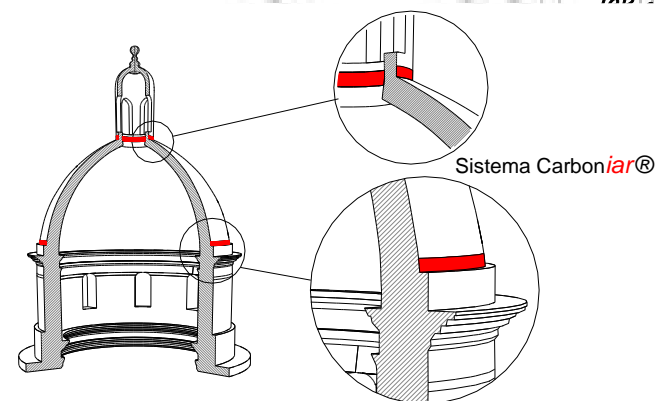


Figura 12

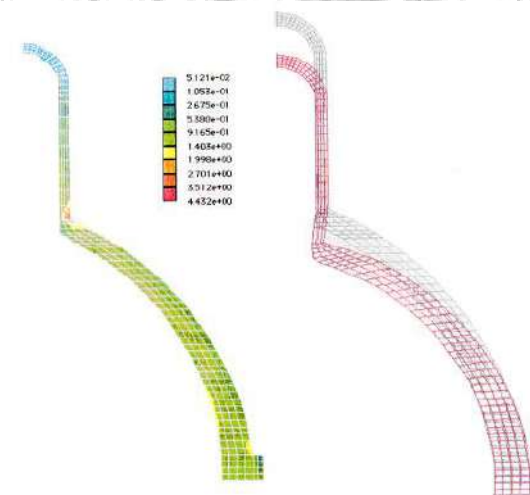


Figura 13

Il calcolo ad elementi finiti consente la verifica conclusiva delle tipologie di pre-dimensionamento appena descritte.

Anche qui è opportuno ricordare che le fibre di carbonio realizzano un'efficace legatura della struttura e degli elementi costituenti la stessa, tale da conferire l'auspicato *comportamento scatolare*, indispensabile nel caso di eventi sismici.

Interessante risulta la possibilità di poter conferire *comportamento duttile a strutture costruite in materiali poveri*.

Conferire tale effetto, comparabile ad un comportamento in fase plastica, risulterà particolarmente utile in caso di sisma, e va inteso come una riserva di sicurezza necessaria prioritariamente per salvare vite umane, ed in secondo luogo per la conservazione della struttura.

In altri termini risulta necessario incrementare le ridotte risorse plastiche delle strutture, principio accettato dalle normative nazionali e dagli Eurocodici, in quanto l'instaurarsi di un comportamento non lineare isteretico consente di dissipare quota parte dell'energia sismica che le investe.

Naturalmente occorre sempre una visione globale del progetto di consolidamento, non limitata ai singoli elementi strutturali che compongono l'edificio.

4.4 Prove di laboratorio

4.4.1 Adhesion Test

Adesion Tests, realizzati nel laboratorio IAR su supporto in laterizio d'epoca, sul quale era stato applicato il sistema Carboniar®, hanno fornito risultati medi pari a 0,83 MPa con rottura coesiva del supporto.

Il valore così elevato, che ha toccato punte pari a 1.6 MPa, dimostra che il supporto è stato rinforzato dal particolare ciclo applicativo previsto dal sistema Carboniar® (*l'Adesion Test equivale a prove di trazione diretta sul materiale costituente il supporto*). Tali prove confermano la validità del ricorso a nastri e tessuti secchi ed alle tecnologie di applicazione del sistema, che consentono di rendere monolitico il rinforzo con il supporto.

4.4.2 Prove Di Pressoflessione

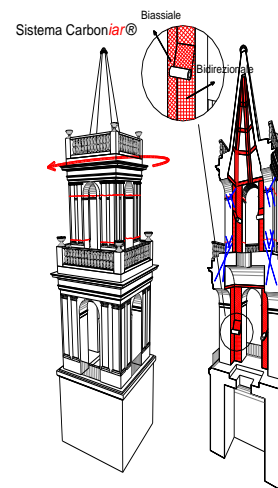


Figura 14

Prove di pressoflessione su pile in muratura di mattoni, rinforzate con nastri in fibre di carbonio di diversa grammatura e di diverso modulo elastico, realizzate presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova nei laboratori del Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, con la collaborazione di Docenti della stessa Facoltà, hanno fornito risultati così riassumibili:

- 1) asse neutro all'interno della sezione e molto vicino all'asse geometrico;
- 2) rottura a compressione (bordo superiore) con valori molto alti pari a circa 14 MPa (mattoni 42,5 MPa, malta di calce idraulica naturale - classe M3 - 5 MPa);
- 3) nessuna delaminazione sul bordo teso;
- 4) elevata possibilità di deformazione sul bordo teso (0,58 %) senza manifestazioni apparenti di rotture (probabili microfessurazioni nella malta).

Quest'ultimo parametro conferma che il controllo dello stato fessurativo avviene senza impedire le possibilità di deformazione, che risultano addirittura aumentate ma controllate.

Evitare la formazione di macrofessurazioni significa evitare la formazione di cerniere, e ciò è di grande importanza in edifici soggetti a rischio sismico, in quanto la struttura conserva, al meglio possibile, il suo grado di iperstaticità, quindi la possibilità di assorbire consistenti quantità di energia dinamica trasformandola in deformazioni plastiche.

4.4.3 Prove di compressione di pilastri in muratura

La fasciatura con materiali compositi di elementi strutturali prevalentemente compressi ha dimostrato come tale intervento consenta l'efficace incremento sia del carico ultimo che della duttilità.

Si riportano i risultati di prove sperimentali di compressione di pilastri quadrati aventi lato pari a 26 cm ed altezza pari a 60 cm, realizzati in mattoni pieni di recupero, aventi resistenza unitaria media a compressione pari a 32 MPa.

Per l'allettamento è stata utilizzata malta bastarda, avente resistenza unitaria media a compressione pari a 1 MPa; tale valore è volutamente inferiore al valore di 2,5 MPa previsto dalle normative per la malta M2,5, ossia per quella avente minor

resistenza; tale scelta è motivata dal fatto che nella realtà si riscontrano malte di bassa resistenza, vuoti per cause originarie o per successivo degrado.

I pilastri 1 e 2 (fig 15) non erano stati rinforzati, ed hanno offerto resistenza unitaria media a compressione assiale pari a 5,3 MPa. I pilastri 4 e 5 erano stati completamente fasciati con il sistema Carboniar® mediante nastri in fibre di carbonio da 520 gr/m², ed hanno offerto resistenza unitaria media pari a 11,9 MPa, con un incremento rispetto ai pilastri non fasciati pari al 124 %.

Risulta rilevabile dal suddetto diagramma che l'incremento di duttilità è stato pari a circa 20 volte, (valutando la duttilità come area sottesa dalla curva carico-abbassamenti): la struttura ha quindi manifestato un comportamento plastico di grande ampiezza, utile prioritariamente per salvare vite umane in caso di sollecitazioni sismiche ed in secondo luogo per la conservazione della struttura.

Una ulteriore prova, di particolare concezione, è consistita nel fasciare solo i corsi di malta con doppio nastro sovrapposto in fibre di carbonio da 520 gr/m², avente altezza 1,3 cm (pilastro 3): in questo caso la resistenza unitaria è risultata pari a 9,4 MPa, con un incremento rispetto ai pilastri non fasciati pari al 78 %, quindi anch'esso molto consistente.

Attesa la limitata estensione dell'intervento che, si ribadisce, non ha interessato le superfici in laterizio, è possibile conservare nella buona sostanza l'aspetto originario della struttura, qualora non si voglia nascondere completamente la fasciatura con una velatura di malta simile all'esistente per cromia e per composizione.

4.5 Analisi delle variazioni di rigidezza causate dal rinforzo con materiali compositi; il controllo dello stato fessurativo

Riteniamo utile analizzare in termini di variazione di rigidezza gli effetti causati da interventi con materiali compositi.

L'analisi teorica, tramite la classica "regola delle miscele", consente di verificare che tali variazioni sono molto contenute, attesi i limitati apporti materici di materiale ad alto modulo elastico.

Analizzando i risultati delle prove di compressione descritte al punto 5.4.3, si rileva

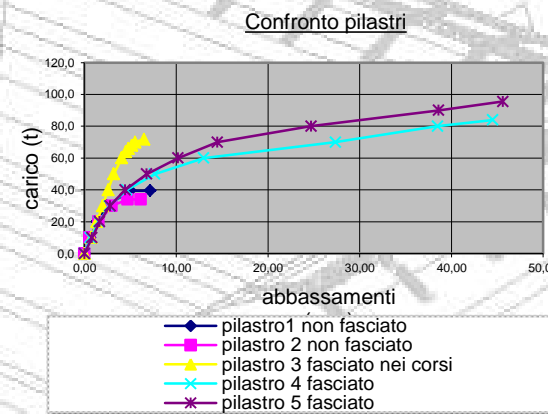


Figura 15

che il modulo elastico dei pilastri rinforzati, ottenuto calcolando il rapporto $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ nella zona ad andamento sostanzialmente rettilineo, mostra incrementi contenuti rispetto ai pilastri non rinforzati (da un valore di 1050 MPa si passa al massimo al valore di 1150 MPa). Ciò significa in termini percentuali un incremento massimo inferiore al 10 %, come individuabile anche graficamente dalla fig.16.

Quindi vengono annullate le preoccupazioni riguardanti temuti effetti di irrigidimento causate da interventi di rinforzo con fibre di carbonio su strutture in muratura, innescate dalla constatazione che tale materiale presenta elevato modulo elastico.

Analizzando i risultati in termini di duttilità, per il pilastro fasciato solo sui corsi di malta l'incremento è risultato molto contenuto; ciò è una logica conseguenza del fatto che la superficie interessata dalla fasciatura è circa il 15 % della superficie totale. Vale tuttavia la pena di proporre una interpretazione dei risultati diversa da quella tradizionale, ossia una interpretazione legata alla valutazione dello stato deformativo anziché dello stato tensionale: si vedrà allora che incrementi di resistenza considerevoli sono stati ottenuti a fronte di deformazioni decisamente più contenute di quelle maturate dai pilastri completamente fasciati, per cui, per regimi tensionali prossimi al limite di collasso, le deformazioni di tali pilastri non risultano macroscopiche e quindi sono sopportabili dalle altre componenti dell'edificio in essi concorrenti, strutturali e non.

Ciò conferma l'importanza di consentire le deformazioni della struttura ma contestualmente di controllarle.

4.6 Le raccomandazioni degli eurocodici sulla durabilità degli interventi

EUROCODE 8 "Design Provisions for Earthquake Resistance of structures part 1-4: General rules - Strengthening and repair of buildings, Annex F.: Particular considerations for historical buildings and monuments":

"Durability. The intervention should be carried out using materials and techniques the durability of which has been demonstrated to be comparable to that of the other materials of the building. A less durable intervention is accepted if a periodic replacement is foreseen"; ne consegue che qualora si utilizzino materiali diversi da quelli tradizionali, è opportuno programmare già in fase progettuale dei controlli

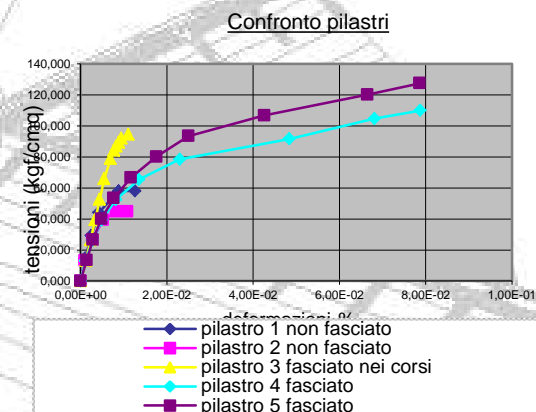


Figura 16

periodici ed eventuali manutenzioni o sostituzioni.

Un intervento di eventuale sostituzione risulta facilmente realizzabile grazie alla reversibilità dei rinforzi in materiali compositi.

4.7 Trattamenti di finitura

Qualora il rinforzo in fibra di carbonio debba essere intonacato, si provvederà, a resina ancora fresca, allo spolvero di quarzo.

Nel caso in cui il rinforzo debba rimanere a vista, si utilizzeranno resine resistenti agli UV; inoltre si può anche conferire, mediante adeguate tecnologie, l'aspetto dell'acciaio brunito.

5.0 IL SISTEMA Carboniar® PER IL RECUPERO DI STRUTTURE IN C.A.

5.1 Il rinforzo a flessione

Elementi strutturali prevalentemente inflessi, come travi e solai, si prestano ad essere efficacemente rinforzati in zona tesa con nastri in fibre di carbonio di tipo unidirezionale, disponendo le fibre secondo la geometria delle armature esistenti, in modo da integrarle.

Il rinforzo deve ovviamente essere applicato in assenza dei sovraccarichi accidentali, giacché i nastri entrano in azione nel momento in cui le deformazioni al bordo teso progrediscono rispetto a quelle già presenti al momento dell'applicazione. Qualora vi sia la possibilità di praticare l'operazione di rinforzo successivamente all'applicazione di una adeguata contro-freccia, le fibre iniziano a fornire il loro contributo di resistenza già in presenza del solo peso proprio della struttura.

5.1.1 Il rinforzo a flessione - modello di calcolo

Il calcolo del momento critico in una sezione in c.a. placcata con nastri in fibre di carbonio di tipo unidirezionale può essere condotto con i modelli della Scienza

delle Costruzioni. Si tratta ovviamente di considerare il rapporto fra tre materiali diversi, le rispettive leggi costitutive e le rispettive posizioni, e di ripartire la componente di trazione tra acciaio e fibre di carbonio. Il calcolo a flessione avviene in maniera analoga alle sezioni convenzionali in c.a., utilizzando cioè le assunzioni della teoria classica - come la conservazione delle sezioni piane - e le equazioni di equilibrio e congruenza.

Per scendere maggiormente nel dettaglio, la sezione resistente ideale è costituita dall'area di calcestruzzo compresso, dalle aree delle armature in acciaio rispettivamente tese e compresse - incrementate del coefficiente di omogeneizzazione acciaio-calcestruzzo - e dall'area del placcaggio in fibre di carbonio incrementata del coefficiente di omogeneizzazione carbonio-calcestruzzo.

L'applicazione del rinforzo in zona tesa produce lo spostamento dell'asse neutro verso il rinforzo, l'aumento dell'area compressa del calcestruzzo e le conseguenti diminuzioni della tensione massima di compressione nel calcestruzzo e della tensione di trazione nell'acciaio.

La verifica della stabilità richiede il calcolo della distanza dell'asse neutro dal bordo del lembo compresso, che si ottiene dall'equazione di equilibrio dei momenti statici, rispetto all'asse neutro, della sezione ideale resistente; il valore ricavato consente il calcolo del momento di inerzia della sezione resistente rispetto all'asse neutro stesso. Infine, calcolati tali valori, le tensioni nei materiali costituenti la sezione reagente ideale vengono fornite dalle classiche espressioni di Navier.

Fissate la geometria del sistema, le resistenze e le rigidità dei materiali costituenti, il parametro determinante risulterà il prodotto del modulo elastico delle fibre di carbonio (E_f) per la loro sezione (A_f), cioè il prodotto $E_f \times A_f$.

Nel rinforzo a flessione è quindi il modulo elastico delle fibre di carbonio il parametro di maggior importanza, a maggior ragione se si considera che esso, a differenza dell'acciaio, rimane costante per qualunque valore della tensione di trazione delle fibre.

5.1.2 Il rinforzo a flessione; meccanismi di collasso e comportamento di travi rinforzate con sistemi compositi

Per arrivare ad una corretta progettazione dell'intervento di rinforzo è essenziale comprendere quali siano i meccanismi di collasso di una trave rinforzata con materiali compositi. In pratica ogni variazione delle caratteristiche del rinforzo muta i "rapporti di forza" tra i possibili meccanismi di rottura, facendo sì che di volta in volta si attivi quello a cui corrisponde il minore tra i corrispettivi carichi di collasso.

Con riferimento ai classici test di flessione su 4 punti di travi in c.a., in semplice appoggio e placcate all'intradosso con CFRP unidirezionali, si possono identificare cinque meccanismi fondamentali di collasso:

- rottura a trazione del CFRP di rinforzo nella zona di massimo momento (fig.17.1)
- rottura per schiacciamento del conglomerato al bordo superiore nella zona di massimo momento (in mezzeria o sotto uno dei due punti di carico) (fig.17,2)
- rottura nel calcestruzzo all'estremità del rinforzo, con successivo distacco di CFRP+copriferro, su travi dotate o meno di fasciatura alle estremità del rinforzo (fig.17.3a /fig.17.3b)
- collasso all'interfaccia con relativo distacco del rinforzo dal punto d'innesto (punto di minor efficacia dell'incollaggio) fino all'estremità più vicina. Tale punto non può essere determinato a priori (fig.17.4)
- rottura per taglio del conglomerato fuori della zona rinforzata (presso gli appoggi) su trave rinforzata anche lateralmente a taglio (fig.17.5).

Come si nota, i primi due meccanismi sono sinonimo di un ottimale utilizzo dei materiali e si verificano solamente quando la trave ha maturato vistose deformazioni, quindi con l'acciaio ampiamente in campo plastico, mentre i tre successivi sono meccanismi di collasso di tipo prematuro e fragile, quindi catastrofici e assolutamente da evitare.

Con il sistema Carboniar® si ottiene il meccanismo di collasso più favorevole, come descritto successivamente.

Desideriamo soffermarci sui cambiamenti che la presenza di un rinforzo, linearmente elastico fino a rottura, induce nel comportamento di una trave in c.a. inflessa

Le tipiche curve carico-spostamento di travi in c.a., non rinforzate e

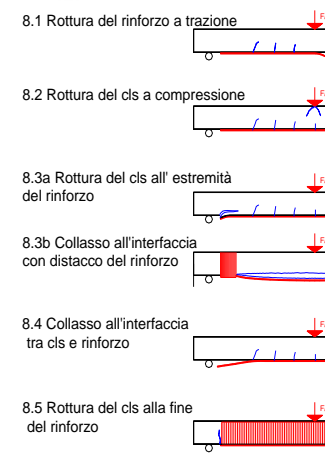


Figura 8

Figura 17

moderatamente rinforzate con il sistema Carboniar® sono riportate in fig. 18.

Inizialmente la risultante di trazione si suddivide tra armatura longitudinale e CFRP, in base al rapporto tra le aree, le posizioni ed i moduli elastici dei due materiali: a parità di carico le tensioni e le deformazioni nell'acciaio sono sempre inferiori a quelle della trave non placcata, per cui il carico di snervamento aumenta.

Allo snervamento dell'acciaio si nota un *ginocchio*, cioè una perdita di rigidità, tuttavia la curva conserva sempre una pendenza positiva: infatti il carico di trazione si trasferisce progressivamente dall'acciaio al CFRP. In questa situazione il rinforzo continua a comportarsi elasticamente, esercitando un'azione di controllo sull'apertura delle fessure e quindi anche sulle deformazioni plastiche dell'acciaio. In altri termini, il rinforzo con fibre di carbonio consente l'aumento dei carichi anche in regime plastico dell'acciaio.

Si noti come a parità di carico le deformazioni risultino consistentemente contenute nella trave rinforzata rispetto a quelle esistenti nella trave priva di rinforzo.

Raggiunto il carico ultimo la trave rinforzata con il sistema Carboniar®, esaurite tutte le proprie potenzialità, collassa con valori molto alti dello stato di deformazione, e la rottura si manifesta in zona compressa. Tale comportamento costituisce la modalità di collasso auspicabile sia ai fini della progettazione che ai fini della sicurezza, in quanto investe il materiale più debole e nella zona di maggiore sollecitazione, consentendo quindi un calcolo semplice ed affidabile in linea con i risultati sperimentali.

5.1.3 Prove di laboratorio a flessione

Test di flessione su travi in c.a. rinforzate con il sistema Carboniar®, e test comparativi con lamine pultruse di CFRP, equivalenti per area netta e caratteristiche meccaniche delle fibre, hanno fornito risultati così riassumibili:

- Carico di collasso maggiore nelle travi rinforzate con il sistema Carboniar®.
- Collasso di tipo flessionale in zona centrale (area compressa) per le travi rinforzate con il sistema Carboniar®, benché la struttura fosse molto armata in zona compressa. La presenza delle fibre all'intradosso, infatti, determina l'abbassamento dell'asse neutro e un conseguente incremento della sezione di

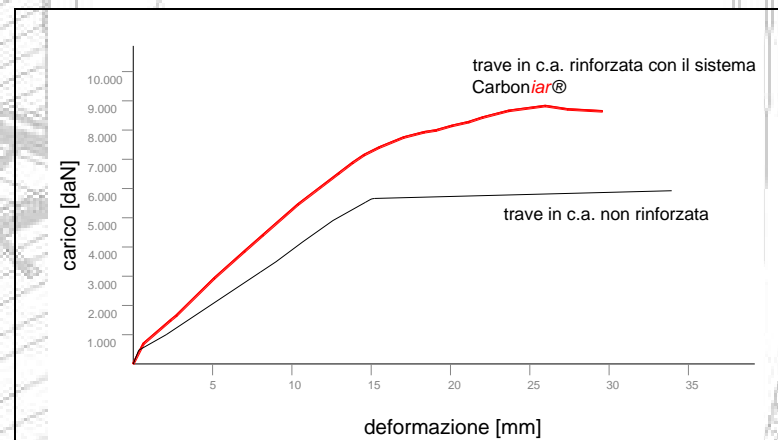


Figura 18

calcestruzzo compressa. La tensione di rottura al bordo compresso viene così raggiunta per livelli di carico nettamente superiori, il che equivale alla riduzione della tensione di compressione a parità di carico.

- Collasso prematuro e imprevedibile nelle travi rinforzate con lamine pultruse, collasso che avviene per distacco della lamina e del copriferro. In questo caso la minor area di contatto tra rinforzo e supporto ha causato l'insorgere di tensioni tangenziali non sopportabili dal calcestruzzo: il distacco si è innescato nella zona vicina agli appoggi. Per le travi con fasciature di ancoraggio ad 'U' alle estremità, utilizzate per evitare l'innescò della delaminazione (peeling), il distacco è avvenuto in tutta l'area compresa tra le due fasciature d'estremità, ed agli stessi valori di carico.
- Capacità del sistema Carbonia® di funzionare correttamente anche in assenza di ancoraggi all'estremità dei placcaggi e, per contro, incapacità degli ancoraggi di impedire il collasso prematuro nelle travi placcate con le lamine.

Il non perfetto allineamento delle fibre dovuto alla tessitura si è dimostrato irrilevante ai fini delle resistenze sviluppate e delle modalità di collasso.

5.2 Il rinforzo a taglio

Il sistema Carbonia® viene principalmente utilizzato quale rinforzo per stati tensionali derivanti da flessione; qualora le sezioni resistenti originarie non siano in grado di resistere al taglio, soprattutto presso gli appoggi, si farà ricorso all'applicazione sui fianchi laterali del nastro unidirezionale, che avrà la funzione di staffatura supplementare, combinato con il nastro biassiale a $\pm 45^\circ$ ad uso dei tradizionali ferri piegati; tale combinazione è opportuna anche perchè difficilmente è possibile realizzare la fasciatura, assimilabile alle staffe, sui quattro lati della trave.

Il calcolo viene condotto sulla base della tipologia del rinforzo, della geometria di applicazione, delle quantità e della resistenza delle fibre di carbonio applicate; in altri termini il parametro determinante risulterà il prodotto della resistenza a trazione delle fibre di carbonio (f_{ft}) per la loro sezione (A_f), cioè il prodotto $f_{ft} \times A_f$.

5.3 Il rinforzo a compressione mediante confinamento (wrapping)

Un campo di applicazione di grande interesse per i CFRP è quello del confinamento di elementi prevalentemente compressi; in effetti la risposta sismica dei pilastri degli edifici e delle pile dei ponti può essere nettamente migliorata con una semplice fasciatura di nastri in fibre di carbonio.

Si pensi alle pile di un ponte in cui lo stato di sollecitazione cambia completamente in caso di evento sismico, dato che alle azioni verticali si sommano quelle orizzontali, le cui conseguenze si traducono in diversificate modalità di collasso, e precisamente:

- *Collasso per taglio*: tipologia di collasso maggiormente pericolosa perché fragile ed esplosiva, causata da insufficiente staffatura (fig 19.1).
- *Collasso flessionale alla base*: altrettanto pericoloso, causato dalla insufficiente sovrapposizione delle armature longitudinali (fig 19.2).
- *Collasso della cerniera plastica presso i nodi*: la modalità meno catastrofica perché associabile ad elevata duttilità (fig 19.3).

Questi meccanismi di collasso possono essere rallentati o ritardati, incrementando la pressione laterale di confinamento mediante fasciature con nastri in fibre di carbonio di tipo unidirezionale, disposti secondo i piani orizzontali. In questo modo si contrasta l'espansione laterale del calcestruzzo grazie all'instaurarsi di uno stato triassiale di compressione, anziché monoassiale come nel caso della struttura non confinata.

I vantaggi che ne conseguono sono numerosi, e vanno dall'aumento della resistenza alla compressione assiale, all'aumento della duttilità (la colonna dopo lo snervamento dell'acciaio continua a deformarsi in campo plastico dissipando elevate quantità di energia), all'aumento della resistenza a taglio (le fibre si comportano come una serie molto fitta di staffe supplementari).

Qualora si intenda aumentare anche la resistenza a flessione, si utilizzeranno i tessuti bidirezionali 0°/90°, nei quali si sfrutta, ai fini flessionali, l'orientamento delle quota parte di fibre disposte secondo la verticale. Il confronto con interventi di cerchiatura realizzati con sistemi tradizionali in acciaio risulta decisamente a favore del confinamento con CFRP, particolarmente nel caso di pilastri aventi sezione quadrata o rettangolare.

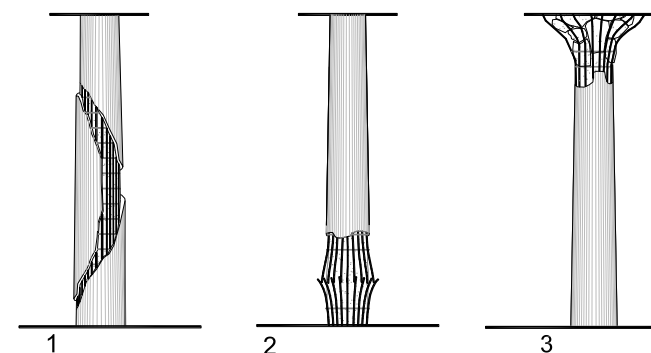


Figura 19

5.3.1 Il modello di calcolo - compressione

Note la resistenza ultima a compressione e le caratteristiche geometriche del sistema non confinato, l'incremento di resistenza dovuto al confinamento è individuato dalla forma della struttura, dalle sezione di rinforzo applicato e dalla resistenza a trazione delle fibre di carbonio f_{ft} .

Nel casi della cerchiatura completa della struttura, la sezione delle fibre di carbonio si identifica con il loro spessore t_f , per cui il parametro di valutazione del confinamento sarà il prodotto $t_f \times f_{ft}$, che si riconduce, a parità di spessore, alla resistenza a trazione.

Le fibre di carbonio di seconda generazione, utilizzate nel sistema Carboniar® offrono resistenza a trazione pari a 4900 MPa, quindi la loro efficacia è consistentemente superiore (40%) a quella delle fibre di carbonio di prima generazione, che in genere offrono resistenza a trazione pari a 3.500 MPa.

La forma della struttura è un parametro di grande rilevanza per valutare l'effetto del confinamento, in quanto sono necessari incrementi di spessore consistenti nel passare dalla forma più favorevole, ovviamente la forma circolare, a quelle via via meno favorevoli, e precisamente la forma quadrata e quella rettangolare.

In quest'ultimo caso, quando il rapporto tra i lati risulta ≥ 2 , sono necessari interventi integrativi in acciaio per rendere più omogeneo l'effetto di confinamento.

5.3.2 Prove di laboratorio a confinamento

Il diagramma tensioni-deformazioni di fig 20 si riferisce a prove di compressione di pilastri circolari in c.a. aventi diametro 30 cm e altezza 100 cm, completamente confinati rispettivamente con uno o con due strati di fibre di carbonio da 800 gr/m².

I risultati sono di notevole interesse: nel caso della doppia fasciatura, per un totale di 1.600 gr/m² di fibre di carbonio e spessore 0.8 mm, la resistenza unitaria ultima passa da 15 a 75 MPa, e la duttilità, rappresentata dall'area sottesa dalla curva di carico, aumenta di 30 volte.

In conclusione con un corretto intervento di confinamento è possibile adeguare i pilastri di strutture intelaiate alle normative antisismiche con spessori limitatissimi,

quindi senza perdere spazi utili.

5.4 Le prove di adesione

Prove di adesione realizzate su supporto in calcestruzzo (equivalenti a prove di trazione diretta sul materiale di supporto) hanno portato l'apparecchio di laboratorio a fondo scala, pari a 5 MPa, senza riuscire a produrre il distacco dei provini; ciò conferma la validità del sistema Carboniar® e del ciclo applicativo.

5.5 L'adeguamento strutturale di edifici in calcestruzzo armato in zona sismica - l'aumento di duttilità

La corretta conduzione dell'adeguamento strutturale di edifici in calcestruzzo armato in zona sismica richiede la realizzazione di:

- Un'attenta analisi delle resistenze e delle rigidità degli elementi portanti, cioè dei pilastri, delle travi, di eventuali pareti, e del probabile riequilibrio dei suddetti parametri.
- L'aumento della duttilità di tali elementi portanti, in particolare dei pilastri.

Attraverso una competente ed approfondita progettazione, basata sul metodo di calcolo agli stati limite come richiesto dagli Eurocodici, e con l'utilizzo di materiali compositi in fibre di carbonio, è possibile ottenere il livello di sicurezza necessario per evitare il crollo della struttura e la conseguente perdita di vite umane tramite l'assorbimento dell'energia sprigionata dal sisma, operato da parte degli elementi portanti della struttura e incrementato in modo decisamente consistente grazie agli apporti dovuti alle fibre di carbonio, accettando però il fatto inevitabile che l'edificio possa subire danneggiamenti anche di notevole entità.

Molto interessante risulta il bilancio energetico, che rappresenta il criterio di misura della duttilità, cioè la capacità di sopportare deformazioni in campo plastico delle strutture in calcestruzzo rinforzate con fibre di carbonio; l'energia in gioco, a meno di influenti quantità dissipate per attrito, può seguire due andamenti: nel primo caso essa viene accumulata dalle strutture e successivamente rilasciata (comportamento in campo elastico), nel secondo caso, invece, essa viene dissipata dalla struttura nella fase di deformazione plastica, evitando pericolose

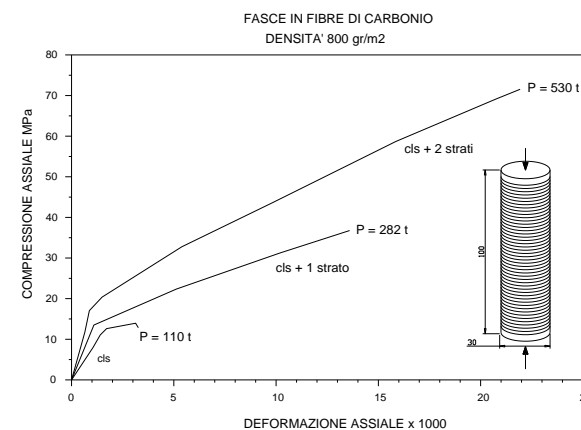


Figura 20

reazioni elastiche che possono provocare martellamento nei confronti di se stessa o di strutture contigue (comportamento elasto-plastico).

Questo secondo percorso progettuale è raccomandato dagli Eurocodici e dalle più recenti normative di paesi ad elevato rischio sismico, essendo il primo, anche volendo accettarlo, percorribile solo con interventi eccessivamente massicci ed invasivi.

L'analisi degli effetti di molti eventi sismici su edifici in calcestruzzo armato ha consentito di individuare che la causa della maggior parte degli eventi catastrofici è da imputare al crollo dei pilastri, o in generale degli elementi portanti verticali; tali pilastri non risultavano, nei confronti di carichi non di origine sismica, carenti per qualità e quantità di armatura verticale, e neppure furono individuate eccessive carenze nel calcestruzzo; se ne trae la conclusione che la causa dei crolli sia da imputare a carenza di armatura orizzontale, e ad un possibile non corretto rapporto reciproco tra le caratteristiche di resistenza e rigidità dei suddetti elementi verticali nei confronti degli stessi parametri caratterizzanti gli elementi portanti orizzontali.

La duttilità (e la resistenza) di elementi verticali di una struttura può essere efficacemente aumentata mediante confinamento, come riportato al punto 4.3.2.

Di fatto il pilastro confinato con CFRP conserva la propria capacità portante anche in presenza di marcati fenomeni fessurativi e disgregativi del calcestruzzo, che comportano la dissipazione di quote considerevoli dell'energia trasmessa dall'azione sismica.

Se ne conclude che le moderne tecnologie, supportate da qualificata progettazione, consentono l'adeguamento preventivo di strutture a rischio sismico, oppure il recupero di strutture danneggiate da tali eventi.

5.6 Direttiva di riferimento

Per il consolidamento di strutture con materiali compositi esiste un bollettino ufficiale elaborato dal CNR: documento Tecnico CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati".

Importanti risultano le raccomandazioni degli Eurocodici sulle resistenze degli

edifici situati in zone a rischio sismico (Eurocode 8).

Molti paesi a rischio sismico, in particolare Giappone e U.S.A., stanno elaborando adeguate normative in tal senso.

I consolidamenti con fibre di carbonio sono realizzabili a patto che il progetto venga supportato da prove sperimentali, come nel caso del sistema Carboniar®.

6.0 VOCE DI CAPITOLATO

Intervento di consolidamento di strutture esistenti in calcestruzzo armato oppure in materiali storici quali legno, muratura e lapidei con sistema tipo Carboniar® o equivalente, avente elementi resistenti in fibre di carbonio ottenuti per tessitura, in modo da consentire il passaggio della resina di incollaggio e di saturazione, e rendere monolitico il rinforzo con la struttura.

Le fibre di carbonio degli elementi resistenti devono avere direzione unidirezionale, bidirezionale a 0° e 90° o biassiale a ± 45° in funzione delle necessità strutturali.

La grammatura delle fibre di carbonio sarà variabile da 330 a 1200 gr/m² e l'altezza dei rinforzi in fibre di carbonio sarà variabile da 1,3 a 100 cm.

Le caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio dovranno risultare mediamente:

- resistenza a trazione 4900 MPa;
- modulo elastico 230 Gpa;
- allungamento a rottura 2,1 %

e dovranno essere certificate da idoneo documento, redatto dal produttore delle fibre (Test Report).

Gli elementi resistenti dovranno avere caratteristiche di drappeggiabilità tali da adattarsi alla geometria del supporto e verranno resi solidali al supporto medesimo mediante resine epossidiche certificate ISO 9001.

Particolare cura deve essere riservata alle condizioni di pulizia del supporto, da realizzarsi mediante sabbiatura ed aspirazione delle polveri per il c.a.; nel caso di

supporti in materiali storici, qualora non venga consentita la sabbiatura, occorrerà realizzare la pulizia al massimo livello possibile, mediante energica spazzolatura ed aspirazione delle polveri.

L'umidità del supporto, misurata con strumento a carburo tipo CM Tester, non deve superare il 5 %, salvo l'utilizzo di specifica resina epossidica per supporti umidi.

La temperatura ambiente e del supporto non deve essere inferiore a + 5 °C per il periodo di indurimento della resina.

Sul supporto non devono essere presenti materiali incoerenti e in distacco.

Prima dell'applicazione delle fibre di carbonio il supporto dovrà essere adeguatamente regolarizzato per consentire un corretto allineamento dei nastri e dei tessuti, mediante riporti di malta epossidica in idonea curva granulometrica oppure in premiscelati cementizi, nel qual caso occorre attendere la perdita di umidità degli stessi.

Gli spigoli vivi, sia concavi che convessi, andranno eliminati mediante arrotondamento o formazione di sguscio di raggio 3 cm; in particolare nel caso di spigoli concavi occorrerà applicare idonei sistemi atti a vincere la tensione radiale o "spinta verso il vuoto".

Il ciclo applicativo deve prevedere l'impregnazione del supporto mediante applicazione a rifiuto di resina epossidica diluita in idoneo solvente, l'applicazione della resina di incollaggio opportunamente resa tixotropica se necessario, l'applicazione del rinforzo in fibre di carbonio, la saturazione del rinforzo con resina epossidica non caricata; durante il ciclo applicativo verrà realizzata la rullatura con apposito attrezzo per eliminare occlusione di bolle d'aria.

I rinforzi in fibre di carbonio devono essere puliti ed integri e il ciclo applicativo andrà ripetuto qualora siano previsti più strati.

Al termine del ciclo applicativo verrà applicato un idoneo strato protettivo resinoso, oppure verrà realizzata, sulla resina di saturazione ancora adesiva, la semina di quarzo sferoidale per consentire l'aggrappo dell'intonaco.

Se l'applicazione è all'aperto, proteggere adeguatamente per il tempo necessario all'indurimento della resina.

La presenza di lesioni dovrà essere precedentemente risarcita mediante iniezioni con resine epossidiche, intasamenti con idonee malte anche in resina epossidica o scuci-cuci (nel caso di strutture storiche), da quotarsi a parte.

E' opportuno che l'applicazione del rinforzo avvenga in condizioni di minor carico possibile per la struttura, eventualmente in presenza di puntellamenti e di controfreccia per strutture particolarmente deformate, da quotarsi a parte.

In caso di incendio la resina epossidica utilizzata deve raggiungere un limite di tossicità inferiore al valore massimo consentito (pari a 2), secondo le norme CEI - N 50267/CEI 20-37 parte 2.

Ponteggi e posizionamento a piè d'opera di materiali ed attrezzature sono da quotarsi a parte.

CONSOLIDAMENTI REVERSIBILI DI STRUTTURE STORICHE

i lavori più significativi
dei sistemi Carboniar® e IARnet®



1996
Villa Caldogno-Nordera di A.Palladio – Caldogno (VI)

Primo intervento, per la nostra Società, di rinforzo di strutture storiche con l'impiego di fibre di carbonio, sistema Carboniar®.



1996
Cinta muraria fortificata – Soncino (CR)

Rinforzo della volta di un torrione della cinta muraria fortificata, sistema Carboniar®.



1997
Basilica Superiore di San Francesco – Assisi (PG)

Pronto intervento di messa in sicurezza delle preziose volte della Basilica Superiore, staticamente compromesse dal sisma, mediante nastri in fibra di carbonio, sistema Carboniar®.



1998
Biblioteca del complesso "La Rocca" – Monselice (PD)

Fasciatura del fabbricato mediante nastri in fibra di carbonio, sistema Carboniar® e consolidamento delle murature mediante iniezioni di calce idraulica naturale IAR Calx Romana.



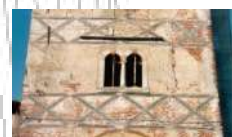
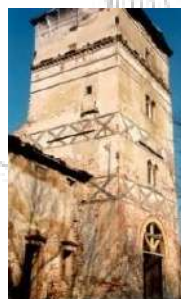
1999 - 2000
Basilica di S. Feliciano – Foligno (PG)

Interventi misti di rinforzo strutturale e antisismico con fibre di carbonio, sistema Carboniar® e dissipatori di energia sismica di volte, cupola, campanile e timpano.



1999
Palazzo Altieri – Roma

Consolidamento statico di travature lignee di solai a cassettoni decorati con iniezioni di resina EpoxIAR e fasciature in carbonio, sistema Carboniar®.



2000
Torre quattrocentesca – Pojana Maggiore (VI)

Pronto intervento di messa in sicurezza della torre mediante opportune fasciature in carbonio, sistema Carboniar®.



2000
Chiesa del Cristo – Rovigo

Rinforzo strutturale di elementi murari della chiesa mediante l'utilizzo di fibre di carbonio, *sistema Carboniar®*.



2001
Pieve di San Pietro – San Pietro di Feleto (TV)

Rinforzo antisismico della volta del Battistero pregevolmente decorata con sistema misto in fibre di carbonio, *sistema Carboniar®* e dissipatori di energia.



2004/2005
Chiesa di Santa Maria Assunta - Belfiore (PG)

Rinforzo delle volte della navata e dell'abside mediante nastri in fibra di carbonio, *sistema Carboniar®*, su guide di regolarizzazione in malta di resina epossidica.



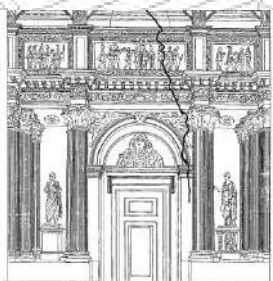
2007
Palazzo Cordellina – Vicenza

Rinforzo strutturale di volte e solai mediante l'utilizzo di nastri in fibre di carbonio, *sistema Carboniar®*. Ove necessario si è intervenuti con guide di regolarizzazione in malta di resina epossidica.



2005/2008
Villa Pisani del complesso Manfredini di Este – (PD)

Legatura dei paramenti murari della villa mediante nastri in fibra di carbonio, *sistema Carboniar®* e collegamenti speciali delle murature di spina con tiranti in acciaio inguainati per evitare dispersioni del legante.



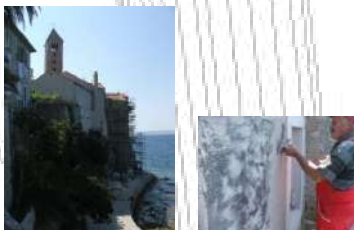
2007
Palazzo Cordellina – Vicenza

Utilizzo del rinforzo *IARnet®*, in rete simmetrica di carbonio, in strato singolo, annegata in malta di calce idraulica naturale *IAR Calx Romana* su controparete affrescata.



2008
Chiesa Bizantina del XI sec. – Isola di Hios (Grecia)

Fasciatura di volte della chiesa Panagia Krina con il sistema *IARnet®*, rete in carbonio annegata in malta di calce idraulica naturale *IAR Calx Romana*. Nel particolare della foto si nota l'impiego di connettori



2008
Convento di S. Andrea – Isola di Rab (Croazia)

Fasciatura di muratura con il sistema *IARnet®*, rete in carbonio asimmetrica annegata in malta di calce idraulica naturale *IAR Calx Romana*.



2008
Chiesa SS. Martino e Severo – Crespino (RO)

Fasciatura delle murature perimetrali della casa Canonica mediante *sistema IARnet®*, rete in carbonio asimmetrica in doppio strato incrociato annegata in malta di calce idraulica naturale *IAR Calx Romana*.



2009
Tomba di Giulietta – Verona

Fasciatura di volte e murature del fabbricato detto Casa di Giulietta con il *sistema IARnet®*, rete in carbonio asimmetrica annegata in malta di calce idraulica naturale *IAR Calx Romana*.



2009
Castello Dvor Veliki Tabor – Desinic (Croazia)

Fasciatura di volte e murature del castello con il *sistema IARnet®*, rete in carbonio asimmetrica annegata in malta di calce idraulica naturale *IAR Calx Romana*.



INGEGNERIA E ARCHITETTURA DEL RESTAURO

SEDE LEGALE: I.A.R. srl - Via Chiarugi, 76 / 45100 Rovigo, Italia
+39 0425 361278 +39 0425 360098 fax - www.iar-restauri.it e-mail rovigo@iar-restauri.it

UNITA' LOCALE: I.A.R. srl - Via l'Aquila 5/A - 67049 Tornimparte (AQ), Italia
+39 0862 728561 tel/fax - e-mail tornimparte@iar-restauri.it

Certificata ISO e SOA