

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile

Indirizzo Strutture

Tesi di Laurea in

MATERIALI INNOVATIVI E RIABILITAZIONE STRUTTURALE LS

MATERIALI COMPOSITI A MATRICE

CEMENTIZIA PER I RINFORZI

STRUTTURALI

Presentata da:

VINCENZO ALVARO

Relatore:

Prof. Ing. GIOVANNI PASCALE

Correlatore:

Prof. Ing ANGELO DI TOMMASO

Sessione Prima

Anno Accademico 2006-2007

PAROLE CHIAVE

Rinforzo Strutturale

Compositi

Matrice Cementizia

Fibre

Riabilitazione

INDICE

Introduzione	I
Capitolo 1. Materiali e tecnologie	
1.1 <i>La Matrice</i>	1
1.1.1 <i>Matrici Cementizie vs Resine Epossidiche</i>	1
1.2 <i>Le Fibre</i>	3
1.2.1 <i>Classificazione delle fibre</i>	4
1.2.2 <i>Fibre di carbonio</i>	5
1.2.3 <i>Fibre di vetro</i>	7
1.2.4 <i>Fibre di aramide</i>	10
1.2.5 <i>Fibre di PBO</i>	13
1.2.6 <i>Fibre a confronto</i>	15
1.3 <i>I Tessuti</i>	17
1.4 <i>Fili d'acciaio</i>	19
1.5 <i>Sistemi di applicazione dei compositi per il rinforzo di strutture civili</i>	21
1.5.1 <i>Valutazione preventiva del substrato</i>	22
1.5.2 <i>Preparazione della superficie</i>	23
1.5.2.1 <i>Applicazioni per Contatto</i>	23
1.5.2.2 <i>Applicazioni per Aderenza</i>	24
1.5.3 <i>Posa in opera dei tessuti</i>	26
1.5.3.1 <i>Dry lay up</i>	26
1.5.3.2 <i>Wet lay up</i>	27
1.5.4 <i>Protezione superficiale</i>	27
Capitolo 2. Meccanismi di crisi dei materiali compositi	
2.1 <i>Meccanismi di crisi: considerazioni generali</i>	28
2.1.1 <i>Meccanismi di crisi negli FRP (Fiber Reinforced Polymer)</i>	30
2.1.1.1 <i>Trazione parallela alle fibre</i>	30
2.1.1.2 <i>Taglio nel piano</i>	32
2.1.1.3 <i>Trazione non parallela alle fibre</i>	32
2.1.1.4 <i>Compressione</i>	33
2.1.2 <i>Meccanismi di crisi nei rinforzi a matrice cementizia</i>	34
2.1.2.1 <i>Prove di Pull-Out</i>	34
2.1.2.2 <i>Prove di Pull-Off</i>	36

Capitolo 3. Caratterizzazione sperimentale e modellazione	
3.1 <i>Introduzione</i>	40
3.2 <i>Programma sperimentale</i>	41
3.2.1 <i>Descrizione dei provini</i>	41
3.2.2 <i>Materiali</i>	43
3.3 <i>Risultati sperimentali</i>	45
3.3.1 <i>Diagrammi carico-freccia</i>	45
3.3.2 <i>Modi di crisi</i>	48
3.4 <i>Analisi dei risultati e conclusioni</i>	51
Capitolo 4. Applicazioni	
4.1 <i>Introduzione</i>	55
4.2 <i>Quadro normativo</i>	55
4.3 <i>Ex stabilimento della Tonnara Florio di Favignana (TP)</i>	60
4.3.1 <i>Consolidamento delle volte</i>	61
4.3.1.1 <i>Descrizione dell'intervento ed ipotesi adottate per la progettazione</i>	61
4.3.1.2 <i>Criterio di rinforzo</i>	62
4.3.1.3 <i>Descrizione dei materiali e del rinforzo della volta tipo</i>	63
4.3.1.4 <i>Documentazione fotografica delle fasi operative</i>	69
4.4 <i>Chiesa Madre di Noto (SR)</i>	71
4.4.1 <i>Rinforzo dei nuovi archi della navata mediana: descrizione dell'intervento</i>	73
4.5 <i>Altre applicazioni</i>	77
4.5.1 <i>Rinforzo di pilastri in calcestruzzo armato</i>	77
4.5.2 <i>Rinforzo e consolidamento di murature lesionate</i>	78
4.5.3 <i>Consolidamento di ciminiera</i>	79
Conclusioni	80
Allegati	83
Bibliografia	94

INTRODUZIONE

“È sensazione comune, da parte di quanti sono impegnati in attività di ricerca o di progettazione nel campo del consolidamento con materiali compositi fibrorinforzati, che l’Italia stia assumendo una posizione particolare in ambito internazionale, sia per il valore dei contributi di conoscenza forniti, sia per la presenza di un patrimonio edilizio particolarmente vario ed importante.

Ne fanno parte, infatti, costruzioni di rilevante importanza storica ed architettonica, oltre che realizzazioni più recenti di muratura, di c.a., di c.a.p. e di acciaio. La maggior parte di queste ultime ha superato abbondantemente i trent’anni di vita, per cui molte di esse necessitano di interventi più o meno urgenti di riabilitazione strutturale(...)”¹.

Proprio nell’ottica della riabilitazione strutturale, questo mio lavoro si prefigge l’intento di esporre, quanto più chiaramente possibile, quello che è il sorprendente ma altrettanto poco conosciuto mondo dei rinforzi strutturali che utilizzano *sistemi compositi fibrosi*, ossia quei materiali che sono costituiti da due fasi:

- **Il rinforzo**, presente in forma discontinua e caratterizzato da elevate proprietà meccaniche (fibre di carbonio, aramidiche, vetro, etc);
- **La matrice**, identificabile come elemento continuo, di solito meccanicamente più debole delle fibre ma che assolve due fondamentali compiti: tenere uniti fra di loro rinforzo ed elemento strutturale rinforzato e trasmettere le sollecitazioni dalla struttura alla fibra.

¹ CNR DT 200/2004 – “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati”

I sistemi di rinforzo in fibra di carbonio sono utilizzati già da parecchi anni in settori come quello navale, aeronautico e militare dove vengono sfruttati per la loro ineguagliabile resistenza specifica (resistenza a trazione per unità di peso); ma per effetto della riduzione dei costi delle materie prime e dell'ottimizzazione dei processi produttivi, questi materiali hanno fatto la loro comparsa nel campo dell'edilizia da circa vent'anni e fin dal loro esordio sono stati apprezzati per il binomio **resistenza-leggerezza**, che determina alte prestazioni e bassa invasività dell'intervento sulla struttura esistente.

L'utilizzo degli FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) nel campo dell'ingegneria civile riguarda essenzialmente il settore del restauro delle strutture degradate o danneggiate e quello dell'adeguamento statico delle strutture edificate in zona sismica; in questi settori è evidente la difficoltà operativa alla quale si va in contro se si volessero utilizzare tecniche di intervento che sfruttano materiali tradizionali.

I motivi per cui è opportuno intervenire con sistemi compositi fibrosi sono:

- **l'estrema leggerezza** del rinforzo, da cui ne deriva un incremento pressoché nullo delle masse sismiche ed allo stesso tempo un considerevole aumento della duttilità strutturale;
- **messa in opera** senza l'ausilio di particolari attrezzature da un numero limitato di operatori, da cui un minore costo della mano d'opera;
- posizionamento in **tempi brevi** e spesso senza interrompere l'esercizio della struttura.

Il parametro principale che definisce le caratteristiche di un rinforzo fibroso non è la resistenza a trazione, che risulta essere ben al di sopra dei tassi di lavoro cui sono soggette le fibre, bensì il modulo elastico, di fatti, più tale valore è elevato maggiore sarà il contributo irrigidente che il rinforzo potrà fornire all'elemento strutturale sul quale è applicato.

Generalmente per il rinforzo di strutture in c.a. si preferiscono fibre sia con resistenza a trazione medio-alta (>2000 MPa) che con modulo elastico medio-alto ($E=170-250$ GPa), mentre per il recupero degli edifici in muratura o con struttura in legno si scelgono fibre con modulo di elasticità più basso ($E\leq 80$ GPa) tipo quelle aramidiche che meglio si accordano con la rigidità propria del supporto rinforzato.

In questo contesto, ormai ampiamente ben disposto nei confronti dei compositi, si affacciano ora nuove generazioni di rinforzi.

A gli ormai "classici" FRP, realizzati con fibre di carbonio o fibre di vetro accoppiate a matrici organiche (resine epossidiche), si affiancano gli **FRCM** (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), i **TRM** (*Textile Reinforced Mortars*) e gli **SRG** (*Steel Reinforced Grout*) che sfruttano sia le eccezionali proprietà di fibre di nuova concezione come quelle in PBO (*Poliparafenilenbenzobisoxazolo*), sia un materiale come l'acciaio, che, per quanto comune nel campo dell'edilizia, viene caratterizzato da lavorazioni innovative che ne migliorano le prestazioni meccaniche. Tutte queste nuove tipologie di compositi, nonostante siano state annoverate con nomenclature così differenti, sono però accomunate dall'elemento che ne permette il funzionamento e l'adesione al supporto: *la matrice cementizia*.

CAPITOLO 1

Materiali e tecnologie

1.1 La Matrice

Nella realizzazione di rinforzo fibroso, la matrice, che sia resina epossidica o malta, riveste quattro ruoli fondamentali:

1. E' il **legante** che assicura il mantenimento della forma del rinforzo;
2. E' il **collante** che preserva la corretta adesione tra elemento rinforzato e rinforzo;
3. E' la **protezione** delle fibre da attacchi fisico-meccanici;
4. E' l'elemento che **trasferisce** le forze dall'elemento strutturale rinforzato al rinforzo e le **ripartisce** fra le fibre.

Le caratteristiche meccaniche della matrice sono decisamente inferiori a quelle delle fibre ma la loro unione realizza un perfetto connubio di resistenza e durabilità nel tempo, oltre a garantire la funzione per la quale il rinforzo è stato concepito.

1.1.1 Matrici Cementizie vs Resine epossidiche

Le *matrici inorganiche cementizie* sono prodotti di recentissima immissione nel campo dei materiali compositi con fibre. Sono costituite da un legante idraulico pozzolanico e da additivi specifici che favoriscono lo sviluppo di caratteristiche meccaniche e fisiche differenti da quelle tipiche degli FRP con *matrici organiche* a base polimerica, tra cui le più utilizzate sono le *resine epossidiche*.

Nelle seguenti tabelle cercherò di sintetizzare le principali differenze fisico-meccaniche delle due matrici. La valutazione critica di tali differenze da parte di chi concepisce un rinforzo in materiale composito, è alla base una corretta scelta progettuale.

MATRICE	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE (per flessione) [MPa]	RESISTENZA ALLE ALTE TEMPERATURE	UMIDITA' DEL SUPPORTO	LAVORABILITA'	TOSSICITA'	PULIZIA ATTREZZI UTILIZZATI PER LA POSA	COMPORIAMENTO A ROTTURA	VISCOSITA'
CEMENTIZIA	6.0	(a 28 gg) 3.5	Identica a quella del supporto in calcestruzzo	Favorisce l'adesione in quanto a base inorganica	Ampissimo Pot Life , tra i 5°C ed i 40°C non esistono grandi differenze nel tempo di lavorabilità	Nulla	Con sola acqua	Duttile	Alta allo stato fluido e quindi difficile impregnazione delle fibre
RESINA EPOSSIDICA	2.7-3.6	40-82	Perdono le loro caratteristiche strutturali e di adesione tra gli 80° e	Non possono essere applicate su sottofondi	Ridotto Pot Life , non possono essere applicate a temperature inferiori a	Pericolosità sia per contatto, sia per inalazione, consigliata	Con solventi nitro, ed acetone	Fragile	Bassa allo stato fluido e quindi facile impregnazione delle fibre

Tabella 1 - Caratteristiche principali delle matrici cementizie e delle resine epossidiche

1.2 Le Fibre

La fibra è la parte costituente il rinforzo che ha il compito di esercitare la **funzione resistente** vera e propria.

Nella realizzazione dei compositi le fibre possono essere *continue* o *discontinue*, nel primo caso la loro disposizione è allineata a formare dei nastri, dei tessuti o delle lamine anche di grandi dimensioni, mentre nel secondo caso le fibre sono corte e la loro disposizione è usualmente casuale.

Le fibre maggiormente diffuse sono quelle di **carbonio, vetro e aramide**, la loro geometria filiforme, con le quali si trovano in commercio, garantisce una **grande versatilità** nelle applicazioni e vi conferisce **spiccate caratteristiche di rigidità e resistenza** rispetto al loro uso tridimensionale, questo grazie alla **diminuzione dei difetti** che spesso sono causa di innesco di crisi locali.



Figura 1 - Filamenti di fibra

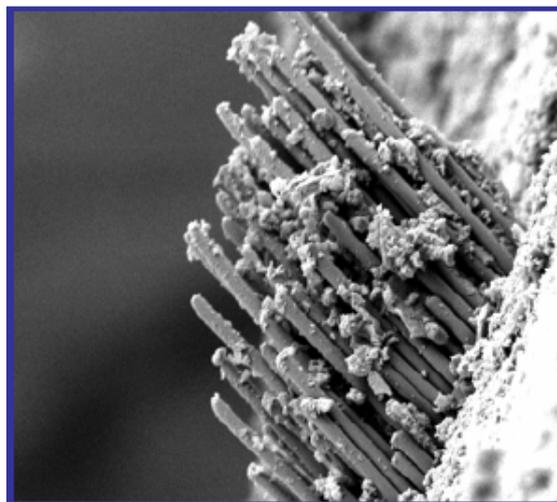


Figura 2 - Cavo di filatura annegato nella matrice

1.2.1 Classificazione delle fibre

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente, proprio per tale motivo le fibre sono disponibili sul mercato in varie forme :

FORMA	DESCRIZIONE	
FILAMENTO	<i>Elemento base di diametro di circa 10µm</i>	
CAVO DI FILATURA	<i>Fascio di gran numero di filamenti (migliaia), senza torsione. Usato per essere filato e strappato (fibre corte)</i>	
FILO FILATO (YARN)	<i>Filo formato da fibre tenute assieme da torsione</i>	
FILO ASSEMBLATO	<i>Fascio costituito da filati, assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale</i>	
TAPE	<i>Formato da centinaia di filati</i>	
FABRIC TESSUTI	<i>Le fibre sono disposte in modo da garantire una quasi isotropia nel piano (ordito-warp = direzione principale e trama-weft = direzione trasversale)</i>	

Tabella 2 - Classificazione fibre

I filati sono inoltre caratterizzati dalla composizione chimica e dalla **massa per unità di lunghezza : 1Tex=1g/km di fibra** (ISO 2974-2000).

1.2.2 Fibre di Carbonio

Le fibre di carbonio si ottengono con un processo industriale di lavorazione ad alta temperatura di particolari polimeri denominati *precursori*; il *poliacrilonitrile*, indicato generalmente con il suo acronimo PAN, è quello più utilizzato sia nel campo tessile dell'abbigliamento, sia nel campo dei prodotti per l'edilizia.

Il PAN subisce il suo processo di trasformazione in carbonio passando attraverso tre stadi:

1. **Stabilizzazione**: fase durante la quale le fibre vengono sottoposte ad un trattamento termico a 200-240°C per circa 24 h in aria in modo che la struttura molecolare subisca un'orientazione preferenziale nella direzione del carico applicato;
2. **Carbonizzazione**: durante questa fase la temperatura a cui sono sottoposte le fibre di PAN crescono fino a 1500°C in atmosfera inerte, in questo lasso di tempo la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio sono eliminati;
3. **Grafitizzazione**: nel corso di questa ultima fase, mantenendo le fibre in atmosfera inerte, la temperatura viene portata a 3000°C, grazie a queste particolari condizioni la struttura cristallina delle fibre può svilupparsi completamente avvicinandosi a quella della grafite².

Ovviamente i processi produttivi possono dare vita a materiali più o meno puri, questo è il motivo per cui sul mercato sono presenti diversi tipi di fibre di carbonio caratterizzate da parametri di elasticità e resistenza molto diversi tra loro. La *resistenza specifica* delle fibre di carbonio (circa 40 volte superiore al comune acciaio da c.a. FeB44K) è il parametro che maggiormente caratterizza le scelte di mercato, nelle applicazioni edilizie si prediligono le fibre ad alto modulo³ e ad alta resistenza.

² Minerale costituito da una delle due forme cristalline del carbonio, cristallizzato nel sistema esagonale, di colore grigio scuro, lucente e facilmente sfaldabile.

³ Modulo elastico a trazione.

MATERIALE	DENSITA' [kg/m ³]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	RESISTENZA SPECIFICA [MPa*m ³ /kg]
Carbonio ad alta resistenza	1800	230	5000	2	2.78
Carbonio ad alto modulo (HM)	1850	400	3000	0.9	1.62
Carbonio ad altissimo modulo	2100	700	1500	0.3	0.71
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0.07

Tabella 3 - Confronto tra le fibre di carbonio più comuni e l'acciaio da costruzione

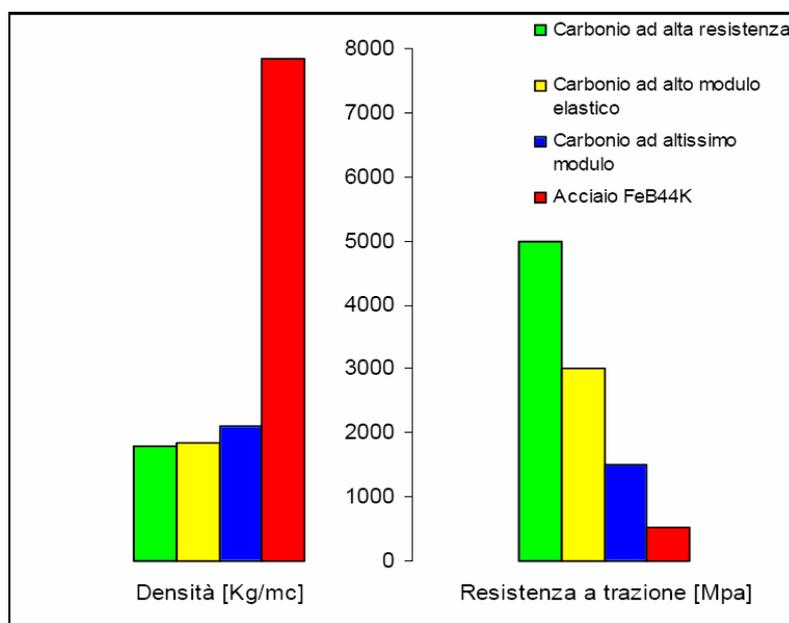


Figura 3 - Confronto tra le prestazioni delle più comuni fibre di carbonio

Le fibre di carbonio sono usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni, esse esibiscono un comportamento a rottura fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto anche se le tensioni di rottura sono elevate, risultano, però, le meno sensibili (rispetto alle fibre di vetro ed aramide) ai fenomeni di scorrimento viscoso (creep) e di fatica essendo contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

1.2.3 Fibre di Vetro

Le fibre di vetro si ottengono con un processo industriale di fusione di vari ossidi. Gli ossidi di calcio, silicio, magnesio, alluminio e boro uniti a formare il *tank* vengono fusi a 1500°C vengono quindi miscelati e raffreddati bruscamente fino a 1200°C. Il vetro fuso viene fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo di filiere di platino.

I filamenti sono quindi raggruppati a formare una treccia o fibra (*trand o end*) tipicamente costituita da 204 filamenti i quali presentano un diametro medio di circa 10 µm e sono ricoperti da un legante (binder o size).

I valori della massa lineare tipici del *roving* in cui i filati vengono raccolti per le applicazioni nel settore civile sono superiori a 2000 Tex.

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di fogli sottili denominati *mat*, questo può essere costituito sia da fibre lunghe continue che da fibre corte (tra 25 e 50 mm) disposte casualmente nel piano e tenute assieme da un legante chimico.



Figura 4 – In ordine Mat a fibre corte e continue

Al variare delle proporzioni delle materie prime impiegate si ottengono prodotti con caratteristiche e prestazioni meccaniche diverse tra loro.

Sul mercato è possibile reperire 7 diversi tipi:

IMPIEGO DELLE FIBRE	TIPO DI VETRO
Alta resistenza meccanica ed alla corrosione di acidi	R, S
Resistenti alla corrosione di acidi	A, C, R
Multiscopo	E
Alte caratteristiche dielettriche	D

Tabella 4 - Classificazione fibre di vetro

I tipi più diffusi sono quello “E” ed “S”; il tipo E è meno pregiato ed ha caratteristiche meccaniche modeste rispetto al tipo S.

MATERIALE	DENSITA' [kg/m ³]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	RESISTENZA SPECIFICA [MPa*m ³ /kg]
Fibre di vetro tipo E	2550	70	3500	3.8	1.37
Fibre di vetro tipo S	2500	90	4700	5.5	1.88
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0.07

Tabella 5 - Confronto tra le fibre di vetro più diffuse e l'acciaio da costruzione

Le fibre di vetro hanno un modulo di Young (E) inferiore a quello delle fibre di carbonio e di aramide, offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cura nella manipolazione durante la messa in opera; questo tipo di fibra ha una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica.

Le fibre di vetro, se non preventivamente trattate, sono vulnerabili all'azione degli alcali presenti nel calcestruzzo (K^+ ed Na^+). Tali ioni, infatti, possono reagire con la silice amorfa (SiO_2 , principale costituente del vetro) generando una forma gelatinosa di silicati alcalini idrati, con conseguente degrado delle fibre di vetro e relativa riduzione delle prestazioni meccaniche, per ovviare a questo inconveniente e per promuovere l'adesione tra fibre e matrice durante la messa in opera, le fibre sono sottoposte a trattamenti di **ensimaggio**⁴ (sizing) con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Tali trattamenti sono molto utili anche ai fini della durabilità e della resistenza a fatica.

⁴ Trattamento lubrificante applicato sulle fibre per facilitare le operazioni a valle della filatura e sui fili continui per migliorarne gli andamenti nelle successive fasi di lavorazione

1.2.4 Fibre di Aramide

Le fibre aramidiche sono di natura organica e sono caratterizzate da elevatissime prestazioni meccaniche.

Il termine *aramide* indica delle poliammidi aromatiche e deriva da *aramid*, contrazione dell'inglese *ARomaric poly-AMIDes*. Le poliammidi sono macromolecole caratterizzate dal legame ammidico CO-NH, formalmente derivante dalla condensazione di un acido carbossilico e di un'ammina, da cui dipendono molte proprietà di questo tipo di molecole, queste macromolecole possono avere una struttura lineare o contenente dei gruppi aromatici e la loro compagine dipende dal processo produttivo. Si hanno poliammidi a catena lineare quando i legami tra gli atomi di carbonio e i vari gruppi funzionali si sviluppano lungo una linea.

Innanzitutto, prima di poter definire le poliammidi con gruppi aromatici è opportuno spiegare cosa sia un *anello aromatico*. In chimica organica si intende una struttura formata da atomi di carbonio disposti ai vertici di un esagono con legami C-H a cui si dà il nome di *benzene*.

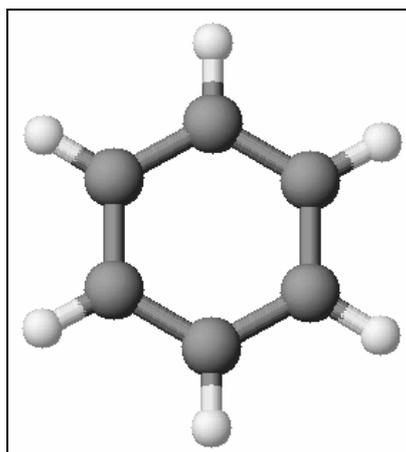


Figura 5 - Modello della molecola di benzene

Si hanno, quindi, poliammidi con gruppi aromatici se nella struttura molecolare più dell'85% delle molecole sono di benzene; in tal caso tali poliammidi sono comunemente dette *aramidi*.

Le prime fibre aramidiche denominate *Kevlar®*, sono state messe a

punto e brevettate dai ricercatori della DuPont™ (www.dupont.com) nel 1971. La tecnologia di produzione si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero in soluzione con successivo raffreddamento veloce ed essiccamento. La sintesi del polimero viene effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni fortemente acide, segue il trattamento di orientazione a caldo delle fibre per avvolgimento su bobine rotanti a forte velocità al fine di incrementare le caratteristiche meccaniche.

Naturalmente differenziando la struttura chimica del Kevlar® durante la sintesi si possono ottenere diverse prestazioni meccaniche:

MATERIALE	DENSITA' [kg/m ³]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	RESISTENZA SPECIFICA [MPa*m ³ /kg]
Kevlar® 29	1440	70	3600	3.6	2.50
Kevlar® 39	1450	140	3600	1.9	2.48
Kevlar® 149	1470	160	3200	1.5	2.18
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0.07

Tabella 6 - Confronto tra le fibre aramidiche più comuni e l'acciaio da costruzione

Le aramidiche hanno modulo elastico superiore a quello delle fibre di vetro ma pari a circa 1/3 di quelle di carbonio come anche la loro resistenza a trazione risulta superiore a quella del vetro ma inferiore a quella del carbonio, proprio per questi motivi il loro impiego non è competitivo nel ripristino del cemento armato.

Il punto di forza delle fibre aramidiche sta nel fatto che la loro rottura avviene con la formazione di microfibrille, questo fenomeno consente una grande dissipazione di energia di frattura questo

conferisce al Kevlar® una grande resistenza all'impatto che la rende ideale per la produzione di vari prodotti dalle cabine antiuragano ai giubbotti antiproiettile.



Figura 6 - Nastri in tessuto di Kevlar®

1.2.5 Fibre di PBO

Le fibre di PBO (*Poliparafenilenbenzobisoxazolo*) sono l'ultimissimo ritrovato nel campo dei rinforzi strutturali. Sviluppate dalla TOYOBO Co. giapponese precisamente con il nome di **Pbo Zylon®** sono state inizialmente introdotte nel campo militare (*vestiario antiproiettile*) nel 1998 e solo negli ultimi anni è iniziata la sperimentazione nel campo dell'ingegneria civile andandola a sostituire all'ormai *classica* fibra di carbonio.

Questa fibra presenta tenacità, modulo, resistenza all'abrasione, al taglio ed ai raggi UV di gran lunga superiori a qualsiasi fibra Aramidica oltre ad avere anche una elevata resistenza alla fiamma ed al calore.

Tutte queste eccezionali caratteristiche meccaniche e fisiche si arricchiscono ancora di più per il fatto che la fibra in PBO possiede una ottima stabilità ed un bassissimo assorbimento in ambiente umido (0.6%).

Nonostante queste caratteristiche rimane una fibra morbida e molto malleabile, di peso leggerissimo ma di costo elevato.



Figura 7 - Tessuto in PBO

La particolare formulazione chimica delle fibre in PBO nel campo dei rinforzi strutturali le rende particolarmente adatte all'utilizzo in abbinamento ad una matrice cementizia come proposto dal brevetto "Ruredil X Mesh Gold"⁵ elaborato dalla Ruredil spa (www.ruredil.it).

⁵ Scheda tecnica allegata

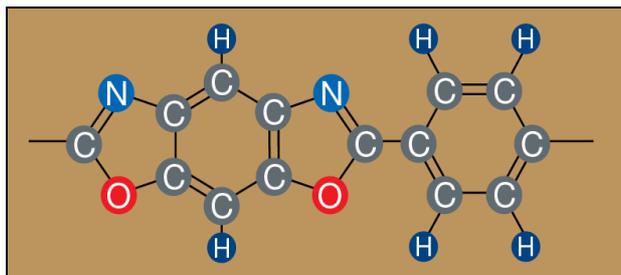


Figura 8 - Struttura chimica del PBO

Questo polimero di sintesi presenta una struttura molecolare con numerosi siti attivi (atomi di azoto, etc) in grado di stabilire legami chimici covalenti⁶ con i composti idrati della matrice inorganica a reazione idraulica alla quale viene abbinata nella realizzazione del composito.

MATERIALE	DENSITA' [kg/m ³]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	TEMPERATURA DI DECOMPOSIZIONE [°C]
PBO	1560	270	5800	2.15	650

⁶ Un legame covalente si instaura quando una o più coppie di elettroni vengono messe in comune fra due atomi

1.2.6 Fibre a confronto

Nelle seguenti tabelle e nei seguenti grafici vengono comparate le tre tipologie di fibre contemplate singolarmente nei paragrafi precedenti (carbonio, vetro, aramidiche e PBO). Viene posta attenzione anche alle destinazioni d'uso più indicate per ogni tipologia evidenziando le principali caratteristiche fisico-meccaniche.

FIBRE	RIGIDEZZA	RESISTENZA	COSTO	NOTE
VETRO	👎	👍	👍👍	*Bassa resistenza a fatica
ARAMIDICHE	👋	👍	👎	*Leggero; *Ottima resistenza a gli urti.
CARBONIO	👍	👍	👎	*Modulo elastico più alto
PBO	👍	👍👍	👎👎	*Leggero; *Ottima resistenza a gli urti.

Tabella 7 - Confronto prestazioni-costo per le tre fibre in esame: 👍 = buono, 👋 = intermedio, 👎 = pessimo.

MATERIALE	DENSITA' [g/cm ³]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	ASSORBIMENTO UMIDITA' [%]
VETRO E	2.58	73	2000	3.5	0.5
VETRO S	2.58	86	3500	4.0	0.3
CARBONIO	1.78	240	3400	1.4	0.1
CARBONIO H-M (High-Module)	1.83	640	1900	0.5	0.1
ARAMIDE	1.44	80	2800	3.3	4.5
ARAMIDE H-M (High-Module)	1.45	125	2800	2.0	2.5
PBO	1.56	270	5800	2.15	0.6
ACCIAIO	7.85	200	300-600	25.0	-

Tabella 8 - Confronto tra le proprietà fisico-meccaniche delle fibre in esame

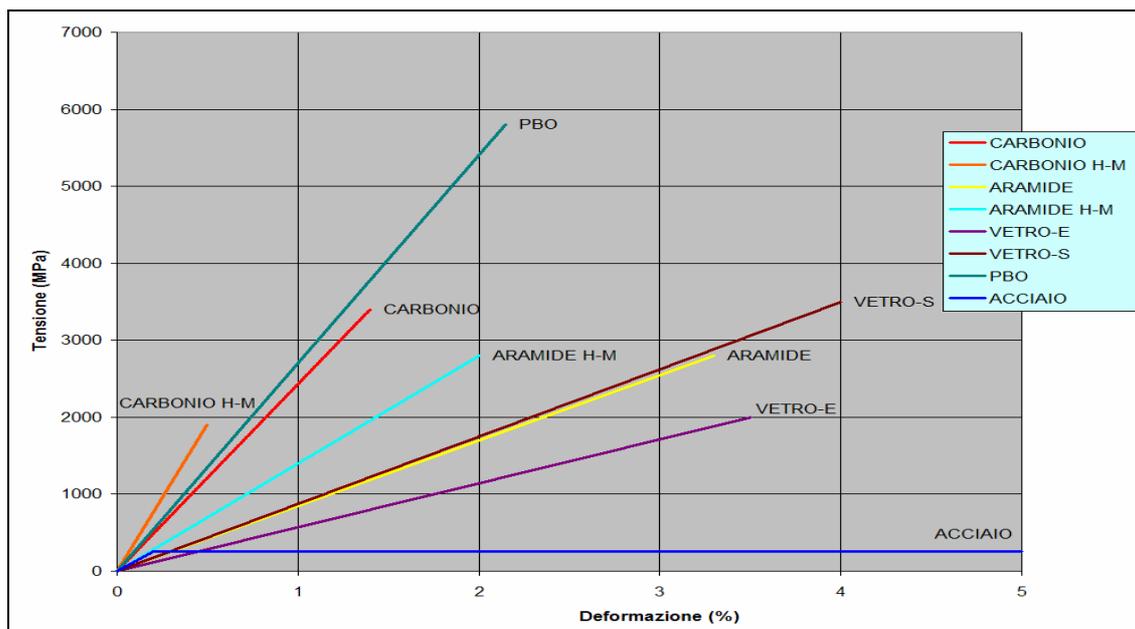


Figura 9 - Legami costitutivi

Da quanto emerge dai dati precedenti e dalle applicazioni realizzate a tutt'oggi possiamo ricavare la seguente tabella delle *destinazioni d'uso*:

FIBRA	UTILIZZO
VETRO	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Campo nautico (grazie al basso costo ed alla relativamente alta resistenza);</i> • <i>Realizzazione di laminati di spessore considerevole (>100mm);</i> • <i>Realizzazione di tubazioni sottomarine.</i>
ARAMIDICHE	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Campo aeronautico militare (elicotteri, giubbotti antiproiettile, elmetti antiproiettile, auto blindate, etc);</i>
CARBONIO	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Strutture aeronautiche;</i> • <i>Meccanica (auto e moto da competizione);</i> • <i>Attrezzature per lo sport (biciclette, racchette da tennis, canoe, remi, sci, etc);</i> • <i>Rinforzi di strutture civili.</i>
PBO	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Campo nautico (vele da regata);</i> • <i>Campo militare (vestiario antiproiettile);</i> • <i>Rinforzi di strutture civili.</i>

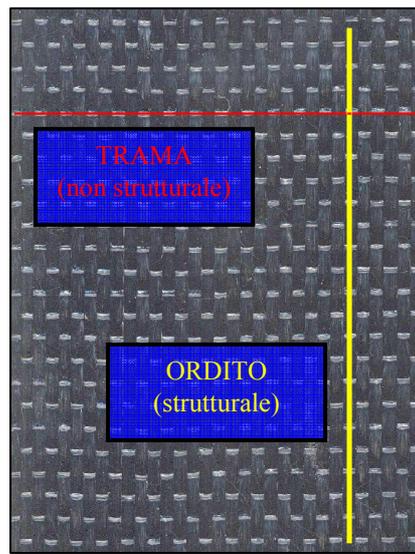
Tabella 9 - Destinazioni d'uso

1.3 I Tessuti

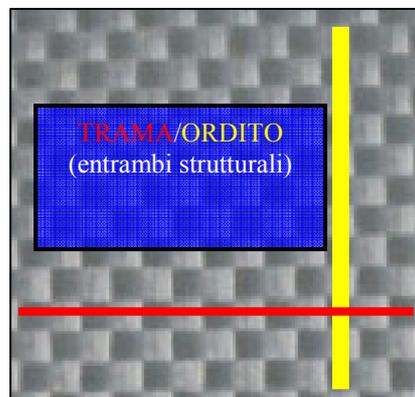
Le fibre descritte nei paragrafi precedenti, che siano esse di carbonio, vetro o aramidiche, in genere trovano applicazione dopo essere stati trasformati in tessuti. La tecnologia utilizzata poco si discosta da quella tessile per l'abbigliamento.

La configurazione geometrica dei tessuti è di tre tipi:

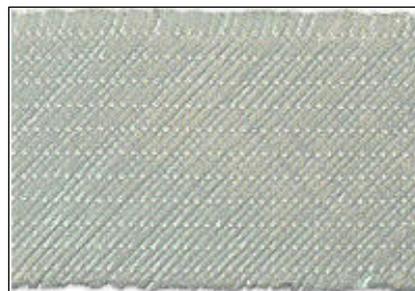
1. tessuti UNIDIREZIONALI: le fibre sono orientate tutte nella stessa direzione della lunghezza e tenute assieme da una trama leggera di tipo strutturale;



2. tessuti BIDIREZIONALI: le fibre sono orientate in due direzioni preferenziali a formare una tessitura trama-ordito ortogonale di solito bilanciata;



3. tessuti MULTIASSIALI: le fibre sono orientate in diverse direzioni del piano senza una direzione preferenziale;



Naturalmente i prodotti biassiali e multiassiali si prestano meglio alla riparazione di elementi con isostatiche di trazione curve o variabili in

genere. Essi sono da preferire rispetto all'applicazione multipla di tessuti monoassiali perché consentono di ridurre le fasi operative di lavorazione dovute ad una eventuale sovrapposizione di più strati di monoassiale sovrapposti con il fine di realizzare un rinforzo che funzioni in più direzioni.

Oltre alla disposizione delle fibre, i tessuti sono caratterizzati da alcuni parametri fisici e meccanici che è opportuno conoscere per poter progettare un rinforzo FRP o FRCM che sia:

- $p_x = \text{peso per unità di superficie (grammatura)} [\text{g/m}^2]$;
- $T_x = \text{titolo del filato (nella generica direzione } x) [\text{Tex} = \text{g/km}]$;
- $N_f = \text{numero di filati per unità di larghezza (nella generica direzione } x) [\text{n}^\circ/\text{cm}]$
- $E = \text{modulo elastico} [\text{MPa}]$;
- $f_{frp} = \text{resistenza a trazione (valore medio e caratteristico)} [\text{N}]$;
- $\varepsilon_{frp} = \text{allungamento a rottura} [\%]$;
- $S_e = \text{area resistente per unità di larghezza}$;
- $\rho = \text{peso specifico del materiale del tessuto}$.

Non sempre i produttori gabellano l'area resistente per unità di larghezza; in tal caso per ottenere il valore è sufficiente svolgere il calcolo illustrato di seguito:

$$S_e = \frac{P_x}{n \cdot \rho}$$

dove n = numero di direzioni del tessuto (es. 2 se biassiale, 3 se triassiale e così via).

Allo stesso modo, con una semplice relazione è possibile ricavare anche la grammatura del tessuto:

$$p_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10}$$

1.4 Fili in acciaio

I fili d'acciaio, utilizzati nella realizzazione negli SRG (*Steel Reinforced Grout*), sono identificati con la sigla UHTSS acronimo di *Ultra High Tensile Strength Steel* e sono messi in opera sotto forma di piccoli trefoli che a loro volta vengono assemblati in tessuti ed impregnati a mezzo di una matrice cementizia (lo stesso procedimento può essere realizzato con una matrice polimerica, nel qual caso si parlerà di SRP *Steel Reinforced Polymer*).

Sia gli SRG che gli SRP, prodotti con brevetto esclusivo dalla americana Hardwire (www.hardwirellc.com), impiegano materiale di base fornito dalla Goodyear generalmente utilizzato per la realizzazione delle carcasse dei pneumatici, e sono disponibili e già utilizzati sul mercato USA.

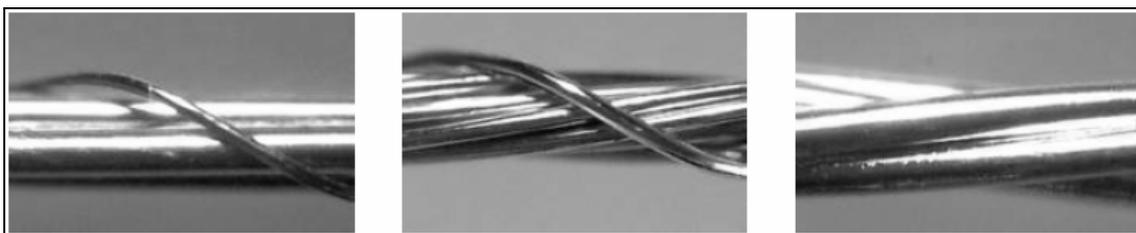


Figura 10 - Tipologie di trefolo in acciaio differenziate per numero di fili costituenti e per modalità di intreccio

I fattori fisico-geometrici capaci di influire sulla risposta meccanica del composito sono molteplici: la scelta della classe di resistenza del filamento, il diametro del filo, la tipologia di intreccio a formare il trefolo e quindi la *densità* del tessuto (Fig.11)

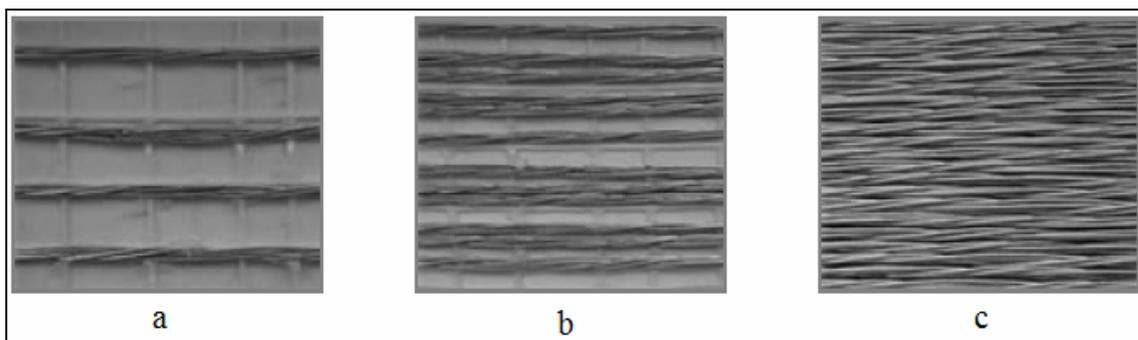


Figura 11 - Tipologie di tessuto in commercio classificate per densità: a) BASSA (4 trefoli per pollice), b) MEDIA (12 trefoli per pollice), c) ALTA (23 trefoli per pollice).

A questo punto è opportuno sottolineare come la *vera innovazione* di questi compositi sia *il tipo d'acciaio utilizzato*, derivante dall'evoluzione di un acciaio perlitico o ipereutetoidico (con contenuti di carbonio tra lo 0.8% e lo 0.95% contro circa il 2% dell'acciaio comune) che viene sottoposto ad un processo di produzione sintetizzato in cinque passi:

1. Prima trafilature grossolana;
2. Rinvenimento⁷;
3. Placcatura in ottone o zinco;
4. Seconda trafilatura fine;
5. Taglio.

Le classi di resistenza con le quali si ha a che fare sono comprese tra i 2400 ed i 4000 MPa, ma essendo i diametri dei fili ridottissimi, proprio per permetterne l'utilizzo nel campo dei compositi, ci si imbatte inevitabilmente in una perdita di duttilità del filo che si ripercuote in una rottura fragile del rinforzo ed in una riduzione della deformazione a rottura. I fili singolarmente sono realizzati in diametri variabili tra i 0.20 ed i 0.48 mm, che poi nella lavorazione a trefolo raggiungono i 0.89 - 1.02 mm.

La scelta di mettere in opera i fili in acciaio sotto forma di piccoli trefoli è guidata dall'esigenza di ottenere superfici corrugate che favoriscono l'adesione tra rinforzo e matrice e ne impediscono lo sfilamento prematuro. Un fattore aggiuntivo che influenza le caratteristiche prestazionali del rinforzo è la densità del tessuto, ovvero il numero di trefoli per unità di lunghezza.

Tale parametro, oltre ad incidere sulla risposta meccanica del composito ha una valenza aggiuntiva legata al fatto di poter far variare il passo dei trefoli e quindi consentire l'uso di matrici altamente viscosi come quelle cementizie che altrimenti avrebbero difficoltà a penetrare tra i filamenti vanificandone l'utilità stessa del rinforzo.

⁷ Il rinvenimento è un trattamento termico di un metallo eseguito al fine di ridurre gli effetti negativi della tempra sul materiale, nel caso questo presenti eccessiva durezza e quindi fragilità.

1.5 Sistemi di applicazione dei compositi per il rinforzo di strutture civili

E' necessario studiare ogni specifica applicazione e scegliere i componenti che garantiscano la migliore compatibilità fisico-chimica e meccanica sia tra fibra e matrice costituenti il rinforzo, sia nei confronti del supporto da trattare.

Non è possibile accoppiare indiscriminatamente matrici e tessuti qualsiasi, senza che esistano prove sperimentali ed applicative delle loro proprietà, di quelle del composito risultante e del complesso supporto-rinforzo. Il successo dell'intervento dipende infatti in maniera determinante dall'adesione tra supporto e rinforzo, dalla corretta impregnazione e dal corretto allineamento delle fibre.

La perfetta aderenza tra composito e supporto permette il trasferimento delle tensioni, ed è un requisito imprescindibile per l'efficacia del rinforzo, particolarmente nel caso in cui si operi su strutture sollecitate da azioni taglienti o inflesse.

Le fasi operative da seguire per realizzare un intervento sono:

1. Valutazione preventiva del substrato;
2. Preparazione della superficie;
3. Posa in opera dei tessuti (tecnica “*wet lay up*” oppure “*dry lay up*”);
4. Protezione superficiale.

esaminiamole ora nel dettaglio.

1.5.1 Valutazione preventiva del substrato

Prima di effettuare il ripristino mediante incollaggio esterno, è necessario verificare le condizioni del substrato e della sua superficie, al fine di accertare la idoneità ad essere esternamente rinforzato ed in particolare la possibilità di trasferimento delle tensioni mediante un'efficace aderenza all'interfaccia matrice-substrato questa condizione è di fondamentale importanza nelle applicazioni “*per aderenza*”, come i rinforzi a flessione e taglio, risulta essere meno importante nelle applicazioni “*per contatto*”, come nel caso del sconfinamento di colonne soggette a compressione assiale.

Nel caso in cui il supporto sul quale ci apprestiamo a realizzare il rinforzo sia di calcestruzzo è necessario controllare l'omogeneità su tutta l'area da rinforzare per scongiurare problemi di *peeling*⁸ e/o il distacco del copriferro; è anche opportuno verificare la resistenza a compressione del calcestruzzo che non deve essere inferiore a 15N/mm² e l'eventuale presenza di carbonatazione⁹ (mediante fenoftaleina).

Se invece il substrato sul quale andremo ad applicare il rinforzo è una muratura si opera sempre con le stesse finalità ma con tecniche differenti. Per valutare l'omogeneità sarà conveniente procedere con battitura manuale, radiografie, ultrasuoni, prove soniche, penetrometriche , etc, mentre per la valutazione delle proprietà meccaniche si procederà con l'asportazione di campioni sui quali eseguire le prove in laboratorio.

⁸ Rottura per asportazione di un sottile strato di calcestruzzo.

⁹ Reazione chimica per la quale i gruppi ossidrilici del conglomerato cementizio a contatto con l'anidride carbonica presente nell'aria porta alla formazione di carbonati di calcio, ciò determina una diminuzione del pH del calcestruzzo (da 13 a 8.5-9) che così non assicura più ai ferri d'armatura condizioni di protezione dall'ossidazione.

1.5.2 Preparazione della superficie

E' a questo punto opportuno distinguere due casi:

- Applicazioni per *Contatto*;
- Applicazioni per *Aderenza*.

1.5.2.1 Applicazioni per *Contatto*.

Nelle applicazioni per contatto, quale il confinamento di un elemento compresso, non è necessario garantire una aderenza perfetta tra il materiale di rinforzo ed il supporto.

La preparazione della superficie può quindi limitarsi ad una spazzolatura, alla rimozione dei detriti e ad una lisciatura con malta, per evitare che eventuali asperità generino delle concentrazioni di tensioni dannose non previste e possano danneggiare il composito.



Figura 12 - Rinforzo per contatto di un pilastro in c.a.

1.5.2.2 Applicazioni per *Aderenza*.

Nelle applicazioni per aderenza, come i rinforzi a flessione ed a taglio, la superficie esterna dell'elemento strutturale va adeguatamente preparata, in modo da assicurare la perfetta adesione del rinforzo.

Eventuali porzioni di materiale danneggiato vanno rimosse e sostituite con malta o altri materiali adatti; eventuali fessure devono essere riempite opportunamente per non dare luogo ad eventuali sconessioni della superficie che potrebbero innescare concentrazioni di tensioni parassite.

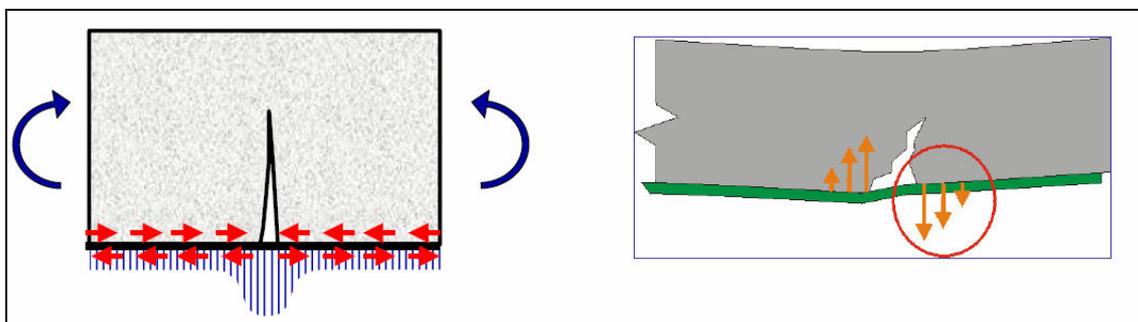


Figura 13 - Rappresentazione di come si concentrano le tensioni per effetto di asperità del substrato

Quanto segue è valido sia nelle applicazioni per contatto che in quelle per aderenza.

La preventiva rimozione del calcestruzzo ammalorato consente di appurare le condizioni delle armature metalliche e quindi, se necessario, di intervenire eseguendo interventi che eliminino le cause responsabili del deterioramento.

Se è in atto un processo corrosivo a carico delle armature metalliche, è necessario rimuovere lo strato deteriorato mediante spazzolatura o sabbiatura e poi trattare la superficie con idonei inibitori di corrosione.



Figura 14 - Ossidazione dei ferri di armatura

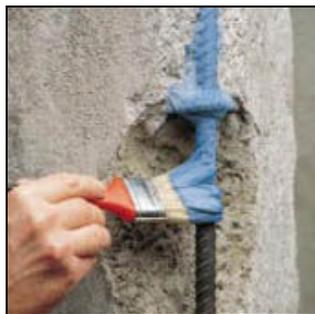


Figura 15 - Applicazione sui ferri di un inibitore di corrosione

Generalmente è necessario applicare un *primer*¹⁰ per migliorare le proprietà meccaniche dello strato superficiale e facilitare l'aderenza degli strati successivi che sovrapposti comporranno il rinforzo.

Una volta che tutto il calcestruzzo deteriorato sia stato rimosso e siamo stati adottati i provvedimenti più opportuni per arrestare la corrosione delle armature metalliche, si procede al suo reintegro mediante l'uso di betoncini espansivi da ripristino.

Se l'elemento strutturale da rinforzare presenta delle fessurazioni di ampiezza maggiore a 0.5 mm è consigliabile la loro sigillatura con iniezioni di sigillante prima di applicare il rinforzo.

In fine per pervenire ad una buona qualità del substrato può essere necessario sabbare la superficie interessata dal rinforzo.

Nel caso in cui si operi su superfici di elementi appartenenti a strutture nuove è necessario assicurarsi che le parti su cui si opererà siano perfettamente pulite da film disarmanti applicati sui casseri in fase di costruzione.

¹⁰ Termine in inglese (con il significato letterale di prima mano, mano di fondo) a indicare una sostanza collante che viene applicata su di un supporto per favorire l'adesione dello stato soprastante.

1.5.3 Posa in opera dei tessuti

Dopo aver eseguito con cura tutte le prescrizioni descritte al paragrafo 1.5.2 riguardanti la preparazione della superficie da rinforzare, siamo ora pronti per la posa del tessuto.

Questa operazione può essere eseguita con tecnica “a secco” (*dry lay up*), adatta per lavori di piccola estensione, oppure con lavorazione “in umido” (*wet lay up*), più indicata per applicazioni su grandi superfici.

1.5.3.1 Dry lay up

Si applica il tessuto orientando le fibre nella direzione prevista dal progetto, quindi, si impregna con resina epossidica o con malta cementizia rispettivamente utilizzando rulli o spatole per una corretta ed uniforme stesura cercando il più possibile di eliminare bolle d'aria altrimenti nocive per la resa finale; se necessario si potranno sovrapporre altri strati seguendo le stesse modalità.



Figura 16 - (FRP) Eliminazione dei vuoti d'aria ed impregnazione del tessuto mediante rullo



Figura 17 - (FRCM) Stesura a spatola della malta cementizia

1.5.3.2 Wet lay up

La tecnica si differenzia dalla precedente per le modalità con cui il tessuto viene posizionato, questo, infatti, viene preventivamente tagliato secondo le misure progettuali, quindi, impregnato a piè d'opera immergendolo in un bacile contenente la matrice (generalmente questa metodologia viene praticata con gli FRP e non con i rinforzi a matrice inorganica) molto fluida. Dopo aver estratto il tessuto dal recipiente viene strizzato con dei rulli per eliminare la matrice in eccesso e viene posizionato sul supporto con le fibre orientate nella direzione voluta, in fine si completa l'opera rullando quanto appena posizionato per eliminare le bolle d'aria.



Figura 18 - Preparazione all'impregnazione del tessuto

1.5.4 Protezione superficiale

E' questo l'ultimo step da eseguire per completare la messa in opera del rinforzo, necessario solo per gli FRP e non per i rinforzi a matrice cementizia.

A *polimerizzazione*¹¹ avvenuta (circa 48 ore), si stende una vernice acrilica opaca, o, in alternativa un prodotto a base cementizia che fornisca la protezione dai raggi UV.

¹¹ Reazione chimica per cui più monomeri si uniscono per formare un polimero ad alto peso molecolare.

CAPITOLO 2

Meccanismi di crisi

2.1 I meccanismi di crisi: considerazioni generali

Il comportamento meccanico dei materiali compositi è molto complesso, a causa della disomogeneità e dell'anisotropia del materiale.

Anche i meccanismi di crisi sono molto più complessi rispetto a quelli dei materiali omogenei ed isotropi, e questo rende difficile sia la previsione delle tensioni di crisi, sia l'interpretazione dei risultati sperimentali.

Già all'inizio della vita del composito sono normalmente presenti interruzioni di alcune fibre. Nel corso poi della vita del componente, altre fibre si possono rompere a causa di tensioni localizzate. Generalmente è presente anche *una mancanza di allineamento delle fibre*, causata da una scarsa accuratezza nella lavorazione o da stati tensionali anomali.

Una volta sottoposte a carico le fibre tendono a riallinearsi inducendo nella matrice stati di compressione e di trazione che possono provocare il distacco tra fibra e matrice, con conseguente riduzione della resistenza del composito.

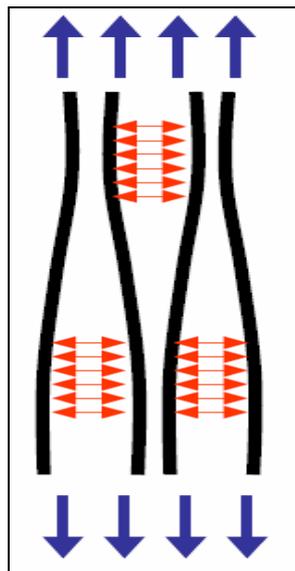


Figura 19 - Mancanza di allineamento delle fibre e conseguente compressione della matrice sotto l'azione del carico

Le fibre possono essere inoltre distribuite in modo non uniforme provocando, quando il composito viene sollecitato, l'insorgere di tensioni tangenziali tra fibre e matrice. Questa sollecitazione è nota come *taglio intralaminare*.

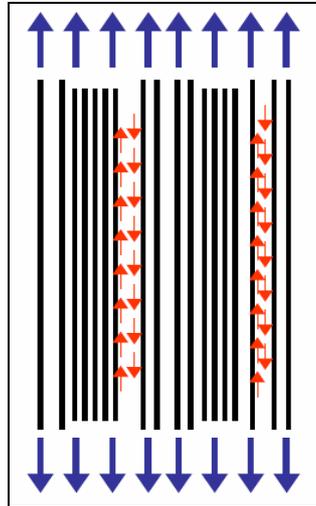


Figura 20 - Distribuzione non uniforme delle fibre e conseguente nascita del *Taglio Intralaminare* sotto l'azione del carico

Nel caso di matrici a base polimerica può essere presente porosità dovuta sia alle bolle d'aria rimaste nel corso dell'impregnazione, sia ai gas che si sviluppano durante la polimerizzazione della resina, mentre nel caso di matrici cementizie è l'operazione stessa dell'impregnazione delle fibre ad essere difficoltosa, a causa dell'alta viscosità della malta infatti, si riesce con difficoltà ad avvolgere le fibre meno superficiali.

Si trovano anche fratture nella resina indotte sia dal ritiro che si verifica nel corso della polimerizzazione, sia da tensioni di origine termica.

Che si tratti di FRP, FRCM, TRM o SRG sia un'impregnazione non accurata che l'impiego di prodotti non compatibili, possono causare *scarsa adesione tra il rinforzo e la matrice*.

2.1.1 Meccanismi di crisi negli FRP (Fiber Reinforced Polymer)

- *Trazione parallela alle fibre;*
- *Taglio nel piano;*
- *Trazione non parallela alle fibre;*
- *Compressione.*

2.1.1.1 Trazione parallela alle fibre

Quando un composito unidirezionale è sollecitato a trazione fino a rottura, la crisi è generalmente causata da una *combinazione di cause*, legate sia alla presenza di difetti citati nell'introduzione, sia al raggiungimento della deformazione ultima dei singoli componenti.

La crisi può avere inizio con la *rottura di singole fibre nella loro sezione più debole*. Ciò può avvenire anche a partire da *tensioni molto inferiori a quelle di crisi, per la presenza di difetti*. Il fenomeno inizialmente riguarda una piccola percentuale di fibre, ma la resina, lavorando a taglio, trasmette lo sforzo alle fibre adiacenti e in questo modo, anche le fibre rotte possono rimanere attive per quasi tutta la loro lunghezza, consentendo al composito di mantenere praticamente invariate le sue proprietà.

La *crisi si verifica quando il fenomeno si propaga in maniera instabile*. Ciò può verificarsi in due modi:

- **Propagazione in direzione trasversale** (Figura 3.a): l'aderenza tra le estremità della fibra rotta e la resina impedisce il distacco all'interfaccia; la resina subisce una crisi localizzata per modo I e la frattura giunge alle fibre adiacenti, provocando in esse un incremento localizzato di tensione, che ne può provocare la rottura; *l'innescò alla crisi può essere anche una microfessurazione della resina, qualora questa abbia una deformazione ultima inferiore a quella della fibra. Una crisi di questo tipo si verifica in genere con piccole frazioni volumetriche di fibra;*

- **Propagazione in direzione longitudinale** (Figura 3.b): è caratterizzata da una crisi *provocata dalle tensioni tangenziali*, crisi che può interessare *l'interfaccia tra fibra e resina (taglio intralaminare)*, oppure soltanto la resina; la crisi si propaga, a partire dalla sezione di rottura della fibra, lungo la fibra stessa. Questo tipo di crisi si verifica frequentemente in caso di elevate frazioni volumetriche di fibra.

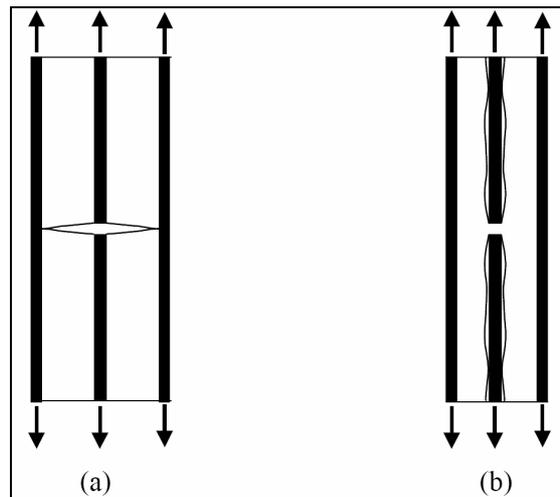


Figura 21 - (a) propagazione trasversale. (b) propagazione longitudinale

Le due modalità possono anche coesistere, o verificarsi in successione. Spesso si verificano dapprima fratture normali alle fibre, che interessano soprattutto la matrice, successivamente si verifica la frattura intralaminare, inizialmente in zone limitate e in seguito in modo più diffuso, fino a quando il fenomeno diviene instabile e sfocia nel collasso della lamina.

Le fasi precedenti il collasso non danno luogo a un sensibile scostamento dalla linearità del legame tensione-deformazione, e la crisi si manifesta in maniera improvvisa.

Se il composito è sollecitato a trazione nella direzione ortogonale alle fibre, la crisi avviene per il raggiungimento della tensione ultima di trazione della matrice.

2.1.1.2 Taglio nel piano

Se il composito è sollecitato a taglio nel piano, la crisi avviene per il raggiungimento della tensione tangenziale ultima della matrice.

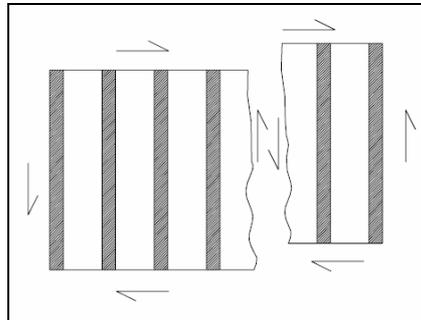


Figura 22 - Crisi per taglio nel piano (intralaminare)

2.1.1.3 Trazione non parallela alle fibre

Se si considera il comportamento a trazione di una lamina unidirezionale sollecitata secondo una *direzione θ rispetto alla direzione delle fibre*, si possono distinguere angoli di carico per i quali sono più evidenti alcuni tipi di rottura rispetto ad altri.

Angolo θ	Tipo di rottura
tra 0° e 5°	Rottura trasversale per cedimento delle fibre
tra 5° e $20^\circ \div 25^\circ$	Rottura per taglio intralaminare
tra $20^\circ \div 25^\circ$ e 45°	Rottura per taglio intralaminare + Rottura matrice per trazione
tra 45° e 90°	Rottura matrice per trazione

Tabella 10- Angolazione del carico applicato e corrispondente tipologia di rottura

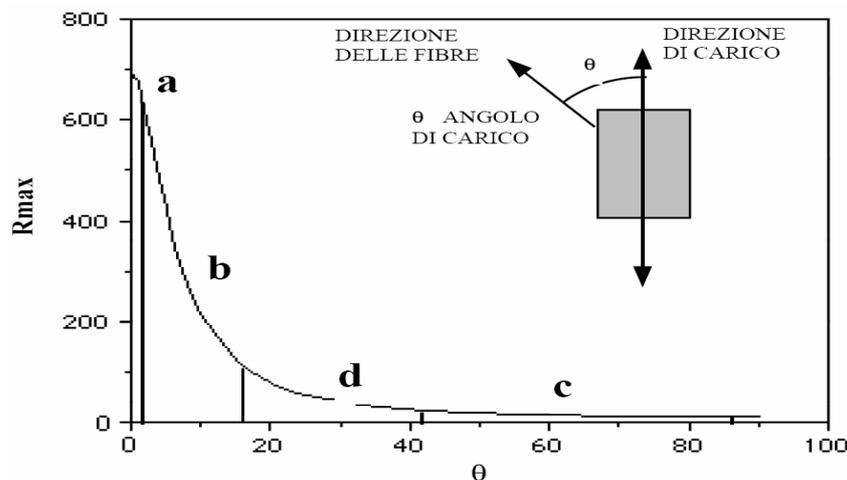


Figura 23 - Variazione della resistenza a trazione di un composito unidirezionale al variare dell'angolo tra la direzione di sollecitazione e quella delle fibre

2.1.1.4 Compressione

Nei compositi unidirezionali sollecitati a compressione *nella direzione delle fibre*, la crisi del composito può avvenire per:

- **Compressione longitudinale con distacchi tra fibre e matrice** (Figura 6.a);
- **Instabilità delle fibre a causa della loro grandissima snellezza**, che solo in parte la matrice può contrastare (Figura 6.b e 6.c).

In ogni caso la *resistenza a compressione* è molto inferiore rispetto a quella a trazione.

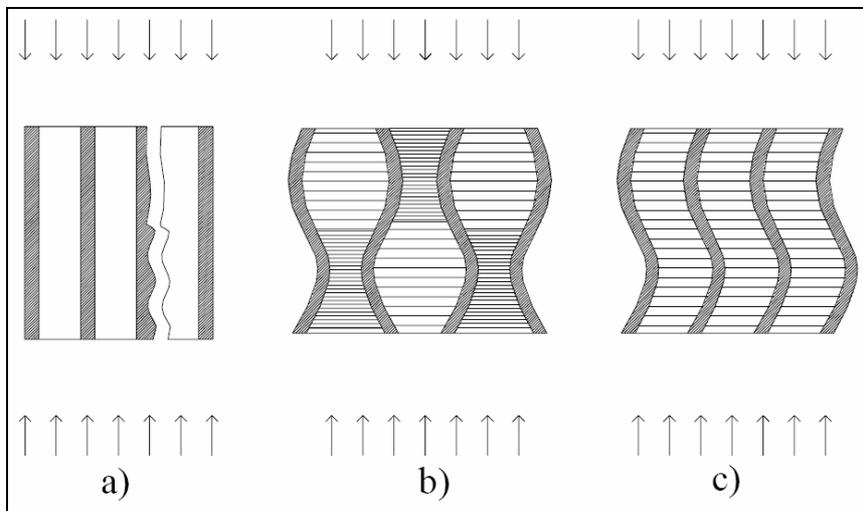


Figura 24 - Meccanismi di crisi di un composito unidirezionale per compressione parallela alle fibre

Nella direzione ortogonale alle fibre la crisi avviene per compressione della matrice e spesso si creano superfici di scorrimento.

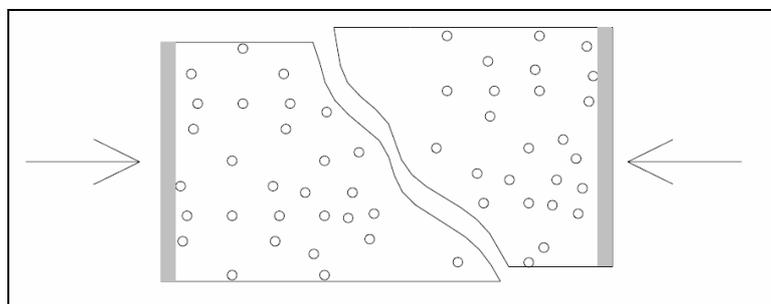


Figura 25 - Crisi di un composito unidirezionale per compressione ortogonale alle fibre

In una lamina bidirezionale, e soprattutto in un laminato composto da più lamine, tutte queste tipologie di rottura interagiscono tra loro e la crisi si manifesta in maniera più complessa.

2.1.2 I meccanismi di crisi nei rinforzi a Matrice Cementizia

I meccanismi di crisi dei materiali compositi a matrice inorganica (cementizia) si differenziano sostanzialmente da quelli a matrice organica (resina epossidica) per le modalità con cui si manifestano.

Generalmente la crisi di provini rinforzati con questi compositi risulta **più duttile** di quella dei medesimi provini rinforzati con FRP, anche se i rinforzi in FRCM, TRM o SRG **pagano** in termini di carico ultimo di collasso.

Il perché di questa maggiore duttilità è concepibile se focalizziamo la nostra attenzione su un composito unidirezionale sollecitato a *trazione parallela alle fibre*.

2.1.2.1 Prove di Pull-out

Per testare il comportamento di un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre ed individuare il meccanismo che porta ad una rottura meno repentina e quindi più duttile, si può fare riferimento ad una *prova di pull-out*¹² che valuti *l'interazione tra fibre e matrice cementizia*.

I test, che sono stati condotti su fibre di vetro accoppiate ad una malta cementizia a grana fine e che sono descritti con perizia in [1], hanno portato alla luce quanto segue.

Il comportamento durante la prova è condizionato dalla *forte adesione che i filamenti più esteri del filato sviluppano con la matrice mentre quelli più interni si lasciano scivolare come avvolti da una guaina*, questo avviene perché la penetrazione della malta tra i filati non avviene in maniera omogenea.

In linea di principio quanto appena esposto non deve lasciare stupiti, in quanto, a differenza delle resine epossidiche che compongono i classici FRP, le malte utilizzate negli rinforzi a matrice cementizia hanno nel loro

¹² Prova sperimentale a carattere semi-distruttivo che consiste nell'estrarre un inserto (in questo caso un filato in fibra di vetro) da una matrice solida per valutarne l'interazione e la resistenza dei materiali testati

impasto la polvere di cemento che per quanto possa essere fine, come quella utilizzata nella prova che era di circa $10\mu\text{m}$, difficilmente riesce a penetrare negli spazi tra i filamenti di fibra che è dell'ordine dei $3\mu\text{m}$ anche se le operazioni di messa in opera generalmente inficiano le caratteristiche geometriche iniziali dei tessuti allargando queste aperture e permettendo una maggiore penetrazione della matrice.

Il meccanismo di rottura che si evidenzia prende il nome di “*telescopic failure*”, questo nome, che letteralmente significa “*rottura telescopica*”, deriva proprio dalla modalità con cui si manifesta il successivo sfilamento dei filamenti (*pull-out failure*) che si protrae dagli strati più esterni fino al nucleo del filato e si combina ad un secondo meccanismo di crisi che coinvolge i filamenti più esterni, i quali, prima di subire l'estrazione dalla matrice cementizia, giungono a rottura per il superamento della resistenza a trazione ultima (*tensile failure*), in questo modo la perdita di efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo una *maggiore dissipazione di energia di rottura* e quindi la duttilità che li contraddistingue.

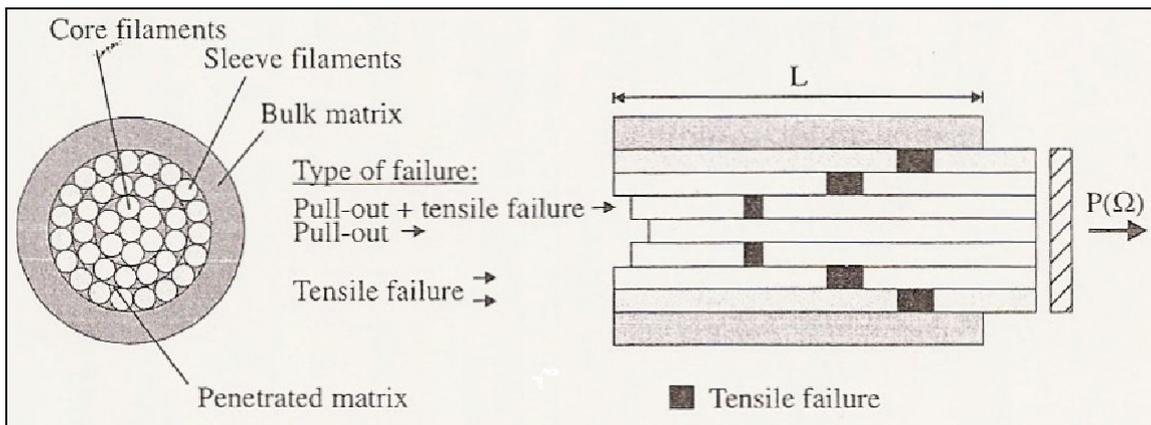


Figura 26 - Meccanismi di crisi di un rinforzo annegato in una matrice cementizia

In base a quanto esposto, si capisce come la rappresentazione analitica e quindi la previsione del comportamento di un'applicazione di questo tipo sia attualmente un problema per i ricercatori del settore.

2.1.2.2 Prove di Pull-off

Si tratta di un metodo diretto di prova consistente in una estrazione semi-distruttiva, atto a stimare la resistenza a trazione dei materiali di ripristino collegati al sottofondo. La prova viene preparata incollando direttamente sulla fibra, in una zona appositamente predisposta, con opportune resine, un apposito elemento metallico di dimensioni solitamente cm 4x4 dotato di una apposita asta. Prima della prova viene eseguito un taglio lungo il bordo del piastrino metallico in modo da svincolare la zona in prova da quelle circostanti. Il taglio deve avere una profondità almeno pari allo spessore della fibra. Ad avvenuta maturazione della resina si procede applicando al disco una pressione di distacco in direzione normale alla parete con opportuno martinetto dotato di manometro tarato, il quale esercita la forza contrastando su una struttura di sostegno.

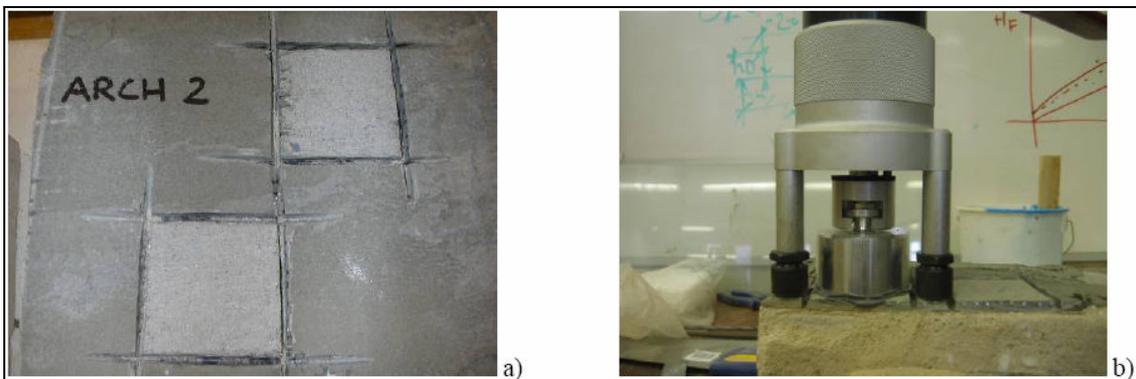


Figura 27 - a) elemento di rinforzo testato con prova di Pull-Off; b) macchina di prova per il Pull Off

Prove di questo tipo sono state effettuate sia su provini rinforzati con SRP (*Steel Reinforced Polymer*) che con SRG (*Steel Reinforced Grout*), ed i risultati riportati in [2] hanno evidenziato le seguenti modalità di crisi:

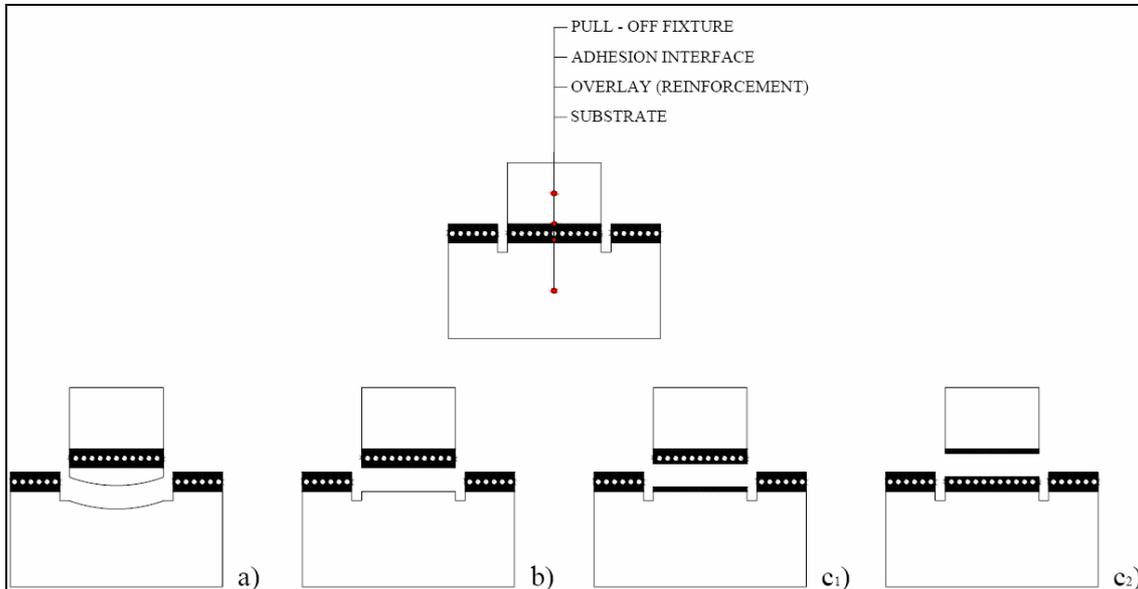


Figura 28 - Modalità di crisi dei provini di SRG e SRP sottoposti a prova di Pull-Off

Con riferimento alla figura soprastante analizziamo i diversi schemi di rottura:

a) Frattura Coesiva: all'interno del materiale di supporto.

Lo stesso materiale è presente su entrambe le superfici di frattura, le quali possono presentarsi lisce o rugose. E' il tipo di frattura che si



osserva nelle condizioni ideali di applicazione dell'adesivo, ed è la modalità di crisi che ha caratterizzato tutti i provini con SRP testati in [2];

b) Frattura Adesiva: all'interfaccia tra l'adesivo e l'aderendo.

Si manifesta quando la resistenza dell'interfaccia (forza di adesione) è minore di quella dell'aderendo.

Questo meccanismo è quello che nei

test eseguiti in [2] ha caratterizzato la rottura di parte dei provini rinforzati con SRG;



c) Frattura Mista: all'interno dello strato di rinforzo.

Si manifesta in corrispondenza di uno strato di matrice non perfettamente consolidato. Può avvenire subito al di sotto delle fibre

in acciaio (c1) oppure subito al di sopra (c2). Questa ultima modalità di crisi si è manifestata per tutti gli altri provini in SRG che non hanno manifestato rottura tipo (b).



Nella seguente tabella vengono riportati i risultati ottenuti per la prova di pull-off condotta da [2] su rinforzi in fibra d'acciaio (*Ultra High Tensile Strength Steel*) prodotti dalla Hardwire¹³ accoppiate ad una matrice organica (SRP) e ad una matrice inorganica (SRG). Come detto in precedenza tutti i provini con SRP hanno mostrato modalità di crisi tipo a), mentre quelli a matrice cementizia, arrivando a rottura prevalentemente con modalità c1) e c2), hanno evidenziato una migliore adesione al supporto ma una scarsa capacità di uniformarsi alla parte discontinua del pacchetto di rinforzo, questa difformità di comportamento è imputabile, come per le

¹³ Schede tecniche allegate

prove di pull-out, alla maggiore densità della matrice cementizia che non riesce ad avvolgere completamente la fibra metallica.

Reinforcement type	Ply type	Specimen	Tensile bond strength (MPa)	Failure mode
SRG	Hardwire 3SX – 12	1	1.49	c ₂
		2	1.31	c ₁
		3	1.51	c ₁
		4	1.26	b
	Hardwire 3X2 – 4	1	1.78	c ₂
		2	1.32	c ₂
		3	0.74	b
		4	0.91	b
SRP	Hardwire 3SX – 12	1	1.52	a
		2	–	–
		3	2.39	a
		4	1.95	a
	Hardwire 3X2 – 4	1	2.12	a
		2	1.01	a
		3	1.51	a
		4	0.85	a

Tabella 11 - Risultati prova di Pull-Off

CAPITOLO 3

Caratterizzazione sperimentale e modellazione

3.1 Introduzione

In questo capitolo sono descritti i risultati sperimentali di prove a flessione di travi di calcestruzzo armato rinforzate con **rete di carbonio e matrice cementizia (CFRP)** e con **rete in PBO (*Poliparafenilenbenzobisoxazolo*) e matrice cementizia (FRCM)**. I risultati, in termini di diagrammi carico-freccia, sono confrontati con quelli relativi a provini di riferimento non rinforzati e con quelli relativi a rinforzi di comprovata efficacia [3], [4], [5] realizzati con fibre unidirezionali di carbonio e matrice epossidica.

I sistemi di rinforzo sono identificati dai seguenti nomi commerciali:

- “*Ruredil X Mesh C10/M50*”¹⁴ (sistema di rinforzo a matrice cementizia e rete in carbonio);
- “*Ruredil X Mesh Gold*”¹ (sistema di rinforzo a matrice cementizia e rete in PBO);
- “*Ruredil X Wrap 310*”¹ (sistema di rinforzo a matrice polimerica e rete di carbonio).

Tutte le prove sono state eseguite presso il Laboratorio di Scienza delle Costruzioni dello IUAV- Università di Venezia e sono ampiamente descritte in [6] e [7].

¹⁴ Scheda tecnica allegata

3.2 Programma sperimentale

3.2.1 Descrizione dei provini

Per le prove [6] e [7] sono state utilizzate varie travi con conformazione geometrica e modalità di applicazione del rinforzo e dei carichi differenti; io invece farò riferimento solo alle travi per cui le caratteristiche appena citate sono simili e sono rappresentate in Figura 1.

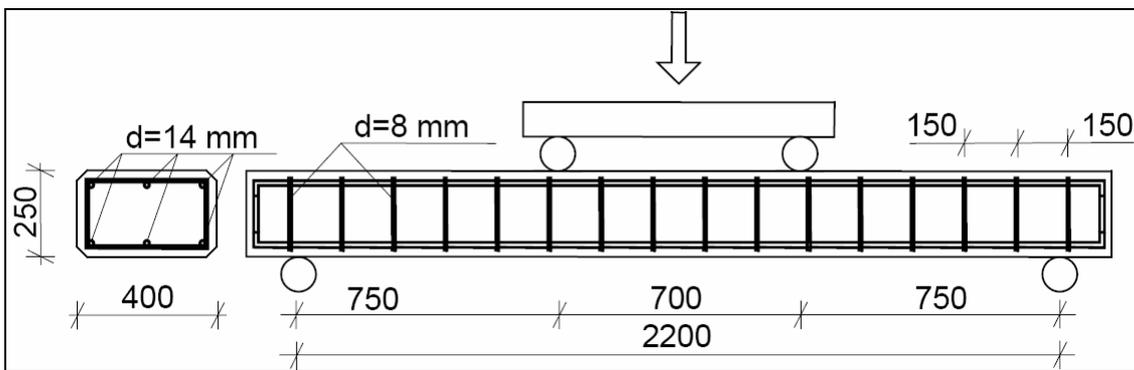


Figura 29 - Geometria dei provini. "d" indica il diametro delle barre e le quote sono in mm.

Le travi totali in oggetto sono 8:

- due non sono state rinforzate e le indicheremo con A1 e A2 (provini di riferimento);
- due sono state rinforzate con due strati di FRCM a rete in carbonio all'intradosso e con fasce a U alle estremità e le indicheremo con B1 e B2 (Figura 2);
- due sono state rinforzate come le precedenti ma al posto della rete in carbonio è stata utilizzata una rete in PBO e le indicheremo con C1 e C2 (Figura 3);
- due sono state rinforzate con la stessa disposizione del rinforzo delle precedenti ma è stata usata una rete in carbonio accoppiata alla matrice epossidica (CFRP) e le indicheremo con D1 e D2 (Figura 4).

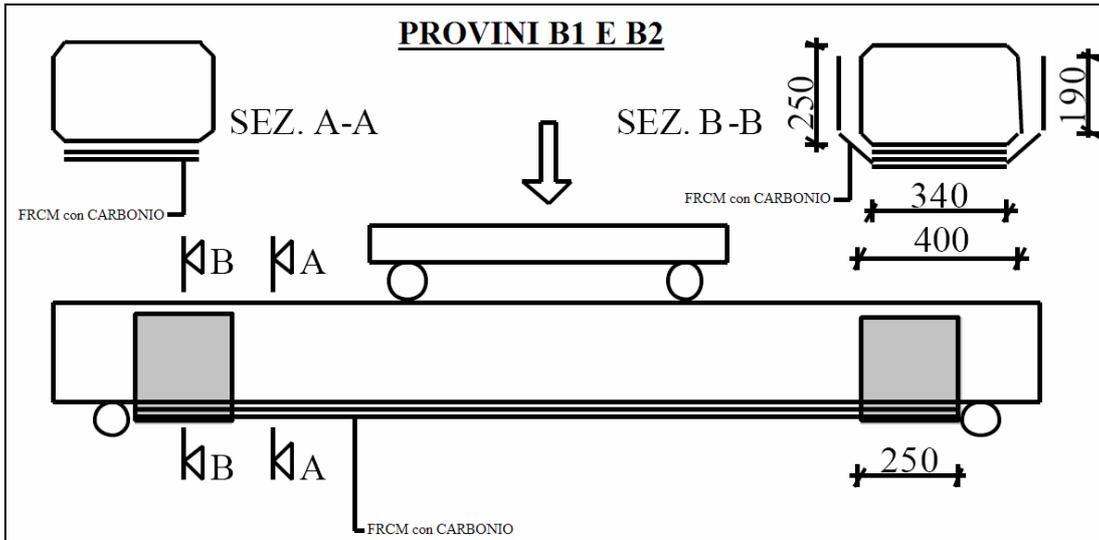


Figura 30 - Provini B: schema di carico e geometria del rinforzo

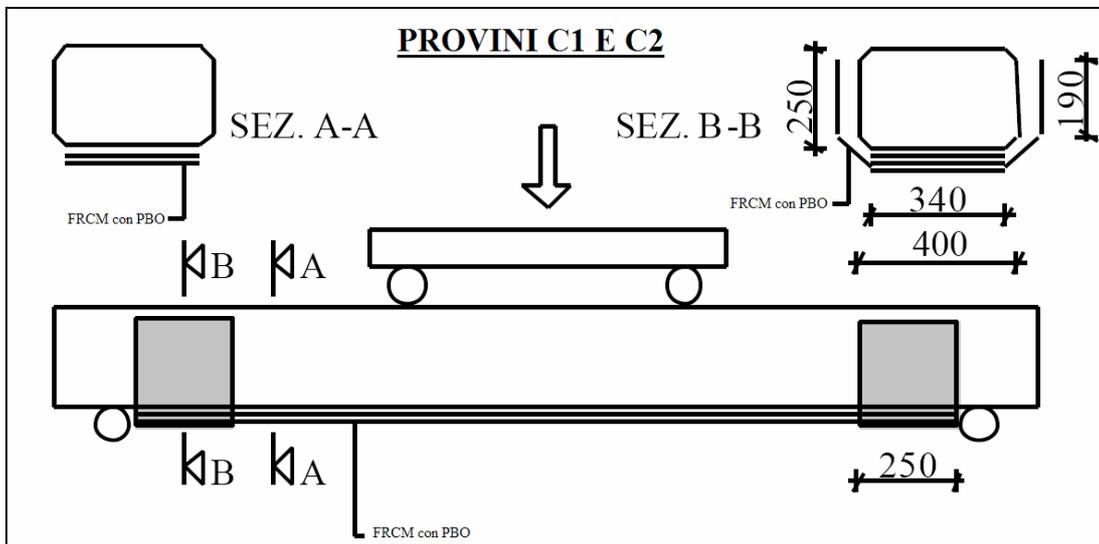


Figura 31 - Provini C: schema di carico e geometria del rinforzo

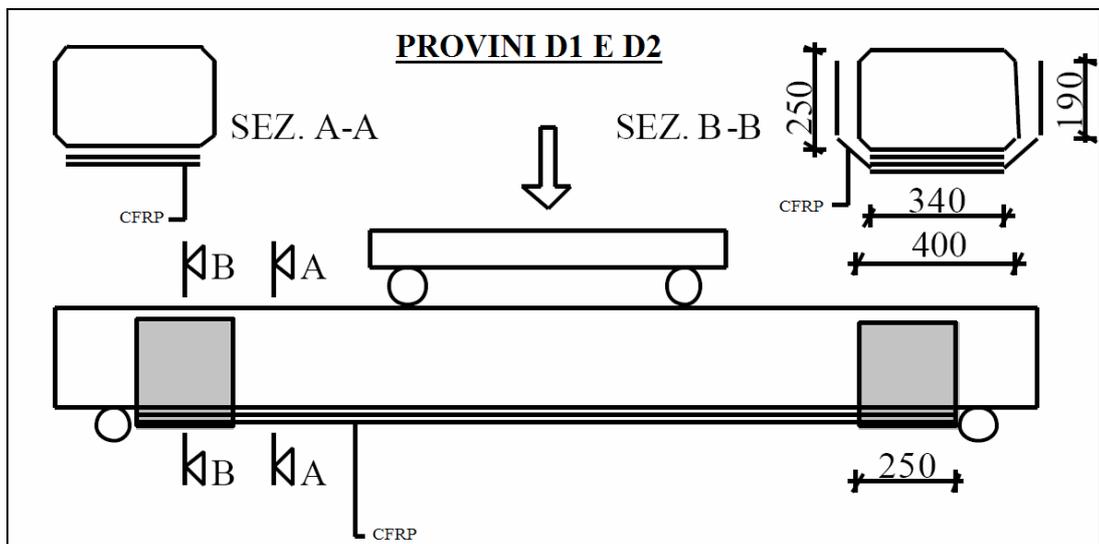


Figura 32 - Provini D: schema di carico e geometria del rinforzo

Di tutti i provini è stata effettuata una prova di flessione su quattro punti con l'acquisizione del carico e della freccia in mezzeria, secondo lo schema della figura sottostante.

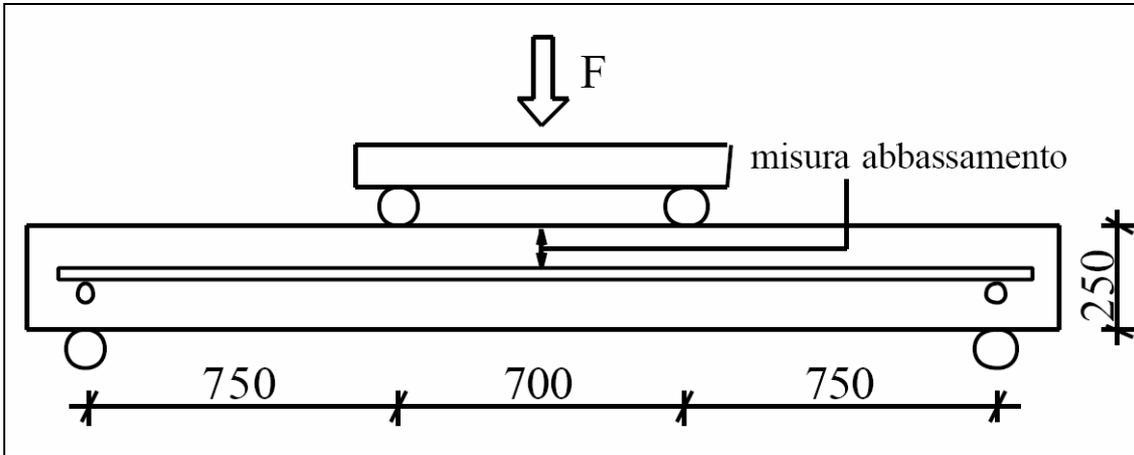


Figura 33 - Schema di prova

3.2.2 Materiali

Come esplicitato in [7] la resistenza a compressione del calcestruzzo è stata valutata mediante prove su cubetti, mentre le tensioni di snervamento e di rottura dell'acciaio sono state valutate con prova di trazione su una barra rimossa da una delle travi dopo la prova di flessione.

La rete in fibra di carbonio utilizzata nei provini B è di tipo bilanciato di peso 214 g/m^2 e la maglia della rete è di circa 1 cm, mentre la rete in PBO utilizzata nei provini C ha le fibre disposte lungo due direzioni ortogonali (Figura 6); la sezione delle fibre è doppia in una direzione rispetto all'altra e la maglia della rete è approssimativamente $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ed ha peso 144 g/m^2 .

Il prodotto CFRP utilizzato nei provini D è costituito da un foglio con fibre unidirezionali di carbonio di peso 310 g/m^2 .

La Tabella 1 riassume le caratteristiche dei rinforzi considerati dichiarate dal produttore, mentre la Tabella 2 illustra le caratteristiche fisico-meccaniche dei provini.



Figura 34 - Rete in PBO

MATERIALE	Spessore fibre [mm]	Resistenza a trazione [MPa]	Resistenza a compressione [MPa]	Dilatazione a rottura [‰]	Modulo elastico [GPa]
Fibre PBO	0.046 (dir.1) 0.022 (dir.2)	5800	--	21.5	270
Fibre CARBONIO	0.047	4800	--	20	240
CFRP	0.17	>3500	--	>15	>240
Matrice Cementizia	--	3.5 (a 28 gg)	29 (a 28 gg)	--	6

Tabella 12 - Caratteristiche fisico meccaniche dei rinforzi

PROVINO	Tipo di matrice	Sezione rinforzo flessionale (sole fibre) [mm ²]	Resistenza a compressione cubica del calcestruzzo (media) [MPa]	Acciaio: resistenza di snervamento [MPa]	Acciaio: resistenza a rottura [MPa]
A1 e A2	--	--	47.68	523.15	619.84
B1 e B2	cementizia	31.96			
C1 e C2	cementizia	31.28			
D1 e D2	epossidica	42.50			

Tabella 13 - Caratteristiche dei provini

3.3 Risultati sperimentali

3.3.1 Diagrammi carico-freccia

Le Figure dalla 7 alla 9 rappresentano i diagrammi carico-freccia sperimentali mentre la Tabella 3 riassume i carichi di collasso di tutti i provini in esame.

Nei diagrammi dei **provini A** (non rinforzati) si può osservare una prima fase non fessurata (fino circa ai 40 kN) alla quale segue una fase fessurata ma in cui ancora l'acciaio risulta in fase elastica, questa seconda fase dura fino al punto di ginocchio, in corrispondenza del quale l'acciaio si snerva, inizia da lì una fase di incrudimento in cui il carico cresce moderatamente fino al collasso.

I diagrammi di **tutti i provini rinforzati** risultano approssimativamente coincidenti con quelli delle travi A fino allo snervamento dell'acciaio, questo perché ancora non sono entrati in funzione i rinforzi, quando questo avviene si nota un considerevole incremento del carico ed un andamento elastico-lineare fino alla rottura delle fibre.

Rispetto ai provini non rinforzati si è registrato un innalzamento del carico di snervamento dell'acciaio, questo perché parte degli sforzi di trazione al quale è soggetta l'armatura viene assorbita dal rinforzo, ed un aumento del carico ultimo di collasso della trave. Le modalità di crisi, che analizzeremo più compiutamente nel prossimo paragrafo, risultano **più duttile per i provini B** (FRCM con rete di carbonio); evidentemente la matrice cementizia, come già spiegato al paragrafo 2.1.2.1, ha consentito graduali scorrimenti delle fibre e quindi uno scarico graduale di queste in prossimità del collasso. A favore dei **provini C e D** si è invece registrato un **carico di collasso più alto**.

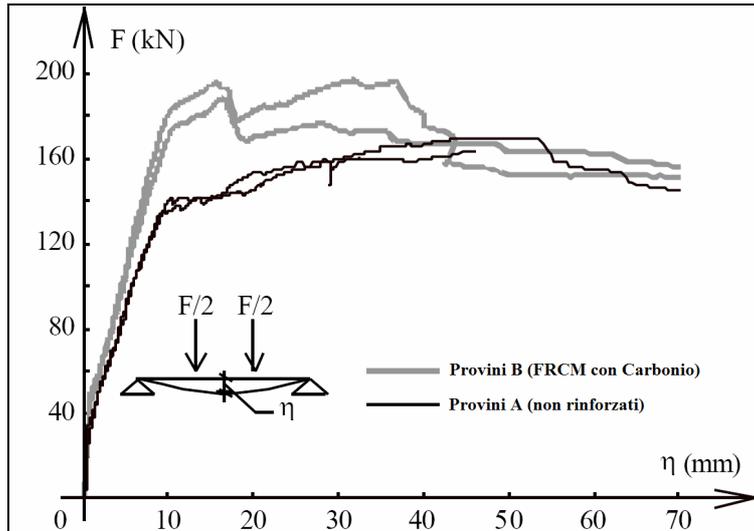


Figura 35 - Diagrammi carico-freccia Provini B

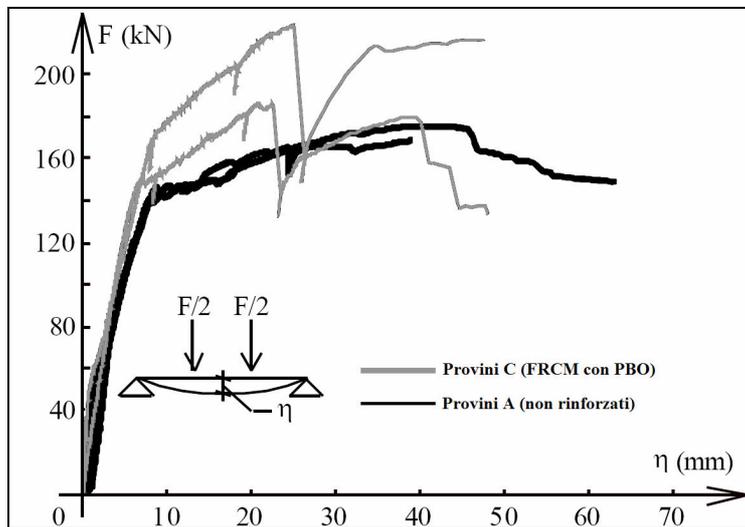


Figura 36 - Diagrammi carico-freccia Provini C

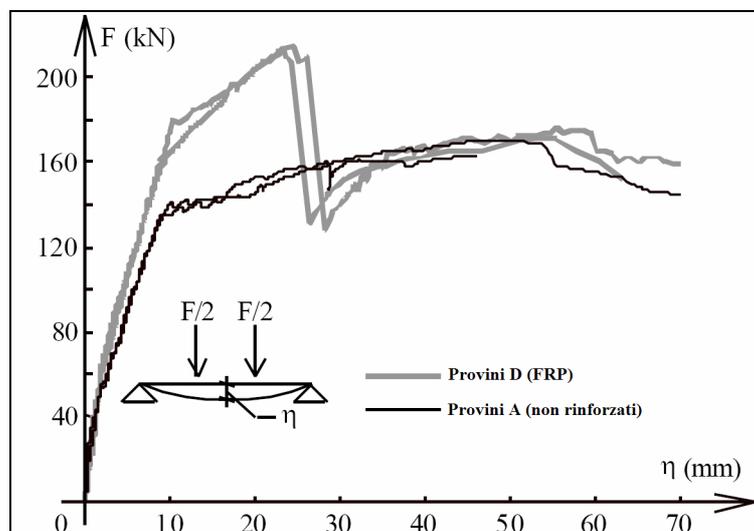


Figura 37 - Diagrammi carico-freccia Provini D

Come possiamo notare dalle immagini precedenti, in tutti i casi, al cedere del rinforzo, le curve carico-freccia dei provini rinforzati si sono riavvicinate alle curve dei provini non rinforzati.

PROVINO	Descrizione	Carico Max [kN]	Media [kN]	Incremento di carico [%]
A1	Non rinforzato	136.07	166.54	--
A2		170.00		
B1	Rinforzati con matrice cementizia e rete in carbonio	197.16	192.62	+15.66
B2	Rinforzati con matrice cementizia e rete in carbonio	188.07		
C1	Rinforzati con matrice cementizia e rete in PBO	180.72	198.99	+8.51
C2	Rinforzati con matrice cementizia e rete in PBO	217.26		+30.45
D1	Rinforzati con matrice epossidica e rete in carbonio	215.75	214.91	+29.04
D2	Rinforzati con matrice epossidica e rete in carbonio	214.07		

Tabella 14 - Risultati sperimentali: carichi di collasso e incrementi rispetto al non rinforzato

In tutti i provini rinforzati si sono osservate fessure più concentrate e di ampiezza inferiore rispetto a quelle apertesesi nei provini non rinforzati che risultano anche essere più diffuse lungo la trave, questo fenomeno è giustificato dal trasferimento delle tensioni tangenziali di interfaccia tra supporto e rinforzo.

3.3.2 Modi di crisi

Tutti i provini hanno raggiunto una crisi di tipo flessionale, le diverse modalità con cui tale crisi si è manifestata possono essere schematizzate in Figura 14.

In particolare è stato osservato che:

- i **provini A** (non rinforzati) hanno raggiunto il collasso per compressione del calcestruzzo (Figura 10) con armature metalliche plasticizzate;



Figura 38 - Crisi di un provino non rinforzato

- nei **provini B** (rinforzati con FRCM e rete in CARBONIO) dopo lo snervamento delle armature in acciaio, si sono osservati notevoli **scorrimenti** delle fibre nella matrice cementizia (Figura 11) e quindi il contributo del



Figura 39 - Crisi di un provino tipo B, le fibre sono evidenti tra i lembi delle fessure

rinforzo è diminuito gradualmente fino ad annullarsi. Nel momento della crisi, che è avvenuta per compressione del calcestruzzo compresso, non si è verificato alcun distacco del pacchetto di rinforzo. Il meccanismo appena descritto è schematizzato in Figura 14,c.

- nei **provini C** (rinforzati con FRCM e rete in PBO) la crisi si è manifestata con un improvviso distacco



Figura 40 - Crisi provini C (distacco all'interfaccia)

dell'intero pacchetto di rinforzo all'interfaccia tra matrice cementizia e calcestruzzo (Figura 12). Questo tipo di crisi è molto fragile ed all'atto del distacco si ha una repentina diminuzione del carico. Il meccanismo in questione è schematizzato in Figura 14,b.

- nei **provini D** (rinforzati con CFRP), dopo lo snervamento delle armature metalliche, si è avuto il distacco improvviso tipico dei rinforzi a matrice epossidica; questo si è



Figura 41 – Crisi provini D (distacco del rinforzo)

innescato in una delle due sezioni caricate e si è propagato verso l'estremità della trave (Figura 13). Anche questo meccanismo è schematizzato in Figura 14,a.

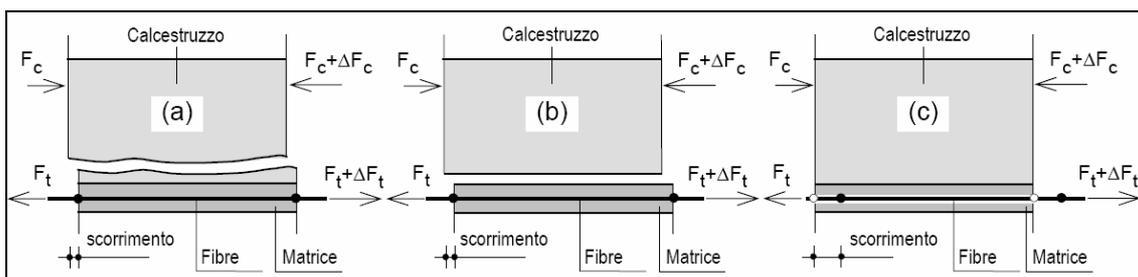


Figura 42 - Diverse modalità di crisi

La crisi dei **provi B** risulta essere la **più duttile** fra tutte le modalità manifestatesi nei provini rinforzati.

Questa che dovrebbe essere una peculiarità di tutti i provini in cui il rinforzo è stato applicato con matrice cementizia non si manifesta nei **provini C** in cui la fibra componente il pacchetto era in PBO; il **comportamento** in oggetto risulta **fragile e inaspettato**, ma può essere giustificato da quanto già detto nel paragrafo 1.2.5 a proposito del rapporto tra le fibre in PBO ed i leganti inorganici a reazione idraulica presenti nella malta, questi infatti riescono ad instaurare con la particolare struttura molecolare della fibra dei fortissimi legami covalenti in grado di sopperire al mancato avvolgimento delle fibre da parte della malta stessa che, come spiegato al paragrafo 2.1.2.1, indurrebbe ad aspettarsi una crisi di tipo duttile come è avvenuto nei provini B, in cui la medesima applicazione è stata realizzata con una fibra di carbonio non in grado di instaurare i suddetti legami chimici.

In fine, le modalità di crisi presentatesi a collasso nei **provini D**, realizzati in CFRP, sono esattamente quelle classiche di un rinforzo a matrice epossidica. Dopo il picco nella curva carico-freccia i provini in questione presentano una drastica diminuzione di carico rimarcando la **fragilità** di questo tipo di rinforzo, il quale, come già detto paga in termini di **carico ultimo di collasso** fornendo il **valore più elevato**.

3.4 Analisi dei risultati e conclusioni

I diagrammi carico freccia sono stati confrontati in [7] con quelli ottenuti mediante una modellazione basata sulla conservazione delle sezioni piane, tenendo in conto le caratteristiche meccaniche dei materiali di Tabella 1.

Sono stati preventivamente determinati i diagrammi momento-curvatura dei conci considerando lo schema di Figura 15 e successivamente, sulla base di questi, per integrazione, sono stati ricavati i diagrammi carico-freccia. Nel modello si considera la perfetta aderenza tra il rinforzo e l'intradosso della trave [3].

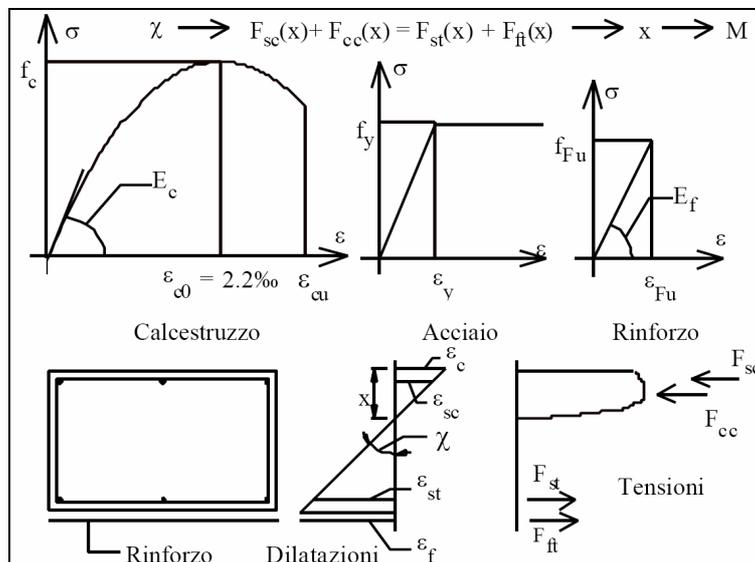


Figura 43 - Schema per la determinazione dei diagrammi momento-curvatura ($M-\chi$)

Nella Figura 16 è mostrato, per i provini A e B, il confronto tra i risultati del modello e i risultati sperimentali.

Si può notare che l'accordo è abbastanza buono fino ai punti evidenziati nelle curve dal circoletto di colore amaranto. Questo sottolinea il fatto che le ipotesi di perfetta aderenza tra rinforzo e supporto su cui si basa il modello risultano abbastanza verificate fino ad un certo livello di dilatazione del rinforzo stesso al di là del quale, gli scorrimenti delle fibre all'interno della matrice cementizia, si manifestano e determinano un abbassamento del contributo fortificante del pacchetto fibra-matrice fino al collasso e quindi all'annullarsi di qualsiasi beneficio; questo

comportamento è ben percepibile anche del diagramma dove la curva sperimentale del provino rinforzato si riavvicina a quella del provino non rinforzato.

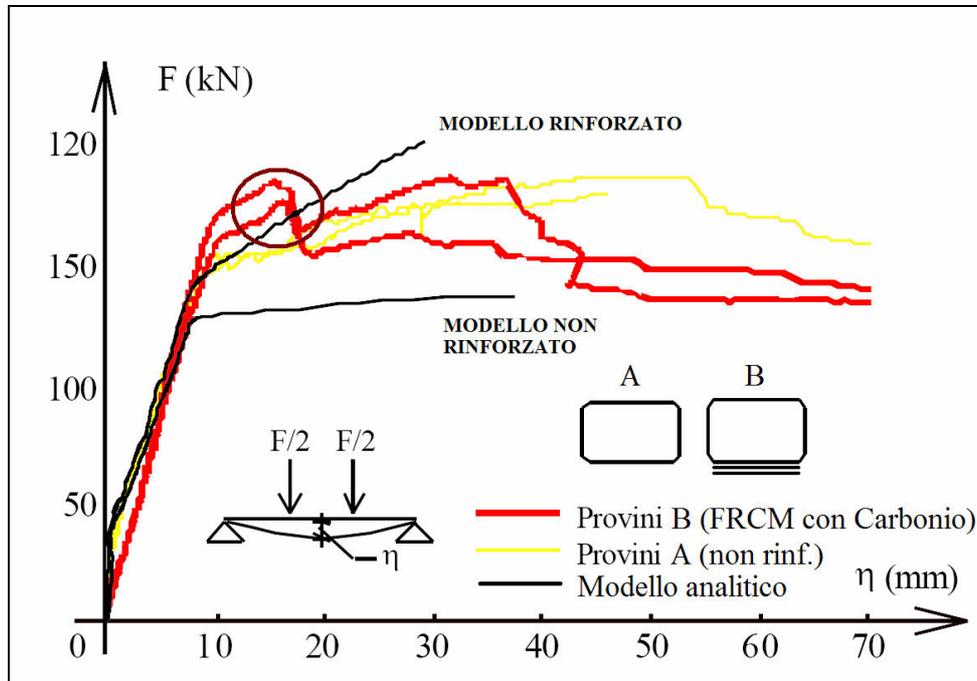


Figura 44 - Confronto tra le curve analitiche e quelle sperimentali per i provini A e B

E' quindi opportuno determinare il livello di "dilatazione critica" (ϵ_{cr}) del rinforzo, al di sotto del quale, l'ipotesi di perfetta aderenza tra rinforzo e supporto, è verificata.

Indicando con F_s la forza applicata al provino in corrispondenza del punto in cui la curva analitica incrocia quelle sperimentali (evidenziato in figura dal circoletto amaranto), il corrispondente momento massimo del provino è dato da:

$$M_s = \frac{F_s}{2} L_1$$

dove L_1 indica la distanza tra un appoggio ed il più vicino punto d'applicazione del carico.

A questo punto, essendo noti i diagrammi momento-curvatura è possibile ricavare la dilatazione critica del rinforzo corrispondente alla forza F_s :

$$\epsilon_{cr} = \chi_s \cdot (H - x_s)$$

dove χ_s e x_s sono rispettivamente la curvatura e la distanza dell'asse neutro della trave dal lembo compresso corrispondenti ad M_s ed H è l'altezza della sezione in calcestruzzo.

La sperimentazione e l'analisi descritta in questo capitolo ed ancor più compiutamente in [6] e [7] dimostra come il calcolo del rinforzo a flessione di una trave in cemento armato può essere effettuata con l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane, come del resto suggerisce anche [3], che si occupa solo di rinforzi a matrice epossidica quando viene trattata l'analisi del comportamento allo stato limite ultimo.

Tale ipotesi è però accettabile se e soltanto se il rinforzo non raggiunge la *dilatazione critica*.

Quanto detto equivale ad affermare che, nella determinazione del momento ultimo di una sezione rinforzata, si può procedere come si procede di consueto con una sezione in solo cemento armato, considerando però una resistenza a trazione di calcolo del rinforzo pari a :

$$f_{fd} = \frac{\varepsilon_{cr} E_f}{\gamma_f}$$

dove γ_f è un coefficiente di sicurezza ed E_f è il modulo elastico della fibra. In fine, per tenere conto del fatto che solitamente i rinforzi vengono applicati quando la struttura è già in esercizio (salvo casi eccezionali) e che quindi il supporto risulta già deformato sotto i carichi permanenti, la perfetta aderenza è da considerare per i soli carichi applicati alla struttura dopo il rinforzo.

Più precisamente, in quanto l'ipotesi di perfetta aderenza impone l'uguaglianza tra le deformazioni dell'intradosso della trave dove è applicato il rinforzo ed il rinforzo stesso, la dilatazione del rinforzo sarà data da:

$$\varepsilon_f = \chi \cdot (H - x) - \varepsilon_t$$

dove ε_t indica la dilatazione del supporto all'atto dell'applicazione del rinforzo.

CAPITOLO 4

Applicazioni

4.1 Introduzione

A seguito della trattazione fatta nei capitoli precedenti sugli aspetti tecnologici e il comportamento meccanico dei rinforzi fibrosi a matrice cementizia, passiamo ad esaminare alcune realizzazioni.

Prima però cerchiamo brevemente di inquadrare quelle che sono le normative che regolamentano l'applicazione di questi materiali.

4.2 Quadro normativo.

Il Consiglio Superiore dei lavori Pubblici, nell'Assemblea Generale Straordinaria del 30 marzo 2005, approvò la bozza del "*Testo Unico di Norme Tecniche per le costruzioni*". Il documento, nel disciplinare la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle costruzioni al fine di garantire adeguati livelli di sicurezza per la pubblica incolumità, si poneva l'obbiettivo di unificare e aggiornare tutta la normativa tecnica precedente, raccogliendo in 12 capitoli i temi tecnici del costruire, compresi gli aspetti sismici e geologico-tecnici.

L'iter legislativo per l'approvazione definitiva del testo si è concluso il 14 settembre ed il conseguente decreto è stato pubblicato sul Supplemento Ordinario n.159 della Gazzetta ufficiale n.222 del 23 settembre 2005 ed è entrato in vigore il 23 ottobre.

Il Testo prevede che i prodotti e i componenti utilizzati per le opere strutturali debbano essere chiaramente identificati in termini di caratteristiche meccanico-fisico-chimiche e dotati di attestati di conformità; le Norme Tecniche, inoltre, menzionano anche utili riferimenti per la progettazione:

- Codici internazionali EN EuroNorme;
- ACI manual of Concrete Practice;
- ASCE manuals America Society of Civil Engineers;
- Istruzioni del CNR ossia i DT-CNR;
- L'Ordinanza del Pres. del Consiglio dei Ministri O.P.C.M. del 23 marzo 2003, n.3274;

Focalizzando l'attenzione sull'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica, occorre menzionare ***“Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni”***.

Il suddetto documento è stato approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel parere numero 66 dell'Assemblea Generale del 21 luglio 2006 ed è stato redatto, ai sensi dell'O.P.C.M. 3431 del 3 maggio 2005, da un Gruppo di Lavoro istituito dal Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri, di concerto con il Dipartimento per i Beni Culturali e Paesaggistici del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, con Decreto interministeriale del 23 maggio 2005.

Lo scopo è quello di fornire indicazioni per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale tutelato, in applicazione dell'O.P.C.M. 3274 del 20 marzo 2003 e successive modifiche ed integrazioni del D.M. delle Infrastrutture e dei Trasporti 14 settembre 2005 (Norme tecniche per le costruzioni) e del Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 (Codice dei beni culturali e del paesaggio).

In particolare quest'ultimo stabilisce all'articolo 4, comma 9 che per i beni immobili collocati nelle zone dichiarate a rischio sismico il restauro comprende l'intervento di miglioramento strutturale.

Il documento è stato redatto con l'intento di specificare un percorso di conoscenza, valutazione della sicurezza sismica e progetto degli

eventuali interventi, concettualmente analogo a quello previsto per le costruzioni non tutelate, ma opportunamente adattato alle esigenze e peculiarità del patrimonio culturale; la finalità è quella di formulare, nel modo più oggettivo possibile, il giudizio finale sulla sicurezza e sulla conservazione garantite dall'intervento di miglioramento sismico.

I diversi capitoli delle Linee Guida forniscono indicazioni per definire l'azione sismica, in relazione alla pericolosità del sito ed alla destinazione d'uso del manufatto, e la capacità della struttura, attraverso una corretta conoscenza e modellazione del manufatto.

Nel capitolo 2 sono suggeriti i requisiti di sicurezza ritenuti adeguati per i beni architettonici di valore storico artistico. Sono opportunamente ridefiniti gli stati limite di riferimento, che non si riferiscono solo ad esigenze di salvaguardia dell'incolumità delle persone (stato limite ultimo) e di funzionalità (stato limite di danno), ma anche alla perdita del manufatto ed ai danni ai beni di valore artistico in esso contenuti.

Sono inoltre suggeriti i livelli di protezione sismica, in relazione alle esigenze di conservazione ed alle condizioni d'uso.

Nel capitolo 3 vengono fornite indicazioni per una accurata definizione dell'azione sismica, che risulta particolarmente utile in quanto il confronto tra l'accelerazione di collasso e quella attesa al suolo non ha un valore cogente ma deve contribuire ad esprimere un giudizio sul livello di rischio del manufatto.

La suddivisione del territorio italiano in quattro zone, attribuendo a ciascuna un prefissato valore dell'azione sismica, rappresenta uno schema semplice ed efficace per la progettazione di nuove strutture ma può condurre a sovrastime, che possono risultare critiche per la conservazione di un manufatto esistente.

L'azione sismica di riferimento viene quindi valutata beneficiando degli studi già disponibili sulla pericolosità sismica del territorio italiano ed effettuando, eventualmente, approfondimenti sulle caratteristiche locali del sito (microzonazione).

Nel capitolo 4 viene specificato che la conoscenza del manufatto dovrà essere acquisita tenendo presente quanto indicato al punto 11.5 dell'Ordinanza e conformemente a quanto previsto dal programma per il monitoraggio dello stato di conservazione dei beni architettonici tutelati (Allegato A), elaborato dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali - Direzione Generale per i Beni Architettonici e Paesaggistici e finalizzato all'acquisizione della conoscenza del patrimonio culturale italiano.

Nel capitolo 5 sono illustrate le diverse possibilità di modellazione del comportamento strutturale di una costruzione storica in muratura.

In particolare, per la valutazione della sicurezza sismica vengono individuati tre diversi livelli, di crescente completezza, applicabili rispettivamente:

- *LV1*) per le valutazioni della sicurezza sismica da effettuarsi a scala territoriale su tutti i beni culturali tutelati, secondo quanto disposto all'articolo 2, comma 3, dell'Ordinanza;
- *LV2*) per le valutazioni da adottare in presenza di interventi locali su zone limitate del manufatto;
- *LV3*) per il progetto di interventi che modificano il funzionamento strutturale accertato o quando venga comunque richiesta un'accurata valutazione della sicurezza sismica del manufatto.

Nel capitolo 6 sono descritti i criteri da seguire per il miglioramento sismico, ovvero per la riduzione delle vulnerabilità accertate sulla base dei risultati della modellazione e

dell'osservazione degli eventuali danni; per ciascuna problematica sono anche indicate le possibili tecniche di intervento, che vengono esaminate criticamente in relazione alla loro efficacia, al loro impatto sulla conservazione (non invasività, reversibilità e durabilità) ed ai costi.

Infine, **il capitolo 7** traccia un quadro riassuntivo del percorso di valutazione della sicurezza sismica e del progetto degli interventi di miglioramento sismico.

4.3 Ex Stabilimento della Tonnara Florio di Favignana (TP): descrizione dell'edificio

L'ex Stabilimento Florio, sito nel comune di Favignana in provincia di Trapani, è costituito da un complesso di edifici che insistono su di un'area di 36000 m² affacciata sulla Cala Grande. Il primo nucleo dell'insediamento risale all'inizio dell'Ottocento ed è soggetto ad un vasto ampliamento quando la famiglia Florio ne diventa proprietaria, verso la fine del secolo. Nel 1874 lo stabilimento viene acquistato dalla famiglia dei Pallavicino di Genova per la somma di 2700000 lire ed in questo periodo raggiunge la completa autosufficienza sia nella produzione alimentare che nella manutenzione a gli impianti ed alla flotta.

La Regione Sicilia acquisisce l'intero complesso ormai in disuso nel 1990 e nel settembre 2003 ne avvia la ristrutturazione ed il recupero strutturale che prevede di adibire gli immobili e le aree attigue a sede di attività culturali, turistiche ed artigianali.

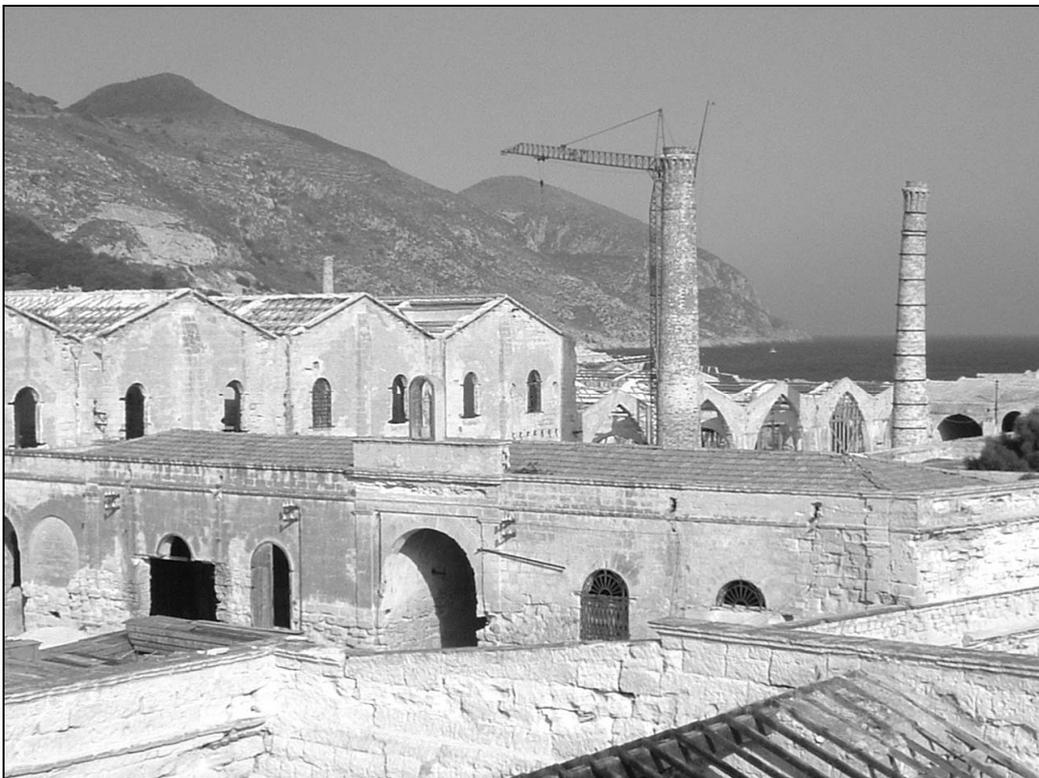


Figura 45 - Ex Stabilimento Tonnara Florio

Per le nozioni tecniche presenti nei seguenti paragrafi riguardanti l'operazione di rinforzo delle volte dell'ex Tonnara Florio, ringrazio l'ing. Francesco Focacci, dello Studio Associato FOCACCI di Bologna, che gentilmente mi ha fornito il materiale necessario.

4.3.1 Consolidamento delle volte dei “magazzini generali”

Il recupero dell'ex Stabilimento Florio, a causa del lungo stato di abbandono e dell'aggressività dell'ambiente marino, ha tra i suoi obiettivi principali il ripristino strutturale degli elementi portanti (murature verticali, volte, solai lignei, coperture) costituenti il complesso insediativo.

Le volte in muratura sono collocate nell'edificio dei “magazzini generali”, l'unico ad essere a due piani oltre alla palazzina padronale. Le volte per le quali si è deciso di intervenire con il recupero e non con la demolizione e la ricostruzione ex novo, si presentano fortemente lesionate.

Il loro rinforzo viene realizzato con il sistema *Ruredil X Mesh C10*¹⁵

applicando la rete di carbonio con matrice cementizia secondo schemi geometrici differenziati, che tengono conto del quadro fessurativo esistente.

4.3.1.1 Descrizione dell'intervento ed ipotesi adottate per la progettazione

L'edificio ha due impalcati (primo piano e copertura). La struttura è costituita da colonne di muratura di tufo di sezione quadrata di circa 75 cm di lato, disposti a formare una maglia quadrata di lato di lato 4.8 m. Al livello degli impalcati, i pilastri sono collegati

¹⁵ Scheda tecnica allegata

nelle due direzioni ad archi a tutto sesto costituiti da blocchi di tufo.

Le aree quadrate aventi per perimetro quattro dei suddetti archi sono coperte da volte di spessore 15 cm sempre di blocchi di tufo.

Sono state adottate le seguenti ipotesi sui carichi:

- peso specifico della muratura di tufo: 1750 kg/m^3 ;
- spessore delle volte: 15 cm;
- peso specifico del rinfiacco sulle volte: 1750 kg/m^3 ;
- sulle volte grava (oltre al peso proprio), il rinfiacco che riempie il volume tra l'estradosso delle volte stesse e il piano orizzontale tangente alle volte in sommità;
- i carichi permanenti ed accidentali relativi agli impalcati gravano direttamente sulle volte;
- i carichi permanenti ed accidentali relativi agli impalcati sono considerati uniformemente distribuiti;
- le imposte delle volte sono fisse (questa ipotesi pare ragionevolmente verificata per gli archi non di bordo);
- carico permanente uniformemente distribuito: 200 kg/m^2 ;
- carico accidentale uniformemente distribuito: 400 kg/m^2 .

4.3.1.2 Criterio di rinforzo

Le strutture voltate di muratura collassano per meccanismo quando si forma un numero di cerniere plastiche sufficienti a renderle labili, che si possono localizzare sia all'estradosso che all'intradosso.

Un meccanismo di collasso è quindi identificato dalla posizione delle cerniere che rendono labile la struttura. Ad ogni possibile posizione delle cerniere è associato un moltiplicatore di collasso dei carichi variabili cui corrisponde la formazione delle stesse, che

viene determinato con le equazioni di equilibrio delle forze cui è soggetta la struttura. L'effettiva posizione delle cerniere è quella cui corrisponde il minimo tra i moltiplicatori di collasso associati alle infinite possibili posizioni delle cerniere.

L'applicazione del rinforzo in corrispondenza di una generica sezione impedisce, in quella sezione, la formazione della cerniera dalla parte opposta a quella in cui è applicato (applicazioni all'estradosso impediscono la formazione di cerniere all'intradosso e viceversa).

La struttura rinforzata collassa quindi con un meccanismo diverso rispetto a quella non rinforzata in quanto alcuni meccanismi di collasso non sono possibili perché impediti dal rinforzo. Al cambiamento del meccanismo di collasso corrisponde un incremento del carico di collasso. La sezione di rinforzo viene poi dimensionata per sopportare la trazione necessaria ad impedire la formazione della cerniera.

4.3.1.3 Descrizione dei materiali e del rinforzo della volta tipo

Il materiale di rinforzo utilizzato è una rete di fibre di carbonio che viene resa solidale al supporto per mezzo di matrice cementizia (Ruredil X Mesh C10).

La seguente tabella riassume le caratteristiche del rinforzo riferite alla sola sezione di fibre.

SPESSORE [mm]	LARGHEZZA [mm]	Res. a TRAZIONE [MPa]	MODULO ELASTICO [MPa]	Dil. di ROTTURA [%]
0.047	1000	3500	240000	14.9

Tabella 15 - Caratteristiche sola fibra (Ruredil X Mesh C10)

Per le volte è stato considerato, nelle condizioni di collasso, uno schema resistente costituito da quattro archi di cui due posti sulle

diagonali e due sulle mediane del generico campo quadrato relativo ad una volta . Gli archi sulle diagonali risultano policentrici (a tre centri, Figura 2), mentre gli archi sulle mediane risultano circolari (Figura 3).

Il rinforzo è stato quindi dimensionato per consentire a detto schema resistente di sopportare carico verticale relativo alla combinazione di carico allo Stato Limite Ultimo (SLU).

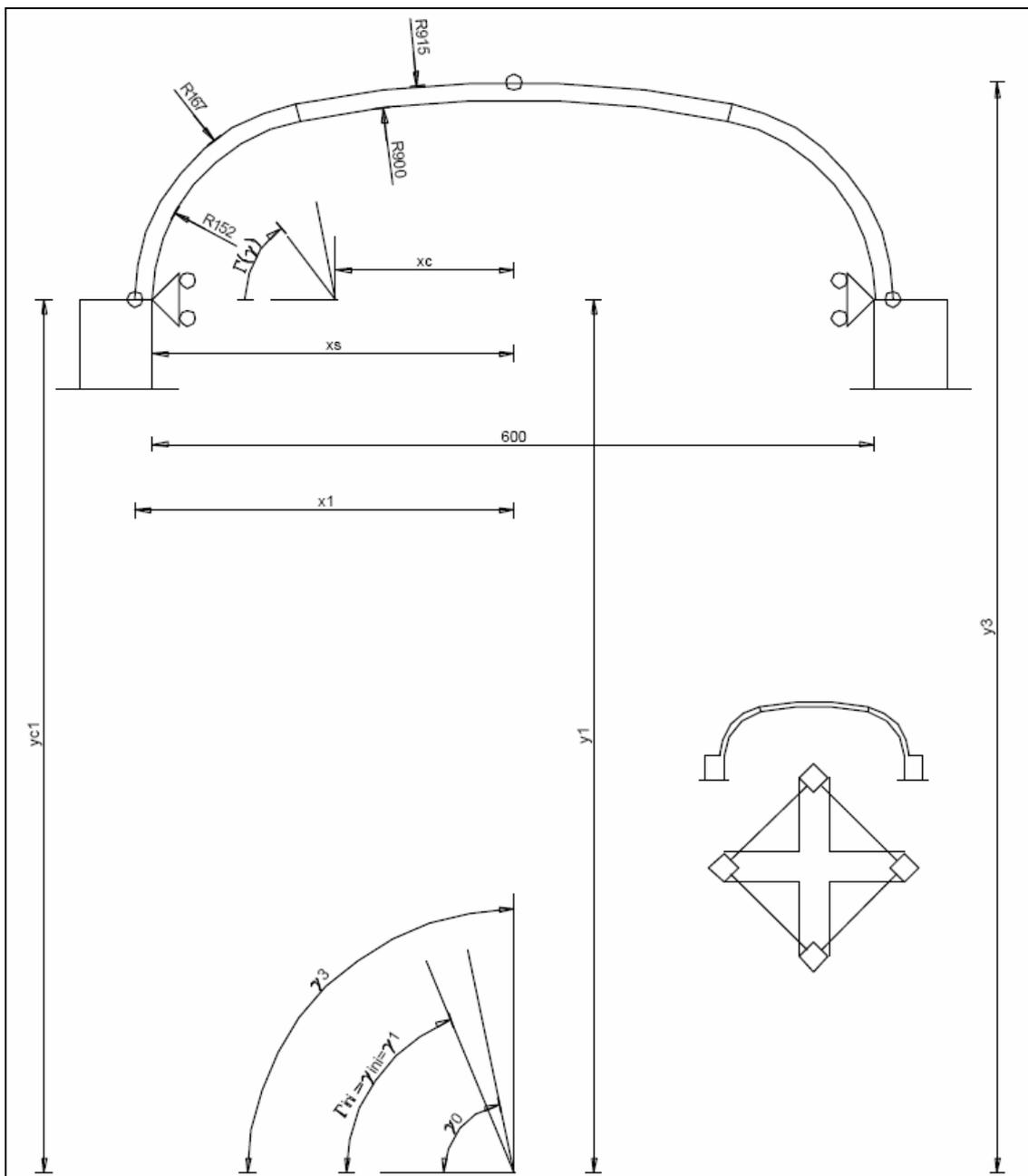


Figura 46 - Schema di calcolo 1: meccanismo simmetrico arco diagonale

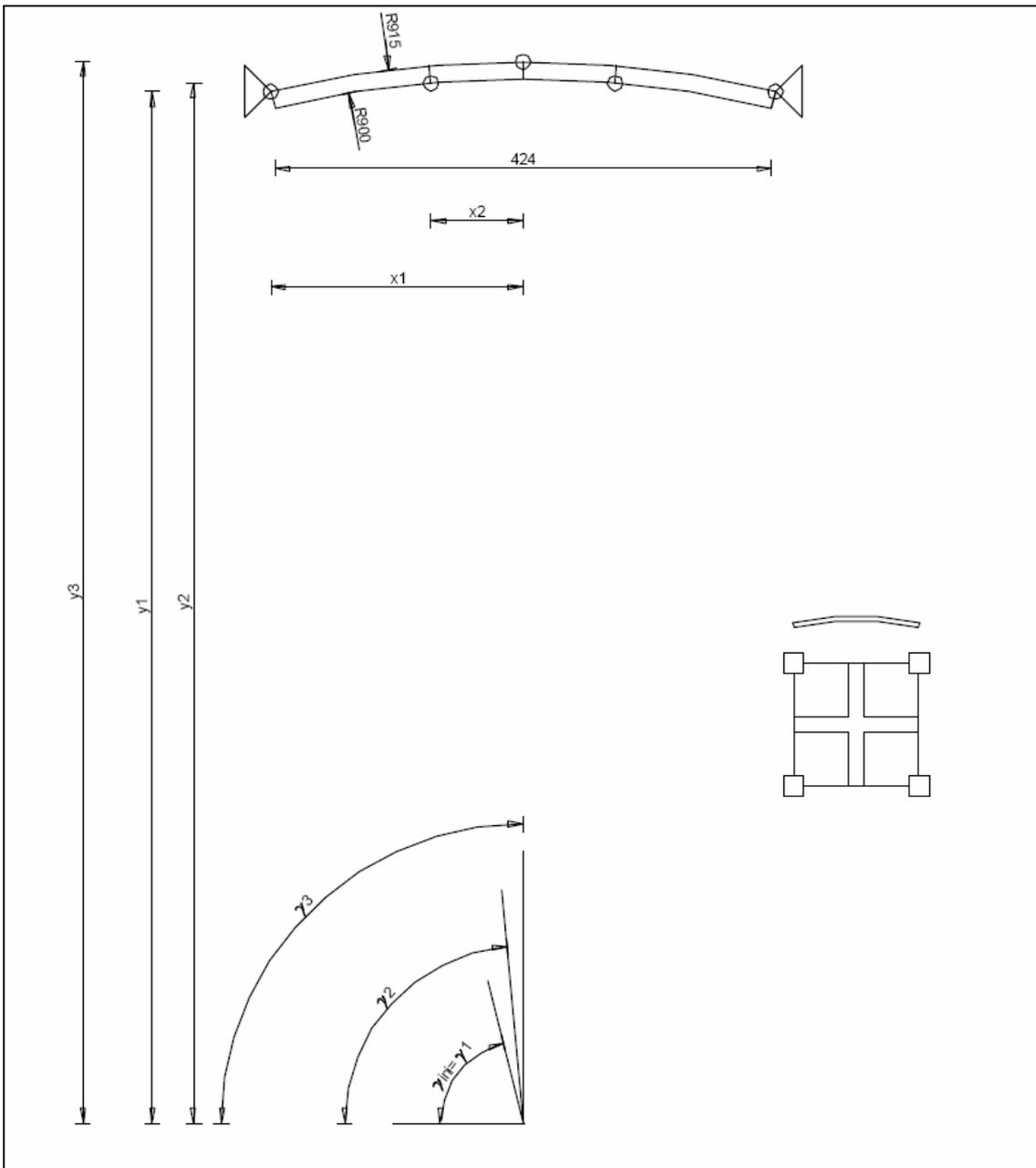


Figura 47 - Schema di calcolo 2: meccanismo simmetrico arco mediano

Come da relazione di calcolo dell'ing. Focacci risulta che:

- gli archi diagonali necessitano di essere rinforzati all'estradosso in quanto, per i carichi considerati, la linea delle pressioni¹⁶ non è interamente contenuta nello spessore degli archi;
- gli ideali archi sulle mediane non necessitano di essere rinforzati in quanto è determinabile una linea delle pressioni

¹⁶ Luogo dei centri di pressione, cioè dei punti di applicazione della risultante degli sforzi interni su una certa sezione

coerente con i carichi applicati interamente contenuta nello spessore.

Conseguentemente, la configurazione di rinforzo si articolerà nelle seguenti fasi operative:

1. Applicazione di uno strato di X Mesh C10 su tutta la superficie estradossale con fibre disposte parallelamente ai lati dei campi quadrati coperti delle volte (Figura 4);
2. Applicazione di ulteriori due strati di X Mesh C10 di larghezza pari a 100 cm, in corrispondenza delle diagonali delle volte con fibre inclinate a 45° rispetto ai lati dei campi quadrati coperti dalle volte (Figura 5); è inoltre previsto in questa fase un ancoraggio di detti strati all'interno delle strutture verticali (Figura 6);
3. Applicazione di un ulteriore strato di X Mesh C10 di larghezza pari a 25 cm posta sulla volta in corrispondenza dei lati dei quadrati coperti dalle volte di modo da formare un quadrato le cui diagonali sono le strisce posizionate al passo precedente (Figura 7).

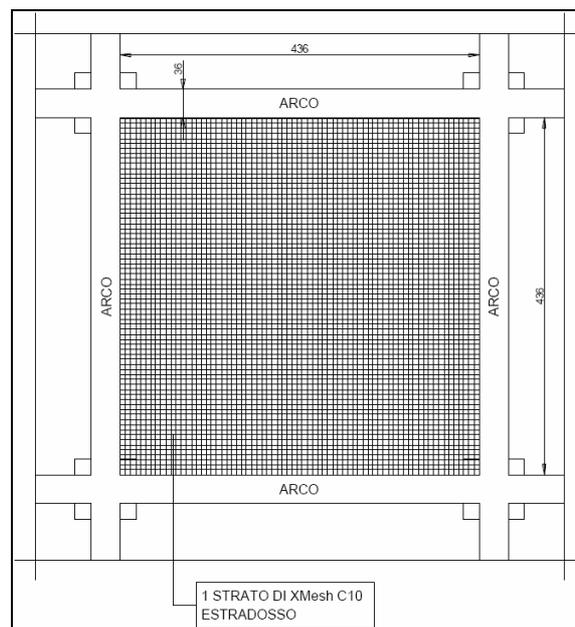


Figura 48 - Prima fase della messa in opera del rinforzo

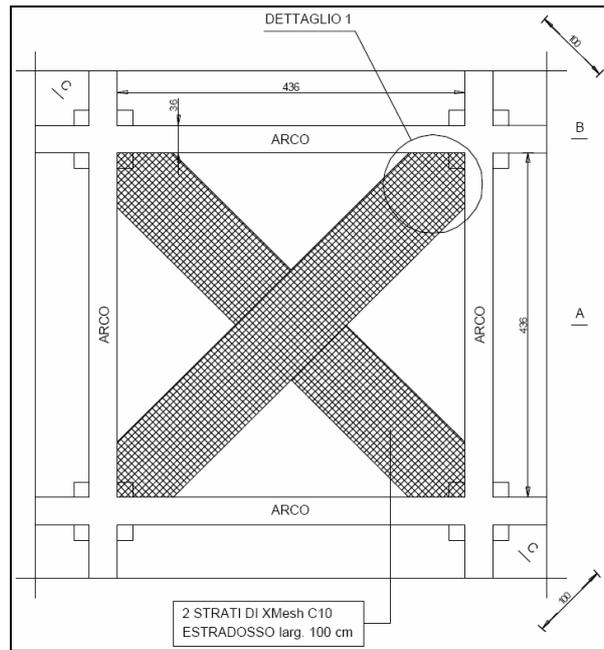


Figura 49 - Seconda fase messa in opera

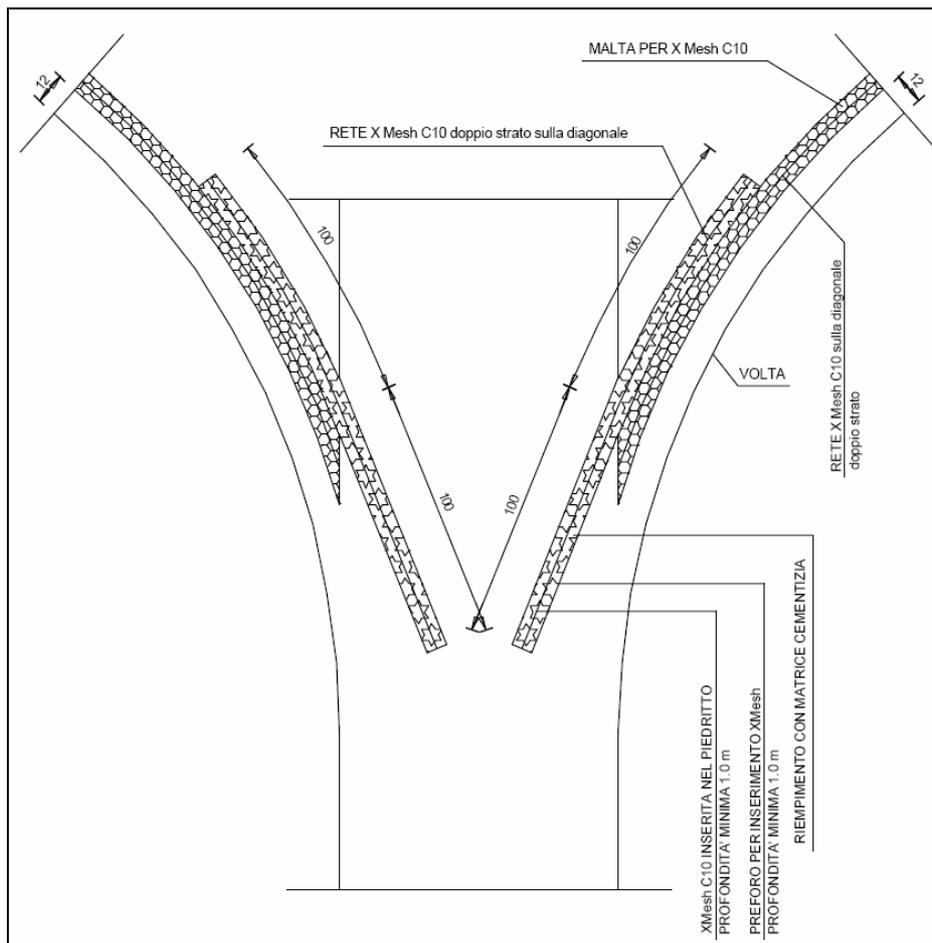


Figura 50 - Ancoraggio del rinforzo all'interno della struttura: DETTAGLIO 1

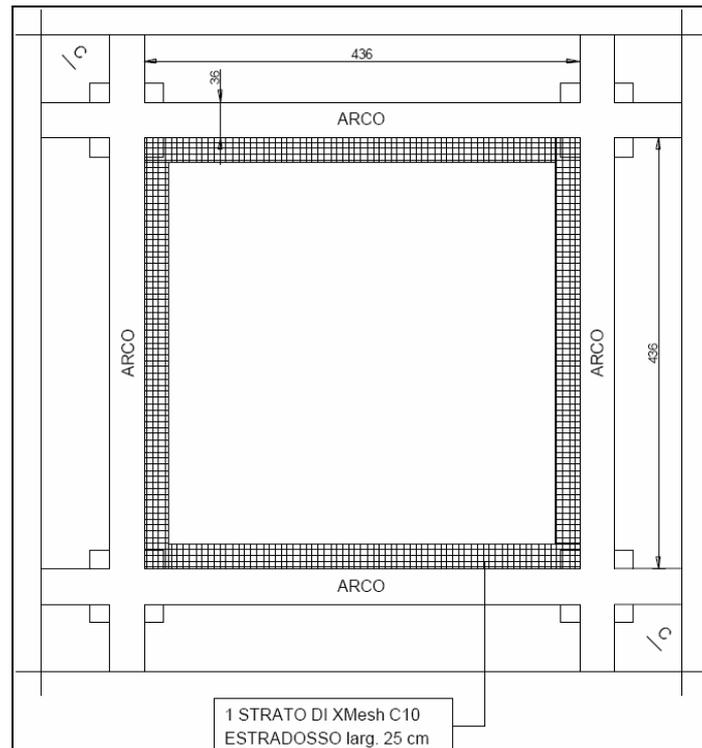


Figura 51 - Completamento della posa del rinforzo

Per la realizzazione del rinforzo descritto sono necessari circa 70m^2 di rinforzo per ogni volta.

L'intervento genera un incremento della capacità portante delle volte e le rende capaci di resistere anche ai carichi sismici relativi alle masse delle volte stesse, del rinfianco e dei carichi direttamente appoggiati sulle volte in quanto ne inibisce i meccanismi di collasso con imposte fisse.

Per quanto riguarda i meccanismi di collasso con imposte che traslano non vengono considerati a questo livello di progetto in quanto sarebbe necessaria un'analisi globale della fabbrica.

4.3.1.4 Documentazione fotografica delle fasi operative

La successione delle seguenti immagini documenta le fasi operative svolte per la realizzazione di quanto descritto ai paragrafi precedenti.



Figura 52 - Eseguito lo svuotamento dei rinfianchi delle volte, si procede alla pulizia dell'estradosso ed alla messa in opera della rete come da fase 1

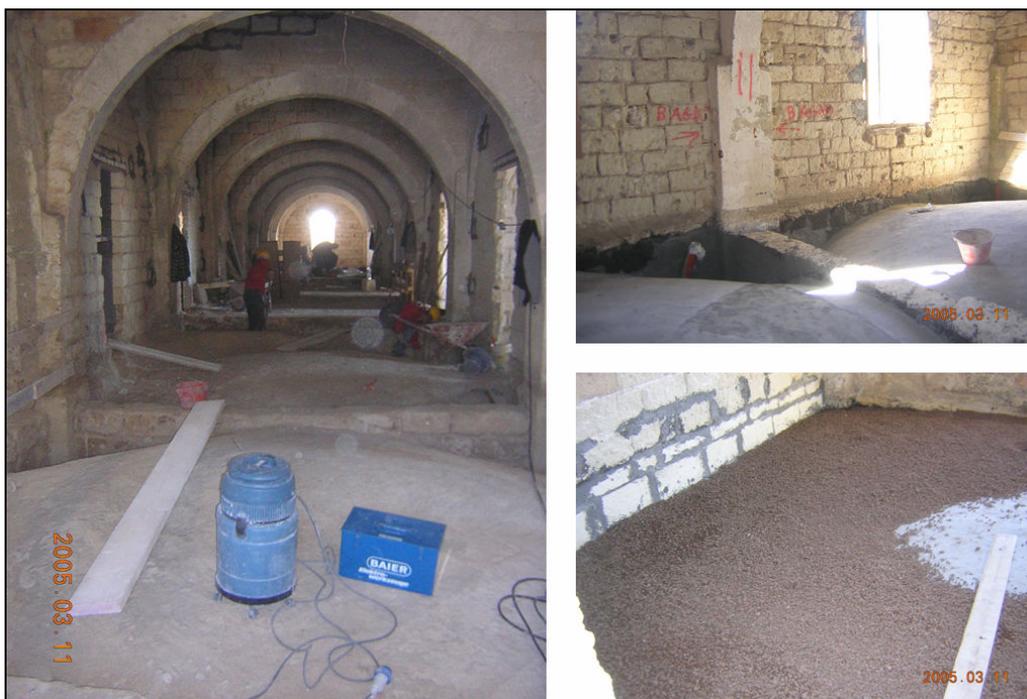


Figura 53 - Completato l'intervento di posa della rete in carbonio, l'estradosso delle volte è riempito con argilla espansa in granuli debolmente impastata con cemento



Figura 54 - Vista delle varie fasi operative per il consolidamento delle volte, condotte a catena di montaggio nei magazzini generali

4.4 Chiesa Madre di Noto (SR)

La cattedrale si trova nel cuore della città conosciuta come “la Capitale del Barocco”:

Noto. Fin dalla sua fondazione avvenuta a seguito di un forte terremoto che rase al suolo il vecchio abitato di Noto nel 1693, la costruzione in oggetto fu interessata da numerosi sismi che la danneggiarono ripetutamente, il più grave nel 1848 provocò il crollo della cupola, successivamente ricostruita; il più recente, nel 1990, lesiona l'edificio in modo molto grave.

A distanza di sei anni nel 1996, mentre si svolgevano gli interventi di restauro, un cedimento improvviso devasta la cupola, la navata maggiore e quella orientale.



Figura 55 - Cattedrale di Noto prima del crollo del 13 marzo 1996



Figura 56 - Cattedrale di Noto dopo il crollo del 13 marzo 1996

La ricostruzione inizia nel 1999 con la realizzazione dei nuovi pilastri, per giungere nel 2003 agli archi della navata maggiore; è proprio su questi elementi strutturali che porremo particolare attenzione, in quanto sono stati riproposti con alcune modifiche rispetto agli originali, al fine di garantire un migliore funzionalità strutturale.

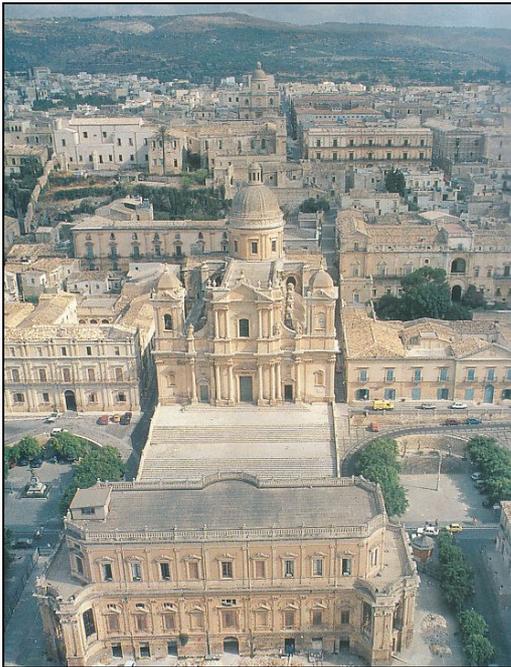


Figura 57 - Altre due foto che rappresentano rispettivamente da sinistra a destra: vista di insieme della cattedrale prima il crollo del 1996 ed una vista subito successiva al crollo di tutta la navata

Per la documentazione tecnica e fotografica presente nei seguenti paragrafi riguardanti l'operazione di rinforzo dei nuovi archi della navata mediana della Chiesa Madre di noto, ringrazio il prof. ing. Angelo Di Tommaso che gentilmente mi ha fornito il materiale necessario.

4.4.1 Rinforzo dei nuovi archi della navata mediana: descrizione dell'intervento

Il progetto ha previsto la posa in opera di rete in carbonio X Mesh C10¹⁷ in matrice cementizia su 6 archi, aventi larghezza di circa 2,60 e lunghezza di sviluppo di circa 17 metri.

Questi archi sono stati realizzati ex novo in pietra calcarenite con spessore di 50 cm. L'utilizzo della rete su questi elementi è stato scelto con l'obiettivo di dare rinforzo all'arco riprodotto come in origine.

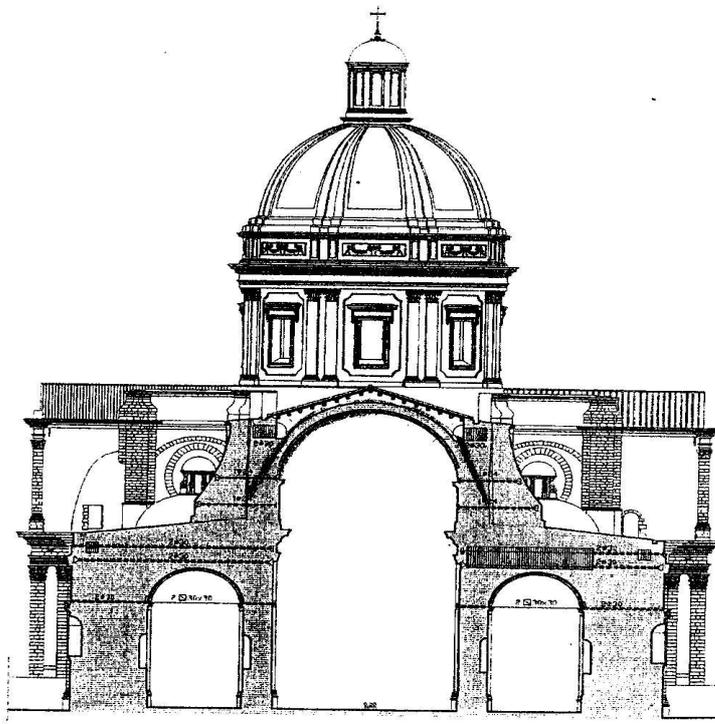


Figura 58 - Sezione navata centrale

¹⁷ Scheda tecnica allegata

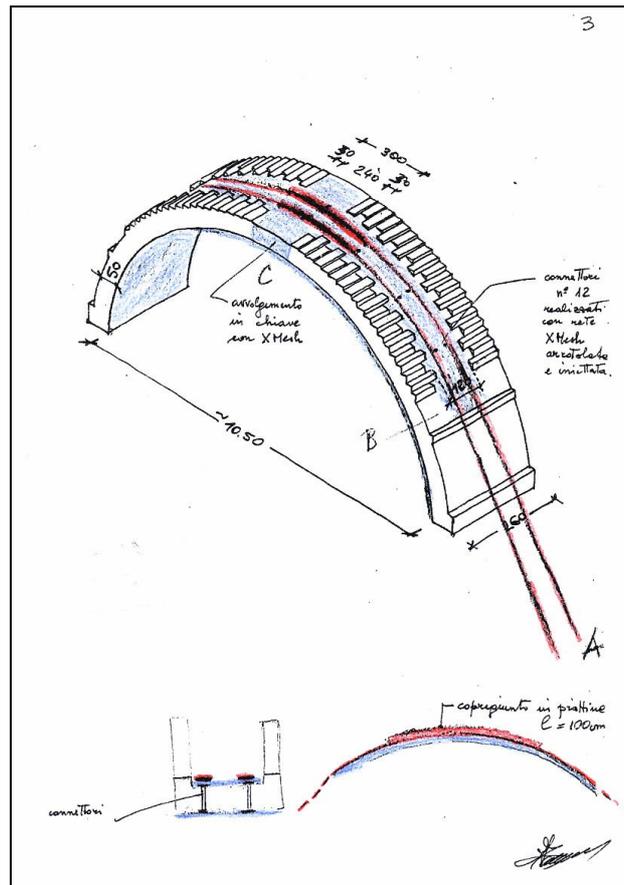


Figura 59 - Schizzo progettuale del sistema di rinforzo

La rete all'intradosso è stata applicata in semplice strato, mentre all'estradosso la rete è stata applicata in doppio strato, il primo con orientamento a $0^\circ/90^\circ$ e il secondo a 45° .



Figura 60 - Posizionamento del rinforzo all'intradosso degli archi

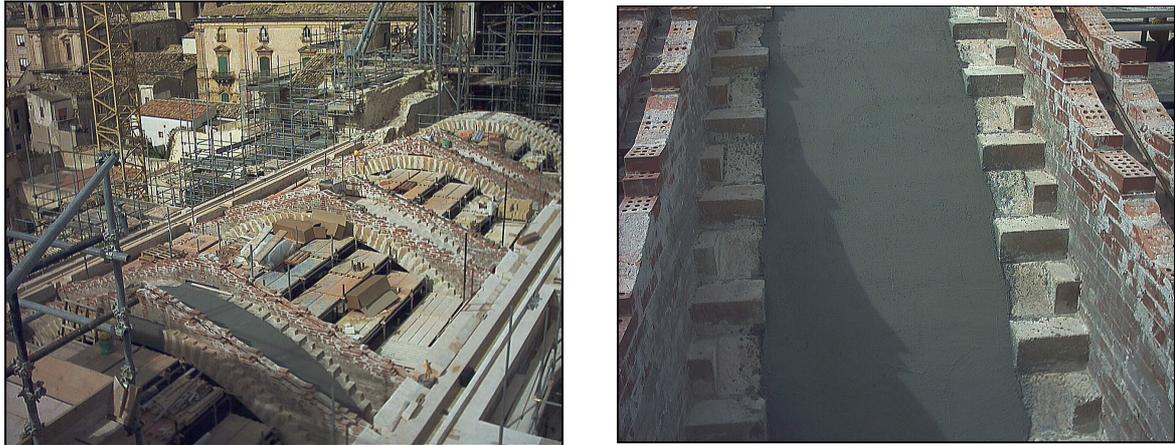


Figura 61 - Due viste delle fasi lavorative all'estradosso degli archi

Per meglio ancorare la rete posizionata all'estradosso è stato opportunamente realizzato un prolungamento della stessa all'interno dei contrafforti come si vede dal tratto rosso in Figura 18 con l'ausilio di una piattina metallica.

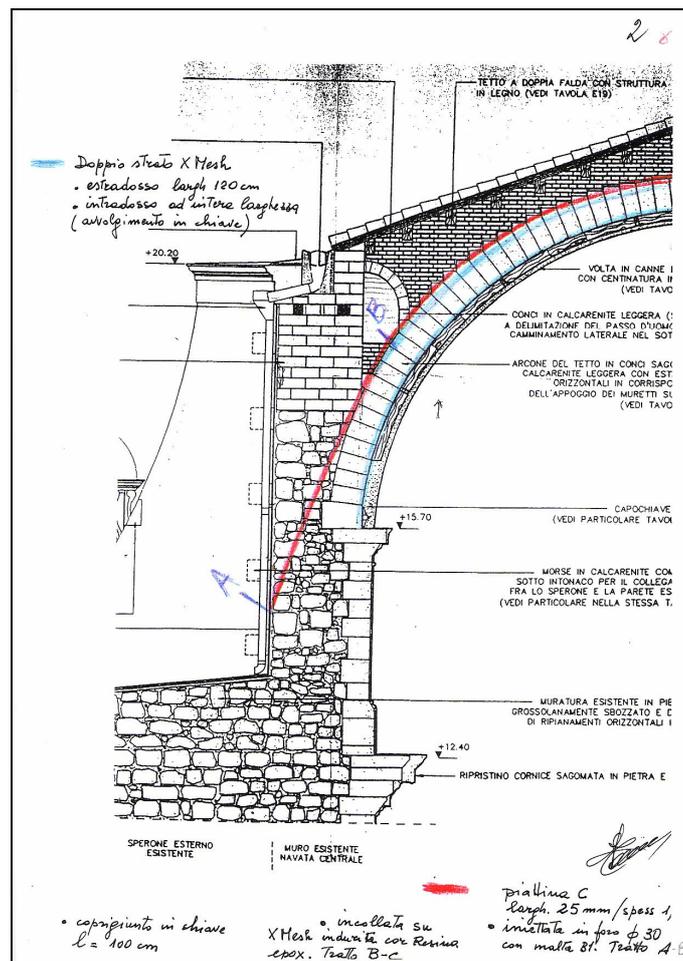


Figura 62 - Schizzo progettuale che rappresenta in meccanismo di ancoraggio della rete all'interno dei contrafforti

In aggiunta, in corrispondenza della chiave dell'arco è stato realizzato un "giro" trasversale di rete dall'intradosso fino all'estradosso di larghezza 50 cm.

A completamento dell'opera di rinforzo dei nuovi archi, sono stati posti in opera connettori passanti realizzati con rete X Mesh arrotolata ed iniettata, per collegamento fra estradosso ed intradosso.



Figura 63 - Da sinistra a destra: vista connettori all'estradosso; vista connettori all'intradosso

Ecco come si presenta oggi la cattedrale di Noto a lavori ultimati



Figura 64 - Chiesa Madre di Noto a lavori ultimati

4.5 Altre applicazioni

Vediamo ora in rapida successione alcuni interventi significativi nei quali si è fatto ricorso all'uso di fibre di carbonio e matrice cementizia; si potrà notare, tenuto conto anche degli interventi di consolidamento di volte ed archi precedentemente studiati (par. 4.3 e 4.4), quanto il loro campo di applicazione sia vasto ed eterogeneo.

4.5.1 Rinforzo di pilastri in calcestruzzo armato

Per conferire ai pilastri di vecchia e nuova realizzazione la necessaria resistenza a presso-flessione, si può procedere al loro rinforzo mediante confinamento.

La rete di carbonio viene applicata con la malta inorganica che garantisce una ottimale compatibilità con il supporto nel quale vengono preventivamente smussati gli spigoli con raggio di curvatura di circa 3 cm.



Figura 65 - Fasi successive della messa in opera del rinforzo da sinistra a destra: posa primo strato di malta; posa della rete in carbonio; posa del secondo strato di malta

4.5.2 Rinforzo e consolidamento di murature lesionate

L'intervento di consolidamento delle murature lesionate prevede le seguenti fasi caratteristiche:

1. riempimento, tramite iniezioni di boiaccia a ritiro controllato, delle lesioni presenti sulla muratura;
2. sigillatura delle lesioni con iniezioni di malta tixotropica¹⁸;
3. applicazione in modo estensivo sulle pareti verticali del pacchetto di rinforzo rete fibrosa più matrice cementizia.

La matrice cementizia può essere preferita ai rinforzi con matrice epossidica quando si vuole garantire un'ottima permeabilità al vapore della parete, escludendo così il rischio di condense superficiali.



Figura 66 - Lesioni riempite di boiaccia a ritiro controllato e sigillate con malta tixotropica



Figura 67 - Parete in muratura rinforzata con rete di carbonio e matrice cementizia

¹⁸ Fenomeno fisico per cui un gel può passare allo stato liquido per effetto di agitazione o di vibrazione, ritornando a coagulare quando l'azione meccanica viene sospesa

4.5.3 Consolidamento di ciminiera

Il rinforzo di questo tipo di strutture viene realizzato generalmente con un numero imprecisato di cerchiature (dipende da caso a caso) realizzate con fasce di fibra di carbonio eseguite a differenti livelli che fungono da confinamento; le “staffe” così realizzate, possono, se necessario e previsto dal progetto, garantire anche un’adeguata resistenza a taglio della ciminiera dovuta alla eventuale messa in opera di altre strisce di fibra che corrono longitudinalmente alla struttura.

E’ da dare per scontato il preventivo riempimento di fessure preesistenti con l’utilizzo di malte a ritiro controllato.

Anche per questo tipo di applicazione la scelta di un rinforzo che non fa uso di matrici epossidiche è giustificata dalla necessità di avere un potenziamento che non teme le alte temperature e l’umidità anche durante la messa in opera, peculiarità, queste, che caratterizzano le matrici inorganiche e non quelle organiche.



Figura 68 - Da sinistra a destra: ciminiera fessurata; messa in opera delle cerchiature in carbonio e matrice cementizia; vista di insieme della struttura

CONCLUSIONI

Ricordando che un sistema di rinforzo composito è il risultato dell'unione di una fibra (sotto forma di tessuto o rete) ad alte prestazioni meccaniche e di una **matrice** avente funzione di adesivo, che consente di trasmettere le sollecitazioni dalla struttura rinforzata alla fibra; possiamo affermare che, sulla base del presente lavoro, a fianco a rinforzi di ormai comprovata efficacia e versatilità come gli FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), entrano a pieno merito nel campo del ripristino e del consolidamento strutturale anche gli **FRCM** (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), gli **SRG** (*Steel Reinforced Grout*) ed i **TRM** (*Textile Reinforced Mortars*) i quali sfruttano le proprietà fisico-meccaniche di una **matrice** che non fa più uso di resine epossidiche, il più delle volte difficili da gestire durante la messa in opera per le loro caratteristiche di scarsa lavorabilità (tempi e temperature di posa limitate), ma di una **malta cementizia**.

Le **matrici inorganiche cementizie**, abbinate a fibre di altissima resistenza come il carbonio ed il PBO (vedi cap. 3), hanno dimostrato la loro efficienza nel rinforzo a flessione di travi in cemento armato incrementandone il carico di collasso per valori compresi tra il 15% (matrice cementizia e rete in carbonio) ed il 20% (matrice cementizia e rete in PBO); questi valori, anche se non raggiungono quelli ottenibili con matrici organiche resinose (incrementi di circa il 30%), sono generalmente sufficienti a garantire un adeguato aumento delle prestazioni degli elementi strutturali ai quali vengono applicati, inoltre, i rinforzi a **matrice cementizia**, hanno dalla loro parte le proprietà intrinseche del calcestruzzo:

- ✓ buona lavorabilità (le matrici epossidiche risultano tipicamente poco lavorabili a temperature inferiori ai 10°C o superiori ai 30°C in quanto la fase di indurimento ne risente fortemente);

- ✓ buona resistenza agli incendi (le matrici epossidiche non resistono generalmente a temperature superiori agli $80^{\circ}\text{C} \div 110^{\circ}\text{C}$ senza subire un rammollimento e quindi compromettere la resa del rinforzo);
- ✓ applicabilità su sottofondi umidi (le matrici epossidiche necessitano di un sottofondo perfettamente asciutto);
- ✓ permettere la traspirazione delle pareti e quindi evitare la formazione di condensa superficiale (le matrici epossidiche generano una barriera impermeabile a qualsiasi fluido);
- ✓ le maestranze, durante la posa, non necessitano di particolari protezioni alle vie respiratorie ed alle mani (le matrici epossidiche possono essere tossiche).

Oltre a quanto appena esposto è bene porre particolare attenzione a quanto già evidenziato al paragrafo 2.1.2.1 e nel capitolo 3, riguardante i meccanismi di crisi dei rinforzi a matrice cementizia.

Per meglio capire il concetto farò uso del seguente diagramma fittizio carico-freccia:

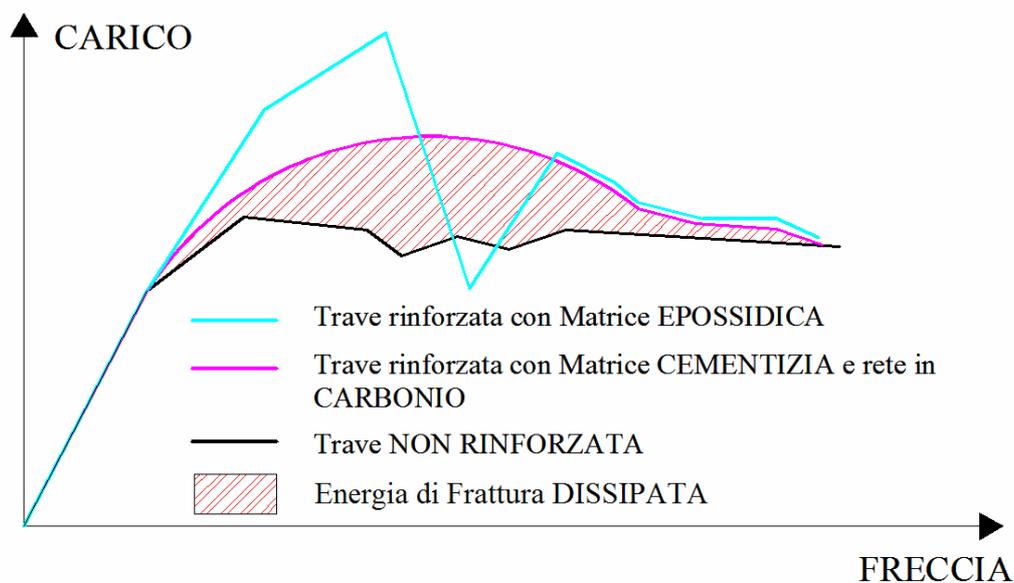


Figura 69 - Diagramma carico-freccia fittizio

Come possiamo osservare dalla Figura 1, rappresentante in comportamento ideale di tre travi in cemento armato portate a rottura per flessione, i rinforzi realizzati con matrice cementizia dimostrano una modalità di crisi *duttile* ed una ingente *dissipazione di energia di frattura* (area campita al di sotto della curva di colore verde) a differenza dei rinforzi realizzati con matrice epossidica che risulta essere estremamente *fragile*.

Questa caratteristica meccanica, che però come abbiamo visto al capitolo 3 non viene rispettata se la fibra accoppiata alla malta è il PBO (*Poliparafenilenbenzobisoxazolo*) a causa dei legami chimici di cui al paragrafo 2.1.2.1, rende il rinforzo con *matrice inorganica* particolarmente adatto a realizzare quanto richiesto nelle normative sismiche (ORD. P.C.M. 20 marzo 2003) in cui si fa esplicito riferimento alla necessità di adottare *“tutte le regole di dettaglio volte ad assicurare caratteristiche di duttilità agli elementi strutturali e alla costruzione nel suo insieme”* secondo quanto indicato nelle norme stesse.

Concludo notificando quanto già asserito in conclusione del capitolo 4, ossia la vastità e l'eterogeneità del campo di applicazione dei rinforzi compositi rilevando quella che sembra un ottimo connubio tra rispetto dell'immenso patrimonio culturale italiano, rappresentato da strutture di rara bellezza architettonica, e la necessità di salvaguardare lo stesso consolidandone l'ossatura senza però turbarne l'essenza.

ALLEGATI

Allegato 1: Scheda tecnica X MESH C10

Ruredil X Mesh C10_{M25}

Rete di carbonio in matrice inorganica stabilizzata
per il rinforzo strutturale delle costruzioni in muratura



Descrizione del prodotto

RUREDIL X MESH C10 è un composito strutturale costituito da una rete di carbonio, che funge da rinforzo continuo, e da una matrice inorganica stabilizzata, studiata per rendere solida la rete al supporto in muratura.

RUREDIL X MESH C10 è un sistema brevettato che introduce un'innovazione mondiale nel campo dei sistemi di rinforzo strutturale a base di fibre ad alte prestazioni, quali il carbonio, il kevlar, il vetro, ecc., genericamente denominati FRP. Questi ultimi compositi impiegano come legante una matrice organica (resina epossidica o poliestere) per garantire l'adesione al supporto.

RUREDIL X MESH C10, a differenza degli FRP, impiega una matrice inorganica, costituita da un legante idraulico pozzolanico e da additivi specifici, perfettamente compatibile sotto il profilo chimico, fisico e meccanico con il supporto, con particolare riferimento alle murature.

Applicazioni tipo

RUREDIL X MESH C10/M25 è la matrice specifica per tutte le strutture in muratura:

- rinforzo strutturale,
- miglioramento sismico,
- sostituzione della tradizionale lastra armata.

Confezioni, stoccaggio, dosaggio, resa

- RUREDIL X MESH C10: rotolo di rete di carbonio, larghezza 100 cm e lunghezza 15 m.
- RUREDIL X MESH M25: matrice inorganica stabilizzata, sacchi da 25 kg.
- Per 1 rotolo da 15 m di rete RUREDIL X MESH C10, occorrono circa 6 sacchi di malta RUREDIL X MESH M25.
- Essendo a base inorganica, RUREDIL X MESH M25 è sensibile all'umidità, pertanto deve essere conservata in ambiente coperto e asciutto. Una volta aperta la confezione, utilizzare tutto il contenuto.
- Stoccare ad una temperatura compresa tra +5°C e +40°C.

Consistenza	Plastica* Spandimento=75%
Peso specifico malta fresca	1,75 ± 0,05
Litri di H ₂ O per 100 kg di Ruredil X Mesh M25	25-27
Resa Kg/m ² /mm (prodotto sacco)	1,405 - 1,450
Litri di malta fresca per 100 kg di Ruredil X Mesh M25	70 - 72

*secondo (UNI EN 130, parte 3^a)

Vantaggi rispetto ai tradizionali FRP

RUREDIL X MESH C10, confrontato con un sistema FRP a base di resina epossidica o poliestere, offre i seguenti vantaggi:

Resistenza al fuoco identica a quella del supporto (calcestruzzo o muratura)

I sistemi FRP perdono le loro proprietà strutturali durante un incendio a causa della scarsa resistenza al calore delle resine utilizzate per rendere solida la fibra o il tessuto alla struttura. È noto infatti che le resine (poliesteri ed epossidiche) perdono le loro caratteristiche strutturali a temperature comprese tra 110 e 150 °C.

Applicabilità su supporti umidi, essendo a base cementizia

I sistemi FRP, invece, possono essere applicati solo se il supporto è privo d'umidità, in quanto le resine (poliesteri ed epossidiche) non catalizzano in presenza di acqua.

Facilità di applicazione anche su superfici scabre e irregolari

La stesura dello strato di malta inorganica RUREDIL X MESH M25, colma le irregolarità della superficie (considerati gli spessori del sistema) senza necessità di rasatura come nelle applicazioni con FRP.

Facilità di manipolazione

Si mescola il premiscelato con l'acqua prevista in scheda e lo si mette in opera come una tradizionale malta cementizia, in cui viene annegata la rete strutturale di carbonio.

Lavorabilità

Tra i 5° e i 40 °C non esistono sostanzialmente differenze nel tempo di lavorabilità. Le resine hanno un pot life in funzione della temperatura e, conseguentemente, limitano l'applicazione degli FRP quando le condizioni termometriche sono sfavorevoli.

Non è un prodotto tossico, come lo sono invece le resine di cui sono costituiti gli FRP

Per la messa in opera di RUREDIL X MESH C10 occorre seguire le normali condizioni operative impiegate per le malte cementizie.

La pulizia degli attrezzi impiegati per la messa in opera viene fatta con acqua

Nel caso degli FRP occorre impiegare dei solventi particolari e, in molti casi, gli attrezzi non possono più essere utilizzati una seconda volta.

Raccomandazioni per la messa in opera

a) Preparazione del sottofondo

Preparare la superficie nel seguente modo:

- rimuovere l'intonaco pre-esistente;
- eliminare polvere, parti incoerenti, macchie di olio, etc.;
- qualora sulle superfici fossero presenti difetti macroscopici, procedere alla regolarizzazione con malte della linea RUREWALL.

Ruredil





b) Preparazione della malta RUREDIL X MESH M25

Versare nell'impastatrice circa il 90% dell'acqua prescritta, quindi azionare l'impastatrice aggiungendo RUREDIL X MESH M25 senza interruzioni per evitare la formazione di grumi. Mescolare l'impasto per 2-3 minuti; aggiungere se necessario la restante acqua per arrivare alla consistenza voluta e mescolare per altri 3-4 minuti. In climi particolarmente caldi si possono tollerare piccoli incrementi nel contenuto d'acqua rispetto ai valori della tabella, mentre il contrario si verifica in climi freddi e umidi.

c) Influenza della temperatura

È consigliabile applicare il prodotto con temperature comprese tra i +5°C e +35°C; temperature basse (4-10°C) rallentano notevolmente la presa; temperature elevate (35°-50°C) fanno perdere velocemente lavorabilità alla malta.

d) Messa in opera della malta RUREDIL X MESH M25

Bagnare il sottofondo, quindi applicare RUREDIL X MESH M25 con frattazzo metallico liscio in spessore di circa 3 mm; in essa andrà subito annegata RUREDIL X MESH C10.

Applicare un secondo strato di circa 3 mm di RUREDIL X MESH M25, in modo tale da coprire completamente la rete.

e) Applicazione della rete RUREDIL X MESH C10

RUREDIL X MESH C10 dovrà essere applicata con orientamento 0°/90°, rispetto al piano di terra o la linea di allettamento dei mattoni della muratura. Nei punti di giunzione prevedere una sovrapposizione di almeno 7-8 cm. Qualora fosse previsto un secondo strato di RUREDIL X MESH C10, ripetere l'operazione sopraindicata, avendo cura di applicare RUREDIL X MESH C10 preferibilmente con orientamento +45°/-45°, in diagonale rispetto al primo strato di rete (o come prescritto dal progettista), sempre fresco su fresco. Nei punti di giunzione, prevedere una sovrapposizione di almeno 7-8 cm.

Ruredil spa

Sede e stabilimento:
20097 S. Donato Milanese/Milano - Via B. Buozzi, 1
Telefono +39.02.5276041 - Telefax +39.02.5272185
Info@ruredil.it - www.ruredil.it

Fillial:

Roma - Tel.: +39.335.0835142 - +39.06.3211957
Torino - Tel.: +39.011.712402 - Fax +39.011.712731
Salerno - Tel.: +39.335.8100477

Agenti in ogni zona d'Italia

La presente edizione annulla e sostituisce ogni altra precedente.

Le informazioni contenute nella presente scheda si basano sulle nostre conoscenze ed esperienze; non possono quindi implicare una garanzia da parte nostra, né responsabilità circa l'impiego dei nostri prodotti, non essendo le condizioni di utilizzo sotto il nostro controllo.

1/2005



Ruredil

Si raccomanda di non eseguire la stesura del sistema RUREDIL X MESH C10 al sole, durante le ore calde dei mesi estivi o con vento moderato o forte. In caso di pioggia, provvedere a proteggere la struttura con mezzi adeguati.

f) Stagionatura

In ambienti con forte ventilazione o esposizione solare può essere necessario prevedere opportuni sistemi di protezione.

Proprietà

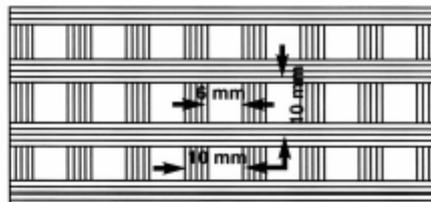
● Caratteristiche meccaniche della fibra di carbonio di cui è costituita la rete Ruredil X MESH C10

Carico di rottura a trazione (MPa)	4,800
Modulo elastico (GPa)	240
Densità fibra (g/cm ³)	1,78
Allungamento a rottura (%)	1,8

● Caratteristiche Ruredil X MESH C10

Peso di fibra di carbonio nella rete (g/m ²)	168
Spessore per il calcolo della sezione di carbonio a 0° e 90° (mm)	0,047
Carico di rottura sia in direzione 0° sia in direzione 90° (kg/cm ²)	≥100

* Carico di rottura riferito ad una larghezza unitaria di 1 cm



● Caratteristiche Ruredil X MESH M25

Resistenza a compressione (N/mm ²)	38
Resistenza a flessione (N/mm ²)	7,5
Modulo elastico (MPa)	15.000

* Valori a 28 gg.

Estero:

Agenti rappresentanti presenti nei seguenti Paesi:
Algeria, Centro e Sud America, Cipro, Croazia, Gran Bretagna, Grecia, Iran, Irlanda, Marocco, Olanda, Portogallo, Svezia, Svizzera, Tunisia, Turchia, Ungheria.

Per maggiori dettagli sulla distribuzione dei nostri prodotti all'estero, contattare il seguente indirizzo e-mail:
Info@ruredil.it

Allegato 2: Scheda tecnica X MESH GOLD



Descrizione del prodotto

RUREDIL X MESH GOLD è un nuovo sistema FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) brevettato che introduce un'innovazione mondiale nel campo dei sistemi di rinforzo strutturale a base di fibre ad alte prestazioni.

RUREDIL X MESH GOLD è un sistema costituito da una rete di fibre di Poliparafenilenbenzobisoxazolo (PBO) e da una matrice inorganica stabilizzata studiata per rendere solidale la rete al supporto di calcestruzzo. La sezione di fibre è doppia in direzione dell'ordito rispetto a quella in direzione della trama.

Per le sue altissime prestazioni meccaniche tale composito può eguagliare le prestazioni dei tradizionali FRP con fibre di carbonio e legante epossidico.

Applicazioni tipo

RUREDIL X MESH GOLD viene impiegato per il rinforzo delle strutture in c.a e c.a.p., comprese quelle soggette all'azione del fuoco o ad alte temperature.

In particolare RUREDIL X MESH GOLD va applicato su strutture in c.a e c.a.p per:

- rinforzi a flessione;
- rinforzi a taglio;
- rinforzi a torsione;
- confinamenti di pilastri pressoinflessi con piccola eccentricità;
- confinamenti e rinforzi longitudinale di pilastri pressoinflessi con grande eccentricità.

Per quanto riguarda gli interventi in zona sismica, RUREDIL X MESH GOLD è adatto per:

- incrementare la resistenza a flessione semplice o a pressoflessione di pilastri e travi;
- incrementare la resistenza a taglio di travi e pilastri;
- incrementare la duttilità delle parti terminali di travi e pilastri mediante fasciatura;
- incrementare la resistenza a trazione dei pannelli dei nodi trave-pilastro con le fibre disposte secondo le isostatiche di trazione.

L'efficacia del rinforzo a flessione con X MESH GOLD di travi di calcestruzzo armato è stata valutata sperimentalmente attraverso prove di flessione su tre e quattro punti di travi di sezione 40 cm x 25 cm testate su luci di 1,8 m e 2,2 m. Sono state considerate diverse tipologie di rinforzo, analoghe a quelle delle figure 1, 2, 3 e 4. Alcuni risultati sperimentali, in termini di diagrammi carico-spostamento in mezzeria, sono riportati nelle figure citate. Si osserva in tutti i casi il beneficio del rinforzo fibroso che, rispetto al caso non rinforzato, innalza il carico di collasso del provino.

Confezioni, stoccaggio, dosaggio e resa

- RUREDIL X MESH GOLD: rotolo di rete in fibra di PBO, larghezza 100 cm e lunghezza 15 m.
- Conservare la confezione all'asciutto e lontano da fonti di calore.
- RUREDIL X MESH M750: matrice inorganica stabilizzata, sacchi da 25 Kg.
- Per 1 rotolo da 15 m di rete RUREDIL X MESH GOLD, occorrono circa 4 sacchi di malta RUREDIL X MESH M750.
- Essendo a base inorganica, RUREDIL X MESH M750 è sensibile all'umidità, pertanto deve essere conservata in ambiente coperto e asciutto. Una volta aperta la confezione, utilizzare tutto il contenuto.
- Stoccare a una temperatura compresa tra +5°C e +35°C.

Consistenza	Plastica* Spandimento = 90%
Peso specifico malta fresca	1,50 ± 0,05
Litri di H ₂ O per 100 kg di Ruredil X Mesh M750	38
Rese kg/m ² /mm (prodotto secco)	1,050 - 1,150

* secondo UNI EN 196, parte 3^o

Vantaggi rispetto ai tradizionali FRP

RUREDIL X MESH GOLD, confrontato con un sistema FRP con matrice epossidica o poliestere, offre i seguenti vantaggi:

Resistenza alle alte temperature identica a quella del supporto

I sistemi FRP perdono le loro proprietà meccaniche durante un incendio a causa della scarsa resistenza al calore delle resine utilizzate per rendere solidali le fibre alla struttura. È noto infatti che le resine (poliestere ed epossidiche) perdono le loro caratteristiche strutturali e di adesione a temperature comprese tra 80 e 120 °C.

Applicabilità su supporti umidi, essendo a base inorganica

I sistemi FRP, invece, possono essere applicati solo se il supporto è privo d'umidità, in quanto le resine (poliestere ed epossidiche) non catalizzano in presenza di acqua.

Facilità di manipolazione

La matrice inorganica si impasta con acqua e la si mette in opera come una tradizionale malta cementizia, in cui viene annegata la rete strutturale di fibre di PBO.

Lavorabilità

Tra i 5 °C e i 40 °C non esistono sostanzialmente differenze nel tempo di lavorabilità. Le resine hanno un pot life in funzione della temperatura e, conseguentemente, limitano l'applicazione degli FRP quando le condizioni termocicrometriche sono sfavorevoli.

Non è un prodotto tossico, come lo sono invece le resine di cui sono costituiti gli FRP

Per la messa in opera di RUREDIL X MESH GOLD occorre seguire le normali condizioni operative impiegate per le malte cementizie.

La pulizia degli attrezzi impiegati per la messa in opera viene fatta con acqua

Nel caso degli FRP occorre impiegare dei solventi particolari e, in molti casi, gli attrezzi non possono più essere utilizzati una seconda volta.



Raccomandazioni per la messa in opera

a) Preparazione del sottofondo

Eliminare polvere, parti incoerenti, macchie di olio, etc., quindi procedere ad una leggera sabbiatura (meccanica o con idropulitrice) ad effetto acido.

Qualora sulla superficie fossero presenti difetti macroscopici, procedere alla regolarizzazione con malte della linea EXOCBM. È sempre necessario lo smusso degli spigoli con un raggio di curvatura minimo di 3 cm quando questi vengono fasciati da materiale composito.

b) Preparazione della malta RUREDIL X MESH M750

Versare nell'impastatrice circa il 90% dell'acqua prescritta, quindi azionare l'impastatrice aggiungendo RUREDIL X MESH M750 senza interruzioni per evitare la formazione di grumi.

Mescolare l'impasto per 2-3 minuti; aggiungere la restante acqua prevista in scheda e rimiscolare per altri 1-2 minuti. Prima di venire applicato, l'impasto dovrà riposare per circa 2-3 minuti ed essere poi rimiscolato e applicato.

c) Messa in opera del sistema RUREDIL X MESH GOLD

Bagnare il sottofondo saturandolo con acqua, avendo cura di asportarne l'eccesso.

Applicare RUREDIL X MESH M750 con frattazzo metallico liscio in spessore di circa 2-3 mm; attendere un paio di minuti quindi annegare in essa RUREDIL X MESH GOLD. Applicare un secondo strato di circa 2-3 mm di RUREDIL X MESH M750, in modo tale da coprire completamente la rete.

Qualora la malta perda lavorabilità, non aggiungere ulteriore acqua ma rimiscolare l'impasto per circa 1-2 minuti prima di continuare ad applicarlo.

Si raccomanda di non eseguire l'applicazione del sistema RUREDIL X MESH GOLD al sole, durante le ore calde dei mesi estivi, con vento moderato o forte.

In caso di pioggia, provvedere a proteggere la struttura con mezzi adeguati.

d) Influenza della temperatura

È consigliabile applicare il prodotto con temperature comprese tra +5 °C e +35 °C; temperature basse (4-10 °C) rallentano notevolmente la presa; temperature elevate (35-50 °C) fanno perdere velocemente lavorabilità alla malta.

e) Stagionatura

In ambienti con forte ventilazione o esposizione solare può essere necessario prevedere opportuni sistemi di protezione. In caso di pioggia imminente, provvedere a proteggere il rinforzo applicato con mezzi adeguati.

Proprietà

• Caratteristiche delle fibre di PBO

Densità (g/m ³)	1,56
Resistenza a trazione (GPa)	5,8
Modulo elastico (GPa)	270
Allungamento a rottura (%)	2,15
Temperatura di decomposizione (°C)	650
Coefficiente di dil. termica (10 ⁻⁴ °C ⁻¹)	-6

• Caratteristiche della rete Ruredil X MESH GOLD

Peso della rete (g/m ²)	144
Peso delle fibre di PBO nella rete (g/m ²)	96
Spessore equiv. di tessuto secco in dir. dell'ordito (mm)	0,0450
Spessore equiv. di tessuto secco in dir. della trama (mm)	0,0230
Carico di rottura dell'ordito per unità di larghezza (kNm)	261
Carico di rottura della trama per unità di larghezza (kNm)	131,5

• Caratteristiche meccaniche Ruredil X MESH M750

Resistenza a compressione a 28 gg (MPa)	29
Resistenza a flessione a 28 gg (MPa)	3,5
Modulo elastico a 28 gg (MPa)	6.000

* Valori a 28 gg

Rinforzo a flessione di travi in c.a.

- Il rinforzo a flessione di travi in c.a. può conseguirsi con applicazione di RUREDIL X MESH GOLD in zona tesa, realizzando incrementi di resistenza che si aggirano sul 10-50% o più del valore attuale.
- La tipica morfologia del rinforzo si realizza con fasce in intradosso di lunghezza variabile, eventualmente ripiegate sulle superfici laterali e, qualora possibile, con almeno una fascia a conformazione di staffa (ad U) in corrispondenza delle parti terminali della fasciatura longitudinale. Le figure 1, 2, 3 e 4 rappresentano tre possibili configurazioni di rinforzo per le quali il numero di strati disposti in intradosso deve essere determinato attraverso il calcolo a flessione della trave. Nelle stesse figure sono tracciati alcuni diagrammi carico-freccia sperimentali, ottenuti con prove di flessione su travi di calcestruzzo amato rinforzate adottando configurazioni analoghe a quelle rappresentate.
- La prima configurazione (figura 1) prevede uno strato di rinforzo intradossale e fasce a U di estremità; la seconda configurazione (figure 2 e 3) prevede due strati di fasce intradossali e fasce a U di estremità; da ultimo la terza configurazione (figura 4) prevede fasce intradossali, fasce intradossali estese anche alle superfici laterali e fasce a U di rinforzo a taglio. Qualora possibile si suggerisce l'adozione della configurazione della figura 4.



Ruredil

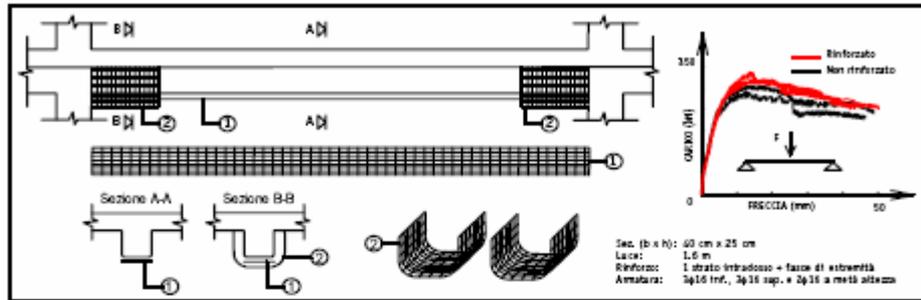


figura 1

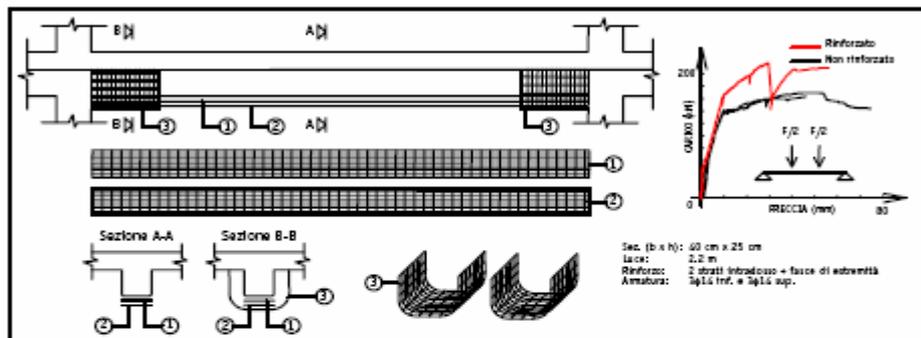


figura 2

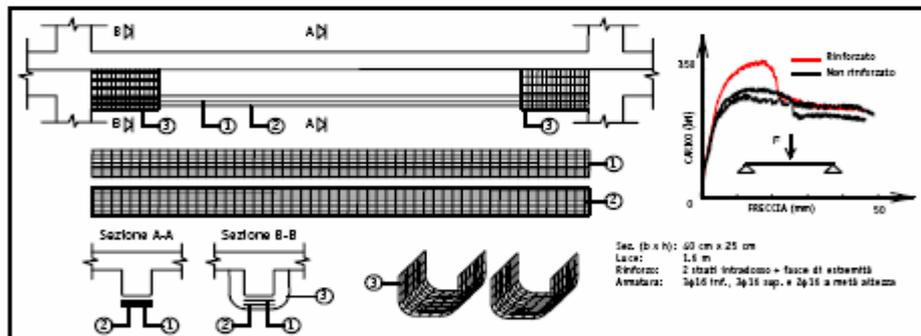


figura 3

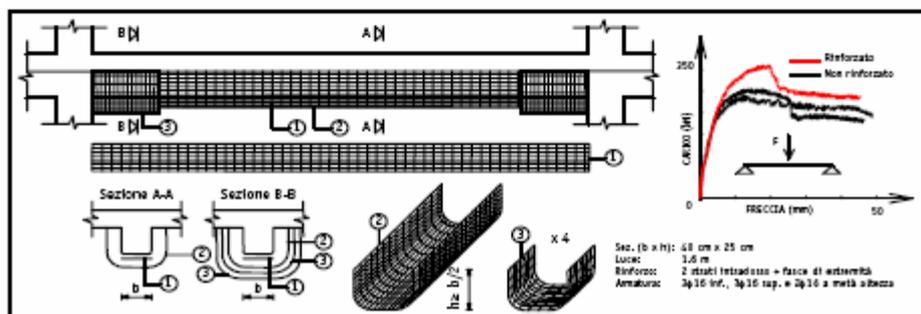


figura 4





Criteria di progettazione dei rinforzi con Ruredil X Mesh GOLD per travi inflesse di c.a.

Nello spirito del Documento Tecnico CNR-DT 200/2004, il dimensionamento del rinforzo flessionale può essere condotto allo Stato Limite Ultimo, considerando una resistenza di progetto del rinforzo che tenga conto della modalità di crisi per «delaminazione intermedia» che, nel caso del rinforzo RUREDIL X MESH GOLD, avviene solitamente per scorrimento tra le fibre e la matrice cementizia.

Sulla base delle prime sperimentazioni condotte, si può suggerire di assumere come resistenza a trazione di progetto del rinforzo (tenendo conto anche della crisi per delaminazione intermedia) i seguenti valori.

- Con uno strato di rinforzo e fasce a U di estremità (tipo figura 1):

$F_{Rd} = 157,5$ kN/m (forza per unità di larghezza di rinforzo), corrispondente alla tensione di rottura (ordito) di calcolo $f_{Rd} = 3500$ N/mm² e alla dilatazione ultima di calcolo $\epsilon_{Rd} = 1,29\%$

- Con due strati di rinforzo e fasce a U di estremità (tipo figure 2 e 3):

$F_{Rd} = 230,4$ kN/m (forza per unità di larghezza di rinforzo), corrispondente alla tensione di rottura (ordito) di calcolo $f_{Rd} = 2560$ N/mm² e alla dilatazione ultima di calcolo $\epsilon_{Rd} = 0,94\%$.

- Con due strati di rinforzo di cui uno a U continuo (tipo figura 4):

$F_{Rd} = 252,0$ kN/m (forza per unità di larghezza di rinforzo), corrispondente alla tensione di rottura (ordito) di calcolo $f_{Rd} = 2800$ N/mm² e alla dilatazione ultima di calcolo $\epsilon_{Rd} = 1,03\%$.

I valori sopra riportati sono da utilizzarsi esclusivamente per la valutazione del momento ultimo delle sezioni rinforzate.

Anche la verifica allo Stato Limite Ultimo di delaminazione di estremità può essere condotta nello spirito del documento CNR-DT 200/2004 considerando, per le diverse configurazioni, tensioni di distacco all'estremità del rinforzo pari a circa il 20% delle resistenze di calcolo sopra indicate.

Per contrastare la delaminazione di estremità del rinforzo sono comunque utili le fasce a staffa ③ di figura 2 (che operano inoltre un rinforzo a taglio) e la conformazione ② di figura 4 dello strato superficiale di rinforzo.

Si rimarca che le resistenze di calcolo sopra riportate possono essere raggiunte solo se il calcestruzzo del copriferro possiede idonee caratteristiche meccaniche. In caso contrario, potrebbero verificarsi rotture premature nel copriferro e conseguentemente la crisi con scorrimento delle fibre nella matrice cementizia non potrebbe essere raggiunta.

Si raccomanda pertanto un'attenta valutazione delle caratteristiche meccaniche dello strato superficiale del calcestruzzo e la ricostruzione dell'intero copriferro se queste non risultassero adeguate e nei casi di avanzata corrosione delle armature metalliche.

Determinata la sezione di rinforzo che soddisfa lo Stato Limite Ultimo, possono essere eseguite le verifiche agli Stati Limite di Esercizio e in particolare quella relativa alle tensioni.

In generale, è da considerare lo stato di sollecitazione pre-esistente (dovuto ai carichi presenti all'istante dell'applicazione del rinforzo), al quale consegue una dilatazione differenziale tra il supporto e il rinforzo.

N.B. Il progetto di un intervento di rinforzo deve comunque basarsi, come per ogni tipo di materiale composito, su un'attenta valutazione delle caratteristiche della struttura da rinforzare. In particolare, devono essere indagate la qualità dei materiali in opera (calcestruzzo e acciaio), l'ammontare di armatura metallica presente, lo stato del copriferro e la corrosione delle armature. Deve poi essere valutata la modalità di crisi della struttura prima e dopo l'intervento di rinforzo.

Il progettista, prima della consegna del progetto esecutivo, dovrà stimare, sulla base di imprescindibili prove in situ, la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo e i danni locali (fessurazioni e distacchi) da riparare. Una prova globale di carico prima e dopo l'intervento è fortemente raccomandata per certificare il funzionamento dell'accoppiamento composito-calcestruzzo.

Il direttore dei lavori dovrà procedere a un'accurata verifica di accettazione del materiale composito, al rispetto delle condizioni previste dal progettista per quanto riguarda le superfici di incollegamento e all'esecuzione di una prova preventiva, oltre alle usuali attività di controllo sulla posa in opera che includono l'applicazione del composito.

Ruredil spa

Sede e stabilimento:
20097 S. Donato Milanese/Milano - Via B. Buozzi,1
Telefono +39.02.5276041 - Telefax +39.02.5272185
info@ruredil.it - www.ruredil.it

Filiali:

Roma - Tel.: +39.335.5635142 - +39.06.3211957
Torino - Tel.: +39.011.712402 - Fax +39.011.712731
Salerno - Tel.: +39.335.8106477

Agenti in ogni zona d'Italia

La presente edizione annulla e sostituisce ogni altra precedente.

Le informazioni contenute nella presente scheda si basano sulle nostre conoscenze ed esperienze; non possono quindi implicare una garanzia da parte nostra, né responsabilità circa l'impiego dei nostri prodotti, non essendo le condizioni di utilizzo sotto il nostro controllo.

03/2007



Ruredil

Estero:

Agenti rappresentanti presenti nei seguenti Paesi:
Algeria, Austria, Costarica, Cipro, Corea del Sud, Cuba,
Francia, Grecia, Iran, Marocco, Polonia, Portogallo,
Rep. Dominicana, Spagna, Svizzera, Tunisia, Ucraina.

Per maggiori dettagli sulla distribuzione dei nostri prodotti all'estero, contattare il seguente indirizzo e-mail:
Info@rurcem.it

Allegato 3: Scheda tecnica X Wrap 310

Ruredil X Wrap 310

Fascia in fibra di carbonio unidirezionale per rinforzi strutturali



Descrizione del prodotto

RUREDIL X WRAP 310 è un sistema costituito da un "foglio" di fibre di carbonio unidirezionale, che può essere facilmente applicato a strutture in calcestruzzo, murature ed edifici di particolare pregio storico artistico. L'applicazione di Ruredil X Wrap 310 consente di ripristinare e rinforzare le strutture deteriorate grazie alla sua notevole resistenza, al suo peso limitato, all'estrema durabilità e facilità di applicazione.

Il sistema Wrap 310 è costituita da:

- Ruredil X Wrap 310: fascia in fibra di carbonio unidirezionale;
- Ruredil X Wrap Primer: resina epossidica speciale ad alto potere impregnante;
- Ruredil X Wrap Resin: resina epossidica speciale ad alto potere adesivo.

Applicazioni tipo

RUREDIL X WRAP 310 è indicato per:

- rinforzi flessionali: placcaggio (beton plaqué) per l'adeguamento o il miglioramento strutturale di edifici (danni provocati da eventi sismici), per "riparare" elementi in calcestruzzo (ponti impattati), per il confinamento a compressione di elementi in calcestruzzo mediante tecnica di fasciatura;
- confinamento a compressione, ovvero fasciatura di elementi in calcestruzzo, quali pilastri di ponti o edifici;
- adeguamenti o miglioramenti strutturali di edifici sottoposti a sollecitazioni sismiche, dinamiche e impulsive;
- rinforzi strutturali di ponti autostradali, gallerie, etc. con riduzione di tempi e costi di manutenzione.

Confezioni, stoccaggio, dosaggio, resa
RUREDIL X WRAP 310 viene fornito nelle seguenti confezioni:

- Ruredil X Wrap 310: rotolo da 25 m, larghezza 25 cm, equivalenti a 6,25 m²;
- Ruredil X Wrap Primer: secchielli in plastica, componente A 4 kg + componente B 2 kg;
- Ruredil X Wrap Resin: secchielli in plastica, componente A 4 kg + componente B 2 kg.

Resa:

- Ruredil X Wrap Primer: = 0,250 kg/m²
- Ruredil X Wrap Resin: 1 strato = 0,500 kg/m²
2° strato e successivi = 0,300 kg/m²

Conservare in ambienti ventilati e asciutti a temperature inferiori a 30°C.

Non esporre ai raggi solari. Non piegare, accartocciare o bagnare il foglio di fibra di carbonio.

Raccomandazioni per la messa in opera

Per la corretta messa in opera di Ruredil X Wrap 310 occorre utilizzare i seguenti attrezzi: forbici o taglierino per il taglio della fascia unidirezionale;

contenitori graduati per la miscelazione corretta del primer e della resina;

rullo in gomma dura (tipo frangibolle) per favorire l'impregnazione della fascia in carbonio;

- pennelli o rulli per la stesura del primer e della resina;
- contenitori rettangolari per contenere il primer e la resina (da preferirsi ai secchi nel caso si usino i rulli).

1. Preparazione del sottofondo

La superficie di supporto deve essere il più possibile planare e regolare. Preparare la superficie con un metodo adeguato al tipo e alle condizioni del supporto:

- per elementi sani, o di recente fattura, procedere alla sabbiatura delle superfici;
- nel caso di strutture degradate occorre rimuovere l'intero strato ammalorato mediante idro-demolizione, scarifica, o altro.

Ripristinare la pre-esistente planarità mediante Exocem FP o Exocem PVA per le strutture in calcestruzzo, mentre per quelle in muratura utilizzare Rurewall PVA TX o Rurewall T.

2. Applicazione di Ruredil X Wrap Primer

- Applicare a rullo o a pennello Ruredil X Wrap Primer, avendo l'accortezza di omogeneizzare perfettamente i due componenti nelle giuste proporzioni (componente A: componente B = 2:1). Il supporto deve essere perfettamente asciutto;
- attendere la completa asciugatura del primer prima di passare alla stesura della resina.

3. Applicazione 1° strato di Ruredil X Wrap Resin

- A completa asciugatura del primer, applicare a rullo circa 0,5 kg/m² di Ruredil X Wrap Resin, avendo l'accortezza di preparare il prodotto omogeneizzando perfettamente i due componenti nelle giuste proporzioni (componente A: componente B = 2:1).
- attendere circa 20/30 min. quindi procedere all'applicazione della fascia unidirezionale Ruredil X Wrap 310.

4. Applicazione della fascia unidirezionale di Ruredil X Wrap 310

- Applicare Ruredil X Wrap 310 esercitando una leggera pressione con le mani al fine di far aderire la fascia alla struttura;
- esercitare una pressione costante con un rullo di gomma (tipo frangibolle) su Ruredil X Wrap 310 per favorire la fuoriuscita di eventuali bolle d'aria tra le fibre e il supporto, muovendo il rullo dalla metà della fascia verso le estremità in senso longitudinale. Questa operazione consente la prima fase della "impregnazione", facendo penetrare la resina dal retro della fascia;
- attendere circa 20/30 min. prima di procedere all'applicazione del 2° strato di Ruredil X Wrap Resin.

5. Applicazione 2° strato di Ruredil X Wrap Resin

- Applicare a rullo circa 0,3 kg/m² di Ruredil X Wrap Resin, avendo l'accortezza di preparare il prodotto omogeneizzando perfettamente i due componenti nelle giuste proporzioni (componente A: componente B = 2:1).

Ruredil





6. Applicazione di eventuali strati successivi di Ruredil X Wrap 310

Qualora siano previsti più strati, si devono ripetere le ultime due operazioni fino al raggiungimento del numero di strati previsto dal progetto. Ogni strato successivo di tessuto va applicato quando la resina d'impregnazione del precedente strato non è ancora indurita.

7. Protezione delle superfici

Sulle superfici rinforzate con Ruredil X Wrap 310 ed esposte all'azione dei raggi U.V., o su quelle da ricoprire con eventuali intonaci, applicare Rasocem Grip una volta che il composito è indurito, prima di procedere all'applicazione dell'intonaco prescelto. Questa operazione consente una perfetta realizzazione dell'intervento e sostituisce la tradizionale "sabbatura" sull'ultimo strato di resina ancora fresca quale ponte d'aggrappo per il successivo strato d'intonaco.

Influenza della temperatura

Eeguire l'applicazione del Ruredil X Wrap 310 in condizioni ambientali non inferiori a 5°C. In caso di temperatura inferiore, proteggere adeguatamente.

Stagionatura

Qualora l'applicazione s del sistema Ruredil X Wrap 310 sia prevista all'aperto, occorre prevedere un'opportuna protezione della struttura alla pioggia, polvere, umidità, ecc. con l'impiego di teli o altro sistema protettivo. La stessa precauzione deve essere adottata una volta completata l'applicazione in caso di pioggia imminente. Il sistema Ruredil X Wrap 310 deve essere lasciato indurire per almeno 24 ore.

Proprietà

Il sistema Ruredil X Wrap 310 consente di confezionare un rinforzo composito le cui prestazioni meccaniche, a parità di peso, superano di 5 volte quelle dell'acciaio, risparmiando l'80% del peso. Ciò consente di sostituire in maniera vantaggiosa le tradizionali tecniche di placcaggio e di confinamento con un sistema innovativo, leggero e di facile applicazione.

Ruredil X Wrap 310 è resistente a quasi tutti gli agenti chimici e al gelo, prestandosi ad applicazioni gravose anche su strutture dalla morfologia complessa.

Ruredil spa

Sede e stabilimento:
20097 S. Donato Milanese/Milano - Via B. Bucuzzi, 1
Telefono +39.02.5276041 - Telefax +39.02.5272185
Info@ruredil.it - www.ruredil.it

Filiali:

Roma - Tel: +39.335.0635142 - +39.06.3211957
Torino - Tel: +39.011.712402 - Fax +39.011.712731
Salerno - Tel: +39.335.8106477

Agenti in ogni zona d'Italia

La presente edizione annulla e sostituisce ogni altra precedente.

Le informazioni contenute nella presente scheda si basano sulle nostre conoscenze ed esperienze; non possono quindi implicare una garanzia da parte nostra, né responsabilità circa l'impiego dei nostri prodotti, non essendo le condizioni di utilizzo sotto il nostro controllo.

12/2009

Caratteristiche tecniche della fibra in carbonio utilizzata per Ruredil X Wrap 310

Tensione di rottura a trazione	4.800 MPa
Modulo elastico a trazione	240 GPa
Allungamento a rottura	2%
Densità	1,8 g/cm ³

Caratteristiche tecniche della fascia Ruredil X Wrap 310 (riferite al foglio non impregnato)

Resistenza a trazione, secondo ASTM 3039	
Caratteristica f_{tk}	> 3.500 Mpa
Per sovrapposizione Mpa-iss20cm	> 3.500MPa
Caratteristica per unità di larghezza f_{td}	> 600 N/mm
Spessore nominale	0,17 mm
Peso per unità di area	310 g/cm ²

Aderenza al calcestruzzo

Trazione diretta (pr EN 1542)	> $\sigma_{t,gl}$ ovvero rottura del cis
Per taglio (pr EN 12615)	> $\tau_{t,gl}$ ovvero rottura del cis
Modulo elastico caratteristico E_k	> 240 GPa
Deformazione ultima ϵ_{tk}	> 1,5%
Compatibilità termica secondo EN 104-840-3; 50 cicli	Nessun degrado
Fattore di resistenza al vapor acqueo DIN 52615)	$\mu < 10^5$

N.B. Il progetto di un intervento di rinforzo deve comunque basarsi, come per ogni tipo di materiale composito, su un'attenta valutazione delle caratteristiche della struttura da rinforzare. In particolare, devono essere indagate la qualità dei materiali in opera (calcestruzzo e acciaio), l'ammontare di armatura metallica presente, lo stato del copriferro e la corrosione delle armature. Deve poi essere valutata la modalità di crisi della struttura prima e dopo l'intervento di rinforzo.

Il progettista, prima della consegna del progetto esecutivo, dovrà stimare, sulla base di imprescindibili prove in situ, la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo e i danni locali (fessurazioni e distacchi) da riparare. Una prova globale di carico prima e dopo l'intervento è fortemente raccomandata, per certificare il funzionamento dell'accoppiamento composito-calcestruzzo.

Il direttore dei lavori dovrà procedere ad un'accurata verifica di accettazione del materiale composito, al rispetto delle condizioni previste dal progettista per quanto riguarda le superfici di incollaggio e all'esecuzione di una prova preventiva, oltre alle usuali attività di controllo sulla posa in opera che includono l'applicazione del composito.

Estero:

Agenti rappresentanti presenti nei seguenti Paesi
Algeria, Centro e Sud America, Cipro, Croazia, Gran Bretagna, Grecia, Iran, Irlanda, Marocco, Olanda, Portogallo, Svezia, Svizzera, Tunisia, Turchia, Ungheria.

Per maggiori dettagli sulla distribuzione dei nostri prodotti all'estero, contattare il seguente indirizzo e-mail:
Info@rurcem.it



Ruredil

Allegato 4: Scheda tecnica HARWIRE 3SX



[Cords In General](#) | [ST2 Cord Detail](#) | [3X2 Cord Detail](#) | [3SX Cord Detail](#) | [Metallurgy 101](#)



[ST2](#)

3SX CORD

Description	Filament Diameters (mm)	Cord Diameters (in)	Break (n)	Break (lbs)	Break (kips)	Elongation (Strain To Failure)
3SX	3-.48, plus wrap	.040	1343	302	.302	2.3%



[3X2](#)

The 3SX Hardwire is a high carbon steel cord with a micro-fine brass or AO-brass (Adhesion Optimized) coating. The 3SX cord is used where balanced compressive and tensile strengths are required as well as better mechanical bonding characteristics than the 3S. The 3SX cord is made by twisting three identical wire filaments together at a longer than usual lay length and then over-wrapping the bundle with a single filament. The result is a cord with lower twist angles and straighter filaments that is the basis for the increased compressive strengths.



[3SX](#)

Characteristics:

- 3SX tapes have the highest compressive strengths of all Hardwire tapes and tend to match or exceed the tensile properties.
- Increased mechanical bonding in resins.
- Better interlaminar shear resistance.
- The cords do not bloom in failure modes during compression or tension.
- Laminates exhibit steel like characteristics with high ductility and extreme deflection capability.
- Very high flexural strength as well as ductile failure modes (laminates tend to bend - not break).
- The best tape for bending angles and can be done in standard sheet metal breaks.
- Very boardy feel - excellent for flat surfaces but still conformable enough for curved structures.
- Better handling characteristics and cutability than 3S tapes.

Allegato 5: Scheda tecnica HARWIRE 3X2



[Cords In General](#) | [ST2 Cord Detail](#) | [3X2 Cord Detail](#) | [3SX Cord Detail](#) | [Metallurgy 101](#)



[ST2](#)

3X2 CORD

Description	Filament Diameters (mm)	Cord Diameters (in)	Break (n)	Break (lbs)	Break (kips)	Elongation (Strain To Failure)
3X2	3 - .35, 2 - .35	.035	1540	346.2	.3462	2.1%



[3X2](#)

The 3x2 Hardwire is a high carbon steel cord with a micro-fine brass or AO-brass (Adhesion Optimized) coating. The 3X2 cord is made by twisting 5 individual wire filaments together - 3 straight filaments wrapped by 2 filaments at a high twist angle. The result is an easy to handle cord that combines great engineering values with excellent economics. If your application is tension dominated choose the 3x2.



[3SX](#)

Characteristics:

- Best properties in tensile applications.
- Excellent mix of engineering properties - Up to 8 KIPS/inch.
- Great stiffness, instant wet-ability, and excellent conformability.
- Works in all resins.
- Asymmetric shape acts like a screw and gives great mechanical bonding characteristics.
- Excellent fatigue properties in tension and in high-flex situations.
- Great choice for extrusion and pultrusion applications.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Björn Banholzer – Tanja Brockmann – Wolfgang Brameshuber. **“MATERIAL AND BONDING CHARACTERISTICS FOR DIMENSIONING AND MODELING OF TEXTILE REINFORCED CONCRETE (TRC) ELEMENTS”**; Materials and Structures – Rilem – Volume 39; Issue 8 – Ottobre 2006.
- [2] Giulio Castori. **“STRENGTHENING OF MASONRY ELEMENTS WITH INNOVATIVE COMPOSITE LAMINATES”**; Tesi di dottorato di ricerca in ingegneria civile – ciclo XIX – Università degli studi di Perugia – relatore e coordinatore prof. ing. Antonio Borri – A.A. 2005/2006.
- [3] CNR-DT 200/2004. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamenti di Intervento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – paragrafo 4.2.2
- [4] fib bulletin 14, **Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Technical Report prepared** by the Working Party EBR of Task Group 9.3, International Federation for Structural Concrete, July 2001.
- [5] ACI 440.2R-02. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures**, Reported by ACI Committee 400, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.

[6] Di Tommaso Angelo, Focacci Francesco. **“VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLE PROPRIETA’ MECCANICHE DI COMPOSITI A MATRICE CEMENTIZIA (FRCM)”** – Atti del convegno nazionale: Sperimentazione su materiali e strutture – Venezia 6-7 Dicembre 2006;

[7] Di Tommaso Angelo, Focacci Francesco, Mantegazza Giovanni **“RINFORZO A FLESSIONE CON RETE DI CARBONIO E MATRICE CEMENTIZIA: RISULTATI SPERIMENTALI”** – Giornate AICAP 2004. 23° Convegno Nazionale. Migliorare le costruzioni di calcestruzzo strutturale: l’esistente e il nuovo – Verona, 26-29 Maggio 2006.