



**Università Politecnica delle Marche**

**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale**

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura - DICEA

**“Analisi delle Problematiche sul rinforzo strutturale con  
materiali compositi”**

**“Analysis of structural strengthening with composite  
materials”**

Relatore:

Tesi di Laurea di:

**Chiar.mo**

**Fabio Di Menno Di Bucchianico**

**Prof. Ing. Roberto Capozucca**

ANNO ACCADEMICO 2019/2020



## INDICE

Introduzione .....	1
<b>CAPITOLO 1- Materiali compositi-Fiber Reinforced Polymers (FRP) .....</b>	<b>3</b>
1.1: Introduzione .....	3
1.2: Classificazione dei sistemi di rinforzo .....	4
1.3: Proprietà meccaniche dei sistemi di rinforzo .....	5
1.4: Fasi costituenti gli FRP .....	7
1.5: Requisiti di durabilità.....	14
1.6: Rinforzo strutturale delle murature .....	17
1.7: Normativa di riferimento.....	20
<b>CAPITOLO 2- risultati sperimentali FRP.....</b>	<b>25</b>
2.1: Barre in fibra di carbonio .....	25
2.2: Barre in fibra di vetro.....	26
2.3: Lamina in fibra di carbonio.....	27
2.4: Tessuti in fibra di carbonio .....	27
2.5: Tessuti in fibra di vetro .....	28
2.6: Tessuti in fibra di basalto .....	29
2.7: Tessuti in fili di acciaio .....	31
2.8: Resina epossidica .....	32
2.9: Programma sperimentale.....	32
2.10: Confezionamento provini.....	33

2.11: Strumentazioni .....	39
2.12: Analisi dei risultati .....	40
<b>CAPITOLO 3- Stato limite del C.A.- flessione, pressoflessione e taglio .....</b>	<b>49</b>
3.1: Generalità .....	49
3.2: SLU di sezioni sottoposte a tensioni normali.....	49
3.3: Verifica allo SLU di una sezione inflessa .....	55
3.4: Esercizio-SLU di sezioni a “T” inflesse.....	57
3.5: Progetto dell’armatura per sezione inflessa .....	59
3.6: Ulteriori considerazioni sui campi di deformazione limite.....	60
3.7: Ulteriori considerazioni sul progetto di sezioni inflesse .....	62
3.8: Esercizio: verifica SLU di sezioni in C.A. inflesse.....	64
3.9: Verifica sezione rettangolare (pressoflessione)- asse neutro interno alla sezione .....	66
3.10: Verifica sezione rettangolare (pressoflessione)- asse neutro esterno alla sezione .....	68
3.11: Meccanismi resistenti a taglio .....	68
3.12: Verifica delle armature longitudinali- regola dello scalare.....	71
3.13: Considerazioni generali sul comportamento a taglio di elementi inflessi .....	72
3.14: Meccanismi resistenti a taglio di tipo secondario .....	73
3.15: Meccanismi di rottura .....	79
3.16: Meccanismo resistente principale: il traliccio di Mörsch .....	80
3.17: Considerazioni sul progetto e verifica a taglio – SLU .....	81
<b>CAPITOLO 4- Rinforzi nel C.A. ....</b>	<b>86</b>
4.1: Generalità .....	86
4.2: Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione .....	86

4.3: Verifiche di sicurezza nei confronti della delaminazione .....	87
4.4: Rinforzo a flessione.....	90
4.5: Rinforzo a taglio.....	100
4.6: Rinforzo a torsione.....	102
4.7: Confinamento.....	104
Bibliografia.....	108



# Introduzione

---

L'impiego dei materiali compositi sta trovando una sempre più ampia diffusione in ambito edilizio, in particolare nel campo del consolidamento strutturale e dell'adeguamento sismico, alla luce dell'incremento della capacità portante che si può ricavare senza l'apporto di nuove masse strutturali. Comunemente denominati FRP, acronimo di Fiber Reinforced Polymers, si tratta di matrici polimeriche e fibre lunghe continue di carbonio, vetro o arammide, che presentano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino a rottura.

Tra i vantaggi che possono offrire vi sono la celerità dell'intervento, nonché l'immediata adattabilità del rinforzo alle strutture. Questi sistemi possono essere utilmente impiegati per il consolidamento di strutture varie, quali telai in cemento armato, in acciaio, strutture murarie, strutture in legno. Una struttura in composito può arrivare ad avere un peso dimezzato rispetto ad un'altra realizzata mediante materiali tradizionali e una resistenza superiore di circa 4 volte.

Sono stati esaminati i risultati sperimentali delle prove a trazione monoassiale per: barre in fibra di carbonio e di vetro; laminati in fibra di carbonio; tessuti in fibra di carbonio, fibra di vetro e di basalto; fili di acciaio. Si troverà così, la modalità di rottura, il comportamento meccanico e la determinazione delle proprietà meccaniche. Si ha una distinzione della tipologia e una descrizione del confezionamento del provino in esame.

Basandosi sul comportamento delle strutture in c.a. sottoposte a sollecitazione di flessione, taglio, compressione e torsione considerando il loro comportamento allo stato limite ultimo (SLU). Ovvero i campi limite, il metodo dello stress block per il calcolo del momento resistente, il calcolo dell'armatura tesa e compressa poi la verifica di una sezione pressoinflessa. Sono stati studiati i meccanismi resistenti a taglio ovvero: meccanismo arco-tirante, effetto del corrente compresso, effetto biella-spinotto, effetto ingranamento, effetto pettine. Esaminando così anche i meccanismi di rottura per taglio interno o per taglio flessione. Viene indicato inoltre il metodo per il progetto e la verifica delle armature a taglio.

Vengono riportate le indicazioni delle norme CNR riguardanti il rinforzo nel c.a. con materiali compositi, sia per quanto riguarda la progettazione e sia per la verifica di elementi rinforzati a flessione, taglio, torsione e confinamento.



# CAP 1. Materiali compositi-Fiber Reinforced Polymers (FRP)

---

## 1.1 Introduzione

La tecnica di rinforzo con materiali FRP (Fiber Reinforced Polymers) di strutture esistenti è diventata, nel corso degli anni, una soluzione tecnologica sempre più accettata e che diventa particolarmente rilevante se si va a considerare il panorama italiano: la maggior parte del patrimonio edilizio esistente infatti, circa il 65%, è stato realizzato prima del 1976.

Risultano quindi necessari interventi atti non solo a garantire il normale funzionamento degli edifici ma anche volti a tutelarne la sicurezza e l'integrità nei confronti di azioni sismiche, considerando come circa il 44% dell'edificato esistente non rispetta i requisiti minimi di sicurezza indicati dalle norme tecniche.

L'intervento con materiali FRP permette di attivare i meccanismi resistenti della muratura, permettendole di dissipare parte dell'energia sismica mentre le fibre entrano in gioco quando ormai la muratura si è già fessurata, permettendo al sistema di raggiungere una resistenza più elevata ed una duttilità maggiore, fondamentale per garantire un adeguato livello di sicurezza degli edifici esistenti in muratura.

Nei prossimi capitoli si andranno a specificare le caratteristiche fondamentali dei materiali FRP, in particolare delle GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers).

I materiali FRP (Fiber Reinforced Polymers) sono materiali compositi costituiti da matrici polimeriche e da fibre lunghe continue di carbonio, vetro o arammide (più propriamente CFRP nel caso delle fibre di carbonio, GFRP nel caso delle fibre di vetro, AFRP in quello delle fibre di arammide).

Oltre alle ormai consolidate applicazioni nel campo dell'ingegneria aeronautica, navale e meccanica, hanno trovato largo impiego nella riabilitazione e nel consolidamento di

strutture civili grazie ai vantaggi che sono in grado di offrire: leggerezza, elevate proprietà meccaniche, caratteristiche anticorrosive.

I compositi per il rinforzo strutturale sono disponibili in diverse geometrie: dalle lamine pultruse, caratterizzate da una disposizione unidirezionale delle fibre ed utilizzate principalmente per placcare superfici regolari, ai tessuti bidirezionali, facilmente adattabili alla forma dell'elemento strutturale.

Dal punto di vista costitutivo tutti i materiali compositi FRP hanno un comportamento anisotropo ed eterogeneo, ma mostrano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino al collasso.

Gli FRP risultano competitivi in tutti quei casi in cui sia necessario limitare l'impatto estetico sulla struttura originaria o garantire un'adeguata reversibilità dell'intervento (in caso di edifici di interesse storico o artistico), oppure quando la limitatezza dello spazio a disposizione renderebbe difficile il ricorso a tecniche tradizionali.

Esistono sul mercato anche altri tipi di materiali compositi, differenti per la natura della matrice (matrice inorganica) o delle fibre (fibre discontinue o continue ma costituite da materiali differenti, come ad esempio l'acciaio o il basalto). Tali compositi si sono rivelati particolarmente promettenti per specifiche applicazioni.

## **1.2 Classificazione dei sistemi di rinforzo**

- Sistemi preformati: costituiti da componenti di forme differenti (lamine, nastri, barre ecc.) preparati in stabilimento, tramite pultrusione o altri processi simili, ed incollati all'elemento strutturale da rinforzare;
- Sistemi impregnati in situ: costituiti da fogli o tessuti di fibre uni o multi-direzionali impregnato con una resina che può svolgere la funzione di adesivo con la superficie interessata (calcestruzzo, muratura, ecc.);
- Sistemi pre-impregnati: costituiti da fogli o tessuti di fibre uni o multi-direzionali pre-impregnati con resina ed incollati alla superficie da rinforzare con (o senza) resine aggiuntive.

### 1.3 Proprietà meccaniche dei sistemi di rinforzo

Nei compositi fibrorinforzati le fibre svolgono il ruolo di elementi portanti sia in termini di resistenza che di rigidezza.

La matrice, oltre a proteggere le fibre dall'usura e assicurare un loro buon allineamento, permette di trasferire gli sforzi tra fibra e fibra ed eventualmente tra queste e l'elemento strutturale da rinforzare. Nella maggioranza dei casi le fibre sono caratterizzate da resistenza e rigidezza elevate, ma con valori della deformazione a rottura inferiori a quelli della matrice.

In Figura 1.1 sono rappresentati qualitativamente i legami costitutivi di un materiale fibrorinforzato e dei suoi elementi costituenti: matrice e fibre.

È possibile vedere come il materiale composito esibisce rispetto alle fibre una rigidezza inferiore ma la medesima deformazione a rottura,  $\epsilon_{\text{fib,max}}$ . Infatti una volta superata tale deformazione, diviene impossibile il trasferimento degli sforzi dalla matrice alle fibre.

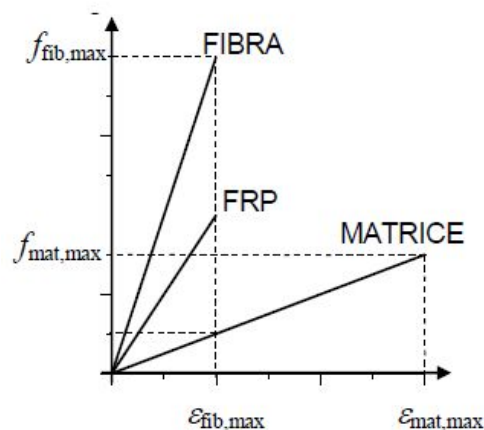


Figura 1.1- Legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito

Nel caso di compositi di tipo unidirezionale è possibile, con ragionevole approssimazione, stimare il loro comportamento meccanico mediante modelli micromeccanici; ad esempio, utilizzando la regola delle miscele.

Essa deriva dall'applicazione di un semplice modello micromeccanico (Slab Model) in cui le fibre e la matrice "lavorano" in parallelo. Il modello fornisce con ottima

approssimazione il valore del modulo di elasticità normale in direzione delle fibre e quello del coefficiente di Poisson:

$$E_f = V_{fib} \cdot E_{fib} + (1 - V_{fib}) \cdot E_{mat} \quad (1.1)$$

$$f_f = V_{fib} \cdot f_{fib} + (1 - V_{fib}) \cdot f_{mat} \quad (1.2)$$

dove  $V_{fib}$  è la frazione volumetrica delle fibre (rapporto tra il volume delle fibre ed il volume totale del composito),  $E_{mat}$  e  $f_{mat}$  sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale e la tensione di rottura della matrice, mentre  $f_f$  e  $f_{fib}$  sono, rispettivamente, la tensione di rottura del materiale FRP e la tensione di rottura della fibra.

La regola delle miscele, basata sull'ipotesi di perfetta aderenza tra fibre e matrice, fornisce una stima abbastanza accurata del modulo di elasticità normale ma non altrettanto affidabile della resistenza.

Dal punto di vista meccanico, i suddetti sistemi sono classificati in base ai valori del modulo elastico e della tensione di rottura. Tali grandezze, valutate in regime di trazione uniassiale nella direzione delle fibre, devono essere riferite, nel caso dei sistemi di rinforzo preformati, all'unità di superficie complessiva del composito FRP (fibre e matrice); nel caso invece dei sistemi realizzati in situ, all'area delle sole fibre secche del composito. I valori del modulo elastico e della resistenza a trazione devono risultare opportunamente stabili nei confronti del degrado indotto sul composito FRP da azioni ambientali.

### **Comportamento a trazione**

Nel caso di sollecitazioni di trazione pura, i materiali in FRP non mostrano alcun comportamento plastico (snervamento) prima della rottura. Il comportamento a trazione dei materiali composti da un solo tipo di fibra è caratterizzato da una relazione tensione-deformazione di tipo elastico-lineare fino a rottura, che avviene in maniera improvvisa e con modalità che potrebbero essere catastrofiche.

La resistenza a trazione e la rigidità di un materiale in FRP dipendono da diversi fattori. Poiché le fibre in un composito rappresentano il costituente che porta la maggior parte del carico, il tipo, l'orientazione e la quantità di esse ne governano le proprietà

meccaniche. A causa del ruolo primario delle fibre, le proprietà di un sistema di rinforzo sono a volte riportate con riferimento all'area netta delle fibre.

### **Comportamento a compressione**

I sistemi in FRP non dovrebbero essere utilizzati come rinforzo a compressione a causa della mancanza di sufficienti prove sperimentali che ne confermino la validità in questo tipo di applicazioni. Alcune prove sperimentali su lamine in FRP per il rinforzo di elementi in calcestruzzo hanno mostrato che la resistenza a compressione è minore di quella a trazione. Le modalità di rottura di lamine in FRP sollecitate a compressione longitudinale comprendono la crisi per trazione in direzione trasversale, micro instabilità delle fibre o crisi per taglio. La modalità di rottura dipende dal tipo di fibre, dalla percentuale volumetrica delle fibre e dal tipo di resina.

### **1.4 Fasi costituenti gli FRP e loro caratteristiche fisico-meccaniche**

In generale i materiali compositi soddisfano i seguenti requisiti:

- Sono costituiti da due o più materiali (fasi) di natura diversa e macroscopicamente distinguibili;
- Almeno due delle fasi presentano proprietà fisiche e meccaniche sufficientemente diverse tra loro, in modo da impartire al composito delle proprietà differenti da quelle costituenti.

I compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) soddisfano entrambe le suddette caratteristiche: sono costituiti da una matrice polimerica di natura organica e da fibre di rinforzo, le cui principali proprietà sono quantificabili attraverso i valori riportati (Tabella 1.1)

Tabella 1.1-Proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni rispetto all'acciaio da costruzione

	Modulo di elasticità normale $E$	Resistenza a trazione $\sigma_T$	Deformazione a rottura $\epsilon_T$	Coefficiente di dilatazione termica $\alpha$	Densità $\rho$
	[GPa]	[MPa]	[%]	[ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	[ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
Fibre di vetro E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Fibre di vetro S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44 – 1.47
Matrice polimerica	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25
Acciaio da costruzione	206	250 – 400 (snervamento) 350 – 600 (rottura)	20 – 30	10.4	7.8

Generalmente i materiali compositi sono costituiti da una fase continua, detta matrice, in cui è dispersa una fase discontinua, il rinforzo (a volte si può ritrovare nel composito una interfase, costituita dall'interfaccia tra rinforzo e matrice e dei filler, ossia riempitivi che riducono il contenuto di matrice) come è possibile vedere in Figura 1.2.

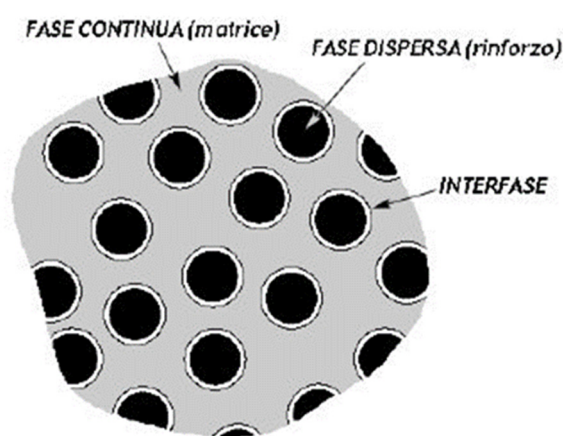


Figura 1.2-Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito

Contribuiscono a definire un materiale FRP:

- La geometria: forma, dimensioni e distribuzione delle dimensioni;
- La disposizione: orientazione delle fibre rispetto agli assi di simmetria del materiale; se essa è casuale (nel piano o nello spazio) il composito risulta avere caratteristiche simili a quelle di un materiale isotropo (“quasi-isotropo”); in tutti gli altri casi il composito è anisotropo;
- La concentrazione: frazione in volume, distribuzione della concentrazione (dispersione).

Un composito è quindi un continuo non omogeneo e, nella maggior parte dei casi, anisotropo.

È conveniente, ai fini dell’esame delle loro proprietà, distinguere i compositi fibrorinforzati in due categorie principali, indipendentemente dalla tecnologia di produzione:

- Monostrato (lamina);
- Multistrato (laminati).

I laminati sono materiali costituiti da strati di qualche decimo di millimetro di spessore (detti lamine) sovrapposti tra loro. Nel caso più semplice, le fibre sono contenute esclusivamente nel piano della lamina (non sono presenti fibre disposte perpendicolarmente a tale piano).

Le dimensioni dei laminati sono intermedie fra quelle delle fibre di rinforzo e quelle delle strutture di interesse ingegneristico.

Esiste anche una particolare classe di compositi multistrato, detti laminati ibridi, in cui le singole lamine sono composte da fibre di natura differente (ad es. compositi a matrice epossidica con fibre sia di carbonio che aramidiche per ottenere un composito rigido e tenace) o da materiali differenti (ad es. i compositi a strati alternati di resina epossidica con fibre aramidiche e di alluminio).

Il principale vantaggio dei laminati è rappresentato dalla massima libertà nella disposizione delle fibre, pur essendo ovviamente richiesto un controllo sistematico sulle scelte operate e quindi sulle proprietà del materiale composito.

### **Fibre dei compositi FRP**

Le fibre più usate per la realizzazione di compositi FRP sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche. La geometria filiforme di questi elementi offre non solo una grande versatilità per la realizzazione dei compositi ma conferisce a questi materiali caratteristiche di rigidità e resistenza molto più elevate di quelle possedute dagli stessi materiali quando siano usati in configurazione tridimensionale: ciò è dovuto ad una minore densità di difetti che compete tipicamente alla configurazione monodimensionale.

Le fibre sono disponibili in varie forme di cui le più comuni sono (Figura 1.3):

- Filamento (monofilament): elemento base di circa 10  $\mu\text{m}$  di diametro;
- Cavo di filatura (tow): fascio formato da un gran numero di filamenti destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- Filo o filato (spun yarn): filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- Filo assemblato (roving): fascio contribuito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

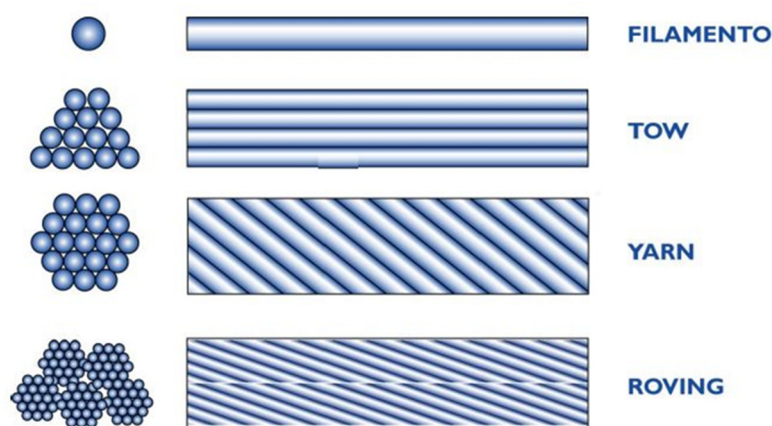


Figura 1.3-Tipologie di fibre



Oltre che in forma di yarn o roving, le fibre sono disponibili commercialmente in differenti composizioni, garantendo una grande varietà di tessuti (fabric). In tal caso la disposizione delle fibre può essere tale da garantire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Nei tessuti si distingue una direzione principale, detta ordito (warp), ed una trasversale ortogonale alla precedente detta trama (weft).

### **Fibre di vetro**

Nel corso di questa sperimentazione sono state utilizzate principalmente le fibre di vetro: sono fibre comunemente usate in campo navale ed industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte che si caratterizzano per la loro elevata resistenza.

Il vetro è composto principalmente da silice ( $\text{SiO}_2$ ) in struttura tetraedrica ( $\text{SiO}_4$ ). Sono aggiunti in varie proporzioni ossidi di alluminio ed altri ioni metallici per facilitare le operazioni di lavorazione o per modificare alcune proprietà (ad esempio le fibre di vetro S rispetto alle E esibiscono una resistenza a trazione più elevata, come mostrato in Tabella 1.2).

Tabella 1.2- Composizione tipica delle fibre di vetro (% in peso)

	VETRO E	VETRO S
Ossido di silicio	54.3	64.20
Ossido di alluminio	15.2	24.80
Ossido di ferro	-	0.21
Ossido di calcio	17.2	0.01
Ossido di magnesio	4.7	10.27
Ossido di sodio	0.6	0.27
Ossido di boro	8.0	0.01
Ossido di bario	-	0.20
Varie	-	0.03

Nelle sue linee essenziali la tecnologia di produzione delle fibre di vetro è basata sulla filatura di una miscela (batch) costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare. I componenti sono miscelati a secco e portati a fusione (circa  $1260\text{ }^\circ\text{C}$ ) in una fornace a refrattari (tank). Il vetro fuso viene alimentato direttamente su filiere di platino (bushings) e fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo.

I filamenti, prodotti per filatura da fuso, sono quindi raggruppati, con l'imposizione eventuale di una leggera torsione, a formare una treccia o fibra (strand o end), tipicamente costituita da 204 filamenti. I singoli filamenti presentano un diametro medio dell'ordine

dei 10  $\mu\text{m}$  e sono ricoperti da un legante o bozzima (binder o size). I filati sono raccolti, perlopiù senza ritorcitura, in roving. I valori della massa lineare tipici del roving per applicazioni nel settore civile sono superiori a 2000 Tex.

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di fogli sottili, denominati mat (Figura 1.4). Un mat può essere costituito sia da fibre lunghe continue che da fibre corte (cioè fibre discontinue di lunghezza tipica compresa tra 25 e 50 mm) disposte casualmente nel piano e tenute assieme da un legante chimico. La larghezza dei mat è variabile tra 5 cm e 2 m; la loro densità di massa è dell'ordine di 0.5 kg/m<sup>2</sup>.

Le fibre di vetro esibiscono un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio o a quello delle fibre aramidiche (circa 70 GPa per le fibre di vetro E) ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Inoltre, esse presentano una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica. Per promuovere l'adesione tra fibre e matrice e per proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dall'umidità, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio (sizing) con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Tali trattamenti sono molto utili ai fini della durabilità e della resistenza a fatica (statica e dinamica) del materiale composito.

Gli FRP a base di fibre di vetro si denotano usualmente con l'acronimo GFRP.

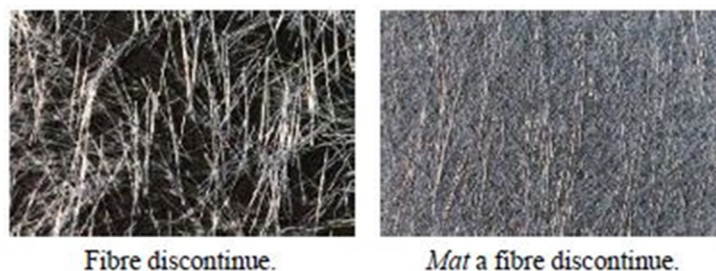


Figura 1.4- Mat in fibra di vetro

### **Matrici dei compositi FRP**

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente. Per

miscelazione con un opportuno reagente esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso; la reazione può essere accelerata agendo sulla temperatura.

I vantaggi da esse presentati sono diversi:

- Bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre;
- Ottime proprietà adesive;
- Possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente;
- Buona resistenza agli agenti chimici;
- Assenza di una temperatura di fusione.

I principali svantaggi invece sono:

- Ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa;
- Modesta tenacità a frattura (comportamento “fragile”);
- Sensibilità all’umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche. Vengono anche impiegate resine poliestere o vinilestere.

### **Adesivi**

La messa in opera di alcuni tipi di rinforzo strutturale a base di FRP richiede l’utilizzo di adesivi. La scelta di adesivo più appropriata dell’adesivo e del tipo di trattamento superficiale da effettuare prima dell’applicazione va fatta in base alla natura del substrato della struttura da riparare e del materiale di rinforzo.

Le schede tecniche dei materiali da rinforzo riportano solitamente indicazioni sul tipo di adesivo da utilizzare in funzione della natura della struttura che si intende rinforzare.

Molto importante, per il corretto utilizzo degli adesivi, è il tipo di trattamento superficiale da eseguire prima della loro applicazione, per garantire il miglior contatto possibile con la superficie sottoposta ad intervento di rinforzo.

Esistono molte tipologie di adesivi naturali e sintetici: i più adatti per i materiali compositi sono adesivi a base di resine epossidiche. Gli adesivi epossidici si presentano come una miscela viscosa bicomponente ed una volta induriti a seguito di reazioni chimiche realizzano il collegamento strutturale.

### **1.5 Requisiti di durabilità**

Il progetto del sistema di rinforzo deve assicurare la durabilità dell'efficacia dell'intervento proposto nel corso della vita utile della struttura rinforzata, anche in relazione al degrado atteso.

Per assicurare durabilità all'intervallo di rinforzo vanno tenuti in debito conto:

- La destinazione d'uso della struttura rinforzata;
- Le condizioni ambientali attese e le modalità di applicazione dei carichi;
- La composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali preesistenti e degli FRP, nonché dei prodotti utilizzati per la messa in opera di questi ultimi;
- La scelta della configurazione del rinforzo, delle modalità di applicazione e dei particolari costruttivi;
- La qualità delle maestranze ed il livello di controllo;
- L'adozione di particolari misure protettive, ad esempio nei confronti di temperature elevate ed umidità;
- La manutenzione attesa durante la vita utile.

Problemi speciali di progetto (azioni ambientali, modalità di carico, ecc.) devono essere identificati nella fase di progettazione così che se ne possa valutare l'importanza in relazione agli aspetti di durabilità del rinforzo. Quando non siano disponibili spunti normativi per lo specifico problema in esame, il livello di qualsiasi tipo di degrado a carico del rinforzo deve essere stimato in maniera accurata. La stima può essere eseguita sulla base di modelli teorici, indagini sperimentali, esperienze dedotte da interventi precedenti.

Volendo definire quali sono i principali fattori che possono influenzare la durabilità dei materiali fibrorinforzati, abbiamo:

- Fattori ambientali;
- Fattori di carico.

## **Fattori ambientali**

L'esposizione alle condizioni ambientali, la durata dell'esposizione, il tipo e la formulazione delle resine, il tipo di fibre ed i metodi usati per la loro polimerizzazione sono solo alcuni dei fattori che influenzano l'entità del degrado riscontrabile nelle proprietà meccaniche.

È possibile ridurre gli effetti dell'esposizione ambientale, proteggendo adeguatamente l'elemento fibrorinforzato, ad esempio incrementando lo stato di resina in cui è annegato o applicando uno strato esterno di materiale protettivo, in base alla morfologia dell'elemento fibrorinforzato ed il suo sistema di applicazione sull'elemento strutturale. Tra i principali tipi di esposizione ambientale alla quale possono essere sottoposti i compositi vengono individuati i seguenti:

- Ambiente alcalino: problemi possono insorgere nell'interfaccia calcestruzzo / resina, a causa dell'acqua contenuta nel calcestruzzo. Per questo è bene che il processo di reticolazione della resina sia terminato prima di esporla in un ambiente alcalino. In tal senso si ottengono migliori prestazioni utilizzando resine epossidiche;
- Umidità: è buona norma che resine ed adesivi non siano utilizzati su superfici umide o bagnate a meno che non siano appositamente formulati. I sistemi in FRP non devono essere applicati su superfici in calcestruzzo sulle quali si può avere trasmissione di vapore acqueo. Il passaggio di vapore attraverso la superficie del calcestruzzo e lo strato di resina non ancora indurito causa la formazione di bolle d'aria che compromettono l'aderenza del sistema di rinforzo al supporto. L'assorbimento di umidità dipende dal tipo di resina, dalla composizione e qualità delle lamine, dallo spessore, dalle condizioni di maturazione, dall'interfaccia resina-fibra e dalle condizioni di lavorazione. Può causare effetti di plasticizzazione, riduzione della temperatura di transizione vetrosa, riduzione di resistenza e riduzione di rigidità;
- Temperature estreme e di cicli termici: l'esposizione ad alte temperature manifesta i suoi effetti nella diminuzione progressiva del modulo elastico della resina e nel distacco tra rinforzo e substrato. In quanto la risposta delle resine è influenzata dalla temperatura di transizione vetrosa, che rappresenta il limite tra il comportamento fragile e quello gommoso. È bene quindi che nella fase di scelta delle resine, sia valutata la temperatura di esercizio ed in funzione di questa applicare un fibrorinforzato con una resina la cui temperatura di transizione vetrosa sia superiore

o in alternativa provvedere con rivestimenti protettivi. Per quanto riguarda i cicli termici, manifestano i suoi effetti (microfratture) quasi esclusivamente nei confronti di resine ad alto modulo;

- Cicli di gelo e disgelo: per quanto riguarda le fibre, queste alle basse temperature reagiscono con un miglioramento delle loro prestazioni meccaniche, mentre il problema può manifestarsi all'interfaccia tra fibre e resina, in quanto si possono creare distacchi reciproci. Inoltre la variazione delle temperature può avere come conseguenza la creazione di umidità: si verrebbe così a creare un ambiente alcalino, con l'insorgere di possibili microfratture;
- Raramente le radiazioni UV degradano le prestazioni meccaniche dei sistemi di rinforzo con materiali FRP, nonostante che alcune resine possano accusare, per effetto delle radiazioni, fragilizzazioni ed erosioni superficiali. In generale, l'effetto più deleterio legato all'esposizione UV è la penetrazione di umidità e di altri agenti aggressivi attraverso la superficie danneggiata;
- Una protezione nei riguardi delle radiazioni UV può essere ottenuta con l'aggiunta di appropriati additivi nella resina e/o con l'uso di opportuni rivestimenti.

### **Fattori di carico**

Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) di alcuni materiali FRP degradano per effetto di fenomeni di creep e di fatica.

I principali fattori di carico che vengono considerati sono i seguenti:

- Viscosità e rilassamento: materiali in FRP soggetti ad un carico costante nel tempo possono improvvisamente rompersi dopo un periodo di tempo definito come tempo di permanenza sotto carico. Questo tipo di rottura è nota come rottura per creep. Al crescere del rapporto tra la tensione di trazione presente nel materiale e la resistenza a breve termine della lamina in FRP, la vita della lamina sotto carico decresce. Il tempo di permanenza sotto carico (endurance limit) decresce anche in presenza, come abbiamo visto, di condizioni ambientali sfavorevoli.

La resistenza e la deformazione a lungo termine dei materiali FRP dipendono dalle proprietà delle resine e delle fibre di rinforzo. In genere le resine termoindurenti (poliesteri insaturi, esteri vinili, resine epossidiche e fenoliche) sono meno viscosi di quelle termoplastiche (polipropilene, nylon, policarbonati, ecc.). Poiché la presenza di fibre contrasta la viscosità delle resine, i suddetti fenomeni sono più pronunciati in

presenza di carichi applicati trasversalmente alle fibre, ovvero di compositi caratterizzati da una bassa percentuale in volume di fibre.

L'entità delle deformazioni differite per carichi a lungo termine può essere ridotta limitando opportunamente le tensioni di esercizio nel composito. I materiali CFRP sono meno suscettibili di rotture per carichi di lunga durata rispetto ai materiali AFRP o GFRP;

- Fatica: le prestazioni dei materiali FRP in condizioni di fatica sono generalmente soddisfacenti. Esse dipendono dalla composizione della matrice e, marginalmente, dal tipo di fibre. Queste ultime contrastano infatti in modo efficace la formazione di fessure e ne ostacolano la propagazione. Fra tutti i tipi di compositi in FRP utilizzati per applicazioni per le infrastrutture, i materiali in CFRP sono i meno soggetti a crisi per fatica.

## **1.6 Rinforzo strutturale delle murature**

I sistemi di rinforzo FRP vengono impiegati anche per il consolidamento di strutture murarie, con lo scopo di conseguire, prioritariamente, per i singoli elementi strutturali e per l'intera costruzione un incremento di resistenza nei confronti delle azioni sollecitanti e, quando possibile, un aumento dei valori degli spostamenti esibiti all'atto del collasso.

Gli interventi di rinforzo consistono prevalentemente nell'applicazione di sistemi FRP sugli elementi strutturali della costruzione per adesione o mediante di dispositivi meccanici di ancoraggio.

L'applicazione può avvenire sulle superfici esterne della muratura (paramenti murari) o in alloggiamenti e scanalature realizzate all'interno della muratura stessa.

Sollecitazioni cicliche di trazione e compressione, quali quelle causate da eventi sismici possono deteriorare notevolmente l'adesione muratura-FRP; a tal riguardo può essere opportuno inserire il rinforzo in intagli realizzati sulla superficie della muratura per prevenire eventuali fenomeni di instabilità, oppure si può ricorrere all'uso di dispositivi meccanici di connessione.

Le finalità che possono essere raggiunte sono le seguenti:

- Incremento della resistenza di pannelli, archi e volte;

- confinamento di colonne al fine di incrementarne la resistenza a compressione e la duttilità;
- Collegamento tra elementi che collaborano a resistere all'azione esterna (connessioni tra parete ortogonali);
- Trasformazione di elementi non strutturali in elementi strutturali, tramite conferimento di rigidità e resistenza;
- Limitazione dell'apertura di fessure.

I sistemi di rinforzo FRP possono essere utilmente impiegati in zona sismica per intervenire su strutture non soddisfacenti i requisiti di sicurezza nei confronti di uno o più SLU.

La scelta del tipo e dell'estensione dell'intervento con FRP deriva da un'attenta valutazione della sicurezza sismica della costruzione, tenendo conto degli aspetti sotto elencati:

- Murature di qualità insufficiente a sopportare le azioni verticali e orizzontali a cui sono sottoposte vanno adeguatamente consolidate o sostituite;
- Pareti confluenti in martelli murari o in spigoli devono essere opportunamente collegate;
- Collegamenti inadeguati tra solai e pareti o tra copertura e pareti devono essere resi efficaci;
- Spinte di coperture, archi e volte devono essere assorbite da idonei elementi strutturali;
- I solai devono assicurare, mediante collegamento alle pareti verticali ed irrigidimento, anche limitato, nel proprio piano, il trasferimento delle competenti azioni orizzontali alle pareti disposte nella direzione del sisma e costituire un vincolo per le pareti sollecitate da azioni ortogonali al proprio piano;
- Elementi a forte vulnerabilità, sui quali non sia possibile intervenire, vanno di regola eliminati;
- Interventi con FRP non possono di regola correggere, in un edificio, situazioni sfavorevoli derivanti da forti irregolarità (in termini di resistenza e/o rigidità), anche se possono, applicati solamente su un ridotto numero di elementi, conferire ad esso una maggiore regolarità in resistenza;



- Interventi con FRP volti a migliorare la duttilità locale (cerchiatura di pilastri) sono sempre opportuni;
- L'introduzione di rinforzi locali con FRP non deve ridurre la duttilità globale della struttura.

Le tecnologie più utilizzate per il recupero sono:

- Manual lay up: è la tecnologia più diffusa, consiste nell'impregnare tessuti secchi unidirezionali o pluridirezionali direttamente in opera utilizzando resine epossidiche che hanno la funzione sia di matrice che di adesivo al substrato strutturale. Questa tecnologia può essere secondo due metodologie:
  1. Dry lay up: adatto per lavori ridotti, consiste essenzialmente in una prima fase in cui viene steso con un pennello o un rullo sul supporto in calcestruzzo un primer epossidico molto fluido che crea le migliori condizioni per l'adesione del tessuto, successivamente si applica il primo strato di tessuto con le fibre allineate lungo la direzione voluta e in fine si impregna il tessuto mediante una resina epossidica fluida applicata anche questa con rullo o pennello. Con la stessa sequenza si applicano i successivi strati;
  2. Wet lay up: più idoneo all'esecuzione di lavori su grandi superfici, rispetto al metodo precedente, subito dopo aver steso il primer si applica il tessuto preventivamente tagliato nella misura desiderata e immerso direttamente in una vaschetta contenente la resina epossidica fluida;
- Plate bonding: consiste nell'incollaggio strutturale con resine epossidiche di lamine pultruse (generalmente di forma rettangolare) direttamente sul substrato, opportunamente livellato, delle membrature in calcestruzzo armato normale o precompresso da consolidare. Questo metodo si basa sul più classico beton plaque in cui le lamine utilizzate sono in acciaio (incollate e/o bullonate);
- Near surface mounted bars (NSM): consiste nell'applicazione di barre in FRP o laminati pultrusi all'interno di apposite scanalature tracciate sull'elemento strutturale (in genere nell'intradosso di travi) e riempite di resina, permettendo così di mascherare l'intervento di rinforzo.

È però importante sottolineare il fatto che risultano validi gli interventi di rinforzo in cui il composito è soggetto a sforzi di trazione. Infatti, i sistemi di rinforzo FRP soggetti a compressione non sono, di solito, in grado di incrementare le prestazioni delle murature.

Inoltre, questa tipologia di interventi può essere soggetta a distacchi dal supporto, per fenomeni di instabilità locale.

In presenza di muratura danneggiata, disomogenea o viziata da qualsiasi difetto che precluda la corretta trasmissione degli sforzi all'interfaccia muratura-FRP, si deve procedere preventivamente al consolidamento del supporto secondo tecniche tradizionali.

Gli interventi di rinforzo con FRP inoltre non devono di norma interessare estese superfici del paramento murario a causa della completa assenza di traspirabilità dei materiali compositi, nonché per minimizzare l'impatto estetico dell'intervento sulla muratura.

### **1.7 Normativa di riferimento**

A più di cinque anni dall'approvazione della prima versione delle Istruzioni CNR-DT 200/2004, la Commissione di studio del CNR per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni si è fatta promotrice di una revisione del documento. A tal scopo si è avvalsa dell'opera dell'originario Gruppo di studio, cui è stato affidato il compito di aggiornare il documento alla luce dei risultati delle più recenti ricerche, sia teoriche che sperimentali, condotte a livello internazionale nell'ultimo quinquennio.

Ulteriori documenti di riferimento per la realizzazione di queste norme sono stati rispettivamente:

- La "Guida per il Progetto e la Costruzione di Strutture in Cemento Armato Rinforzate Esternamente con Sistemi in FRP", documento a cura del Comitato 440 dell'ACI (American Concrete Institute) del 2008;
- Il Manuale di Progetto n° 4 "Ripristino con FRP di Strutture in Cemento Armato Rinforzate" dell'ISIS Canadian Corporation del 2008.

Appare evidente come la redazione di un documento italiano di Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati (FRP), non fosse più rinviabile: soprattutto, quella di un documento di respiro ampio utilizzabile per le diverse tipologie presenti nel patrimonio edilizio nazionale, dalle costruzioni di c.a. e di c.a.p. a quelle murarie, dalle costruzioni di legno a quelle metalliche.

Ciò è anche dovuto al fatto che l'interesse scientifico verso le applicazioni con FRP per la riabilitazione strutturale, da un lato, e la peculiarità del patrimonio edilizio italiano, dall'altro, hanno attirato l'interesse di numerosi ricercatori e professionisti, che hanno dato vita ad una serie di programmi scientifici che hanno meritato il finanziamento dei più importanti enti di ricerca italiani.

Lo scopo delle Istruzioni è quello di fornire, nell'ambito delle Norme attualmente vigenti, un documento orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento strutturale mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.

## FIDGLASS UNIDIR 300 HS73®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI VETRO PER IL RINFORZO STRUTTURALE



**FIDIA** srl  
Technical Global Services

### MODALITA' DI APPLICAZIONE

#### *Preparazione del sottofondo*

Pulire il substrato, tramite spazzolatura o sabbatura, da polveri, grassi e parti incoerenti. Pulire le armature da eventuali tracce di ruggine e sigillare possibili fessurazioni mediante iniezioni.

#### *Rasatura della superficie*

Eeguire la rasatura della superficie sino a 1 cm al fine di eliminare eventuali asperità e materiali incoerenti.

#### *Applicazione di primer*

Stendere sulla superficie, a pennello o a rullo, uno strato di primer ed attendere la sua maturazione per circa 2/3 ore. Livellare la superficie mediante stucco epossidico (putty).

#### *Stesura resina primo strato*

Dopo un'ulteriore lisciatura della superficie, applicare una prima mano di resina adesivo-impregnante.

#### *Stesura del tessuto*

Assicurandosi che lo strato sia ancora "fresco", applicare il tessuto prestando attenzione a non formare grinze, spianandolo manualmente oppure passando il rullo che elimina le eventuali bolle d'aria.

#### *Impregnazione del tessuto*

Manualmente o per mezzo di una macchina, impregnare il tessuto precedentemente tagliato nelle dimensioni richieste.

#### *Finitura*

Applicare una seconda mano di resina e terminare con un ulteriore spolvero di sabbia su resina; procedere infine con l'applicazione di una pittura epossidica e poliuretanica per la protezione del sistema di rinforzo.

### NOTE LEGALI

I consigli tecnici che FIDIA S.r.l. Technical Global Services fornisce, verbalmente o per iscritto come assistenza al cliente o all'applicatore in base alle sue esperienze, corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono impegnativi e non dimostrano alcuna relazione legale contrattuale né obbligo accessorio col contratto di compravendita. Essi non dispensano l'acquirente dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto concerne la loro idoneità relativamente all'uso previsto. Per il resto sono valide le nostre condizioni commerciali. Diffornità dall'originale predetto per contenuto e/o utilizzo non implicherà alcuna responsabilità da parte dell'azienda FIDIA S.r.l. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che la presente scheda e gli **eventuali valori riportati** siano validi per la partita di prodotto di suo interesse e non siano superati in quanto sostituiti da edizioni successive e/o nuove formulazioni del prodotto. Nel dubbio, contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.

#### *Sede centrale e legale:*

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA  
Part. IVA 02740130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

#### *Sedi operative:*

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358  
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: [www.fidiaglobalservice.com](http://www.fidiaglobalservice.com) - E-mail: [info@fidiaglobalservice.com](mailto:info@fidiaglobalservice.com)

Figura 1.5

**Adesivo epossidico bicomponente fluido per incollaggi strutturali mediante iniezione, per ancoraggi verticali o leggermente inclinati. Viene inoltre impiegato per massetti epossidici miscelandolo con Kimifill HM.**

## Descrizione

Kimitech EP-IN è una resina epossidica fluida a due componenti a bassa viscosità, elevata adesione, estremamente bagnante, ideale per impregnare tessuti e nastri di alta grammatura e per penetrare facilmente in fessure e microfessure (fino a 0.3 mm di spessore), con ottime proprietà dielettriche. Viene fornita in due contenitori predosati (A + B), di cui la parte "A" è sovradimensionata per permettere con gli stessi una facile miscelazione.

## Impieghi

Impregnazione di tessuti per il rinforzo strutturale, "Beton-Plaque", iniezioni su strutture lesionate, ancoraggi verticali ed obliqui, getti epossidici caricati con inerti Kimifill (usati per ricostruire parti mancanti di strutture in legno, per realizzare pavimentazioni corazzate in resina e nel ripristino di giunti degradati).

## Capitolati tecnici descrittivi e voci di elenco prezzi

- Ancoraggio di armature su strutture compatte in cemento armato, cotto, pietra, legno, con fori verticali o inclinati verso il basso (SK 3)
- Impermeabilizzazione di opere destinate al contatto con forti aggressivi chimici (SK 13)
- Pavimentazioni corazzate ad alto spessore con resina epossidica (SK 32)
- Recupero di strutture lignee senza alterazioni di forma all'intradosso (SK 57)
- Recupero di travi in legno degradate in corrispondenza dell'appoggio sulla muratura (SK 58)
- Rinforzo strutturale a flessione e taglio di travi, travetti, pilastri e setti, confinamento, consolidamento di orizzontamenti e volte, legatura della scatola muraria previo incollaggio ed impregnazione di tessuti in fibra di carbonio (SK 61)
- Rinforzo strutturale a flessione e taglio di travi, travetti, pilastri e setti, confinamento, consolidamento di orizzontamenti e volte, legatura della scatola muraria previo incollaggio ed impregnazione di tessuti in fibra di vetro (SK 62)
- Ripristino e sigillatura di giunti degradati (SK 31)

## Applicazione

Per la realizzazione dei vari tipi d'intervento consultare i capitolati di riferimento e le schede tecniche dei materiali da utilizzare.

Le superfici da trattare devono essere perfettamente asciutte (calcestruzzi di nuova opera dovranno avere una stagionatura di almeno 4 settimane), prive di parti inconsistenti ed esenti da polvere, grasso, vernici e agenti distaccanti in genere.

Versare il componente "B" (indurente) nel componente "A" (resina) e miscelare con trapano a basso numero di giri (200-300 al minuto) fino ad ottenere un perfetto amalgama, avendo cura di non inglobare aria durante la miscelazione.

Nel caso di miscele frazionate rispettare le proporzioni in peso (e non in volume) indicate sulle confezioni.

## Iniezioni su strutture lesionate

Kimitech EP-IN è una resina epossidica fluida a due componenti a bassa viscosità con adesione strutturale a calcestruzzo, acciaio, legno, materiale lapideo.

Il prodotto è privo di solventi e non presenta ritiri all'atto dell'indurimento, che avviene per reazione chimica dei due componenti.

Kimitech EP-IN è estremamente bagnante, ideale per impregnare tessuti e nastri di alta grammatura e per penetrare facilmente in fessure e microfessure (fino a 0.3 mm di spessore).

Ha ottime proprietà dielettriche, proteggendo quindi le armature dalle correnti vaganti.

## Ancoraggi verticali ed obliqui

Pulitura del foro con aria compressa.

Una volta miscelati i due componenti, se la lunghezza dei fori non supera i 40 cm, colarla per gravità quindi inserire la barra ruotandola su se stessa per permettere la fuoriuscita dal foro della sola resina in eccesso.

Se i fori sono di lunghezza superiore effettuare il loro riempimento mediante iniezione con apposita pistola MM/TL o AC/TL collegata ad un tubicino in plastica che scende ad una profondità di circa la metà del foro, quindi inserire la barra.

Nel caso di ancoraggi su strutture in muratura mista, dove possono verificarsi delle notevoli dispersioni, il prodotto può essere caricato con polvere Kimifill WR4 in modo da renderlo meno fluido.

## Ripristino di parti mancanti e consolidamento di strutture portanti in legno

Nel consolidamento di strutture in legno, miscelare la resina con segatura molto fine, asciutta, per realizzare stuccature in vista, miscelare con quarzo Kimifill HM in rapporto resina-quarzo 1:5 per il ripristino di parti inconsistenti o mancanti (per queste lavorazioni consultare il nostro Ufficio Tecnico).

## Ripristino di pavimentazioni in calcestruzzo e realizzazione di malte spatolabili

Le superfici interessate devono essere perfettamente asciutte (malte e calcestruzzi di nuova opera dovranno avere una stagionatura di almeno 2 settimane), prive di parti inconsistenti ed esenti da polvere, grasso, vernici e agenti distaccanti in genere.

I supporti in calcestruzzo devono essere trattati preliminarmente con una mano di Kimicover FIX o Kimitech PRIMER.

Una volta miscelato la resina con l'indurente, aggiungere il quarzo Kimifill HM con rapporto 1:10, quindi ripristinare le parti di calcestruzzo mancanti oppure realizzare il rivestimento continuo su tutta la pavimentazione.

Ad indurimento avvenuto, effettuare la finitura con resine Kimitech o Kimicover.

## Rinforzi strutturali con sistemi compositi

Una volta preparata la superficie oggetto dell'intervento ed applicato l'adesivo epossidico Kimitech EP-TX o la malta epossidica Kimitech TX 311 (consultare il nostro Ufficio Tecnico), stendere il tessuto e, con apposito rullo metallico, effettuare una leggera pressione sul tessuto stesso per favorire l'adesione all'adesivo e per evitare la formazione di pericolose bolle d'aria. Applicare Kimitech EP-IN a pennello sul tessuto in più mani per favorire la totale impregnazione del tessuto stesso. Tutte queste operazioni verranno effettuate fresco su fresco. Nel caso in cui bisogna effettuare più strati di rinforzo oppure si necessita di una protezione dello stesso, consultare il nostro Ufficio Tecnico.

Figura 1.6

**Adeguamento strutturale mediante la tecnica del "Béton-Plaqué"**

Sabbiare sia le superfici in calcestruzzo che in acciaio interessate all'incollaggio per eliminare rispettivamente lattime di cemento e scorie residue da estrusione. I supporti in calcestruzzo devono essere trattati preliminarmente con una mano di Kimicover FIX o Kimitech PRIMER. Miscelare accuratamente la resina e, in dipendenza della viscosità o consistenza richiesta, utilizzarla tal quale o additivata con inerti Kimifill.

Caratteristiche	Valore tipico
Numero di componenti	2 (A+B)
Densità (A+B) UNI EN ISO 2811-1	1,08 g/cm <sup>3</sup>
Tempo di gelo (200 g a 25°C)	25 minuti
Indurimento completo a 25°C	7 giorni
Temperatura minima di applicazione	+5 °C
Rapporto resina/indurente	100 / 50 in peso
Colore	Trasparente
Viscosità (poises a 25°C)	8 - 10 (A+B)
Residuo secco (A+B) UNI 8309	> 98 %
Resistenza a compressione a 7 gg ASTM D695-02a	> 50 MPa
Massima tensione di trazione ASTM D 638	> 30 MPa
Modulo tangente a trazione ASTM D 638	1760 MPa

**Confezioni**

Contentori metallici da Kg 6 (A+B)

Contentori metallici da Kg 18 (A+B)

**Stoccaggio**

In contenitori sigillati e in ambiente asciutto, la sua stabilità è di 24 mesi.

**Avvertenze**

Prodotto destinato ad uso professionale. Non applicare su superfici bagnate o polverose. Le attrezzature impiegate per la preparazione e posa in opera di Kimitech EP-IN devono essere pulite con Solvente EPOX prima dell'indurimento. Il prodotto deve essere maneggiato con cautela: utilizzare guanti creme di protezione ed occhiali per evitare il contatto con la pelle e gli occhi. La segatura o gli inerti quarziferi Kimifill eventualmente aggiunti nel prodotto dovranno essere perfettamente asciutti.

Le caratteristiche tecniche e le modalità d'applicazione da noi indicate nel presente bollettino sono basate sulla nostra attuale conoscenza ed esperienza, ma non possono comportare nessuna garanzia da parte nostra sul risultato finale del prodotto applicato. Il cliente è tenuto a verificare che il prodotto sia idoneo per l'impiego previsto e ad accertarsi che il bollettino tecnico sia valido e non superato da successivi aggiornamenti (la versione più recente della presente scheda tecnica è scaricabile attraverso il QR-Code riportato nel presente documento).



Figura 1.7

## CAP 2. Risultati sperimentali FRP

---

Si presentano i risultati di prove di trazione monoassiale barre in fibra di carbonio e in fibra di vetro, laminati in fibra di carbonio, tessuti in fibra di carbonio, fibra di vetro, fibra di basalto e fili di acciaio.

### 2.1 Barre in fibra di carbonio

Sono state testate barre pultruse in fibra di carbonio a matrice polimerica, con diametro nominale 8 mm, ad alta resistenza e ad alta temperatura di transizione vetrosa, indicate per il rinforzo strutturale di elementi in calcestruzzo armato e in muratura. Le barre sono ad aderenza migliorata, ottenuta tramite sabbiatura superficiale di quarzo sferoidale e avvolgimento elicoidale in fili di carbonio.



Figura 2.1 Barra in CFRP utilizzata nelle prove sperimentali

La Tabella 2.1 riporta le caratteristiche meccaniche e geometriche, fornite dal produttore, della tipologia di barra testata.

Tabella 2.1-caratteristiche barre in fibra di carbonio testate

<b>PRESTAZIONI</b>	<b>Mbar-Galileo HTG 8</b>
Sezione nominale [mm <sup>2</sup> ]	50
Diametro nominale [mm]	8
Resistenza a trazione caratteristica ,fyk, ASTM D 3039[Mpa]	1.800
modulo elastico medio a trazione, ASTM D 3039 [GPa]	130
Deformazione ultima media a trazione , ASTM D 3039[%]	1,8
Temperatura di transizione vetrosa, ASTM 1356 [°C]	>250

## 2.2 Barre in fibra di vetro

Sono state testate barre pultruse in fibra di vetro, preimpregnate con vinil estere epossimodificato, indicate per il rinforzo strutturale di elementi in calcestruzzo, muratura, pietra o tufo. Le barre presentano una sabbiatura superficiale.



Figura 2.2- Barre in GFRP utilizzate nelle prove sperimentali di trazione



Tabella 2.2-Caratteristiche barre in fibra di vetro testate

<b>PRESTAZIONI</b>	<b>Maperod G</b>
Sezione nominale [mm <sup>2</sup> ]	71,26
Diametro nominale [mm]	9,53
Resistenza a trazione caratteristica ,fyk, ASTM D 3039[Mpa]	760
Modulo elastico medio a trazione, ASTM D 3039 [GPa]	40.800

### 2.3 Laminati in fibra di carbonio

I laminati in fibra di carbonio sono gli stessi testati nella prova preliminare. Per maggior chiarezza si riportano le caratteristiche del composito in Tabella 4.3.

Tabella 2.3-Caratteristiche del laminato in fibra di carbonio

<b>PRESTAZIONI</b>	<b>MBT-Mbrace Laminate LM 10/1,4</b>
Resistenza a trazione caratteristica ,fyk, ASTM D 3039[Mpa]	2.300
Modulo elastico medio a trazione, ASTM D 3039 [GPa]	165
deformazione ultima a trazione , ASTM D 3039 [%]	1,8
Spessore nominale [mm]	1,4
Larghezza [mm]	100

### 2.4 Tessuti in fibra di carbonio

Sono stati testati campioni costituiti da tessuti di armatura unidirezionale in fibra di carbonio, specifici per consolidamenti strutturali, impregnati in laboratorio con resina epossidica.



Figura 2.3- Tessuto in CFRP utilizzato nelle prove sperimentali di trazione

La tabella 2.4 riporta le caratteristiche meccaniche e geometriche, fornite dal produttore, del tessuto testato.

Tabella 2.4- Caratteristiche del tessuto in CFRP

<b>PRESTAZIONI</b>	<b>Kimitech CB 320</b>
Grammatura [ $\text{g/m}^2$ ]	320
Resistenza a trazione caratteristica , $f_{yk}$ , ASTM D 3039[Mpa]	787
deformazione ultima a trazione , ASTM D 3039 [%]	1,8
Spessore equivalente [mm]	0,16
Larghezza [mm]	50

## 2.5 Tessuti in fibra di vetro

Sono stati testati tessuti unidirezionali in fibra di vetro, realizzati tramite termosaldatura, processo che impedisce la sfilacciatura delle fibre, facilitando l'applicazione in cantiere. I tessuti sono stati impregnati in laboratorio con resina epossidica.

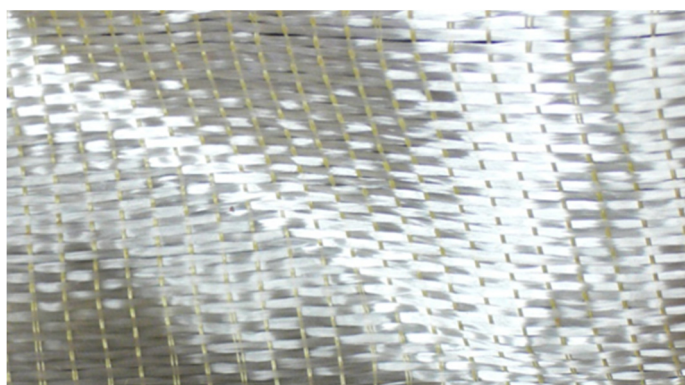


Figura 2.4- Tessuto in GRFP utilizzato nelle prove sperimentali di trazione

La Tabella 2.5 riporta le caratteristiche meccaniche e geometriche, fornite dal produttore, delle fibre secche e del tessuto impregnato.

Tabella 2.5- Caratteristiche del tessuto in GFRP

PRESTAZIONI	FIDGLASS UNIDIR 300 HS73
<b>FIBRA SECCA</b>	
Tensione caratteristica a trazione, $\sigma_{\text{trazione}}$ [Mpa]	2.500
Modulo elastico $E_{\text{fibra}}$ [Gpa]	73
Deformazione a rottura, $\epsilon_{\text{fibra}}$ [%]	3,42
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	2,50
<b>TESSUTO IMPREGNATO</b>	
Titolo filato [Tex]	1.200
Numero fili/cm [fili/cm]	2,50
Massa [g/m <sup>2</sup> ]	300
Spessore equivalente del rinforzo, $t_f$ [mm]	0,12
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, $\sigma_f$ [Mpa]	1.400
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, $E_f$ [Gpa]	70
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, $\epsilon_f$ [%]	2

## 2.6 Tessuti in fibra di basalto

Sono stati testati tessuti unidirezionali in fibra di basalto, ottenuta dalla fusione e filatura di rocce vulcaniche. I tessuti, realizzati tramite termosaldatura con fili di poliestere, sono particolarmente idonei al rinforzo di strutture soggette ad azioni dinamiche ed impatti

violenti per la loro elevata tenacità. I campioni da sottoporre ai test sono stati ottenuti impregnando i tessuti in laboratorio con resina epossidica.

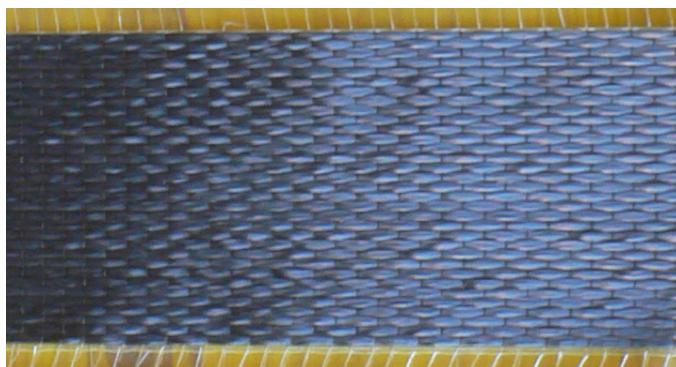


Figura 2.5- Tessuto in fibra di basalto utilizzato nelle prove sperimentali di trazione

La Tabella 2.6 riporta le caratteristiche meccaniche e geometriche, fornite dal produttore, delle fibre secche e del tessuto impregnato.

Tabella 2.6-Caratteristiche del tessuto in fibra di basalto

PRESTAZIONI	FIDBASALT UNIDIR 400 C95
<b>FIBRA SECCA</b>	
Tensione caratteristica a trazione, $\sigma_{\text{trazione}}$ [Mpa]	3.080
Modulo elastico $E_{\text{fibra}}$ [Gpa]	95
Deformazione a rottura, $\epsilon_{\text{fibra}}$ [%]	3,15
Densità [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,18
<b>TESSUTO IMPREGNATO</b>	
Titolo filato [Tex]	1.200
Numero fili/cm [fili/cm]	3,30
Massa [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	396
Spessore equivalente del rinforzo, $t_f$ [mm]	0,14
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, $\sigma_f$ [Mpa]	1.900
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, $E_f$ [Gpa]	90
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, $\epsilon_f$ [%]	2,11

## 2.7 Tessuti in fili di acciaio

Sono stati sottoposti a prova di trazione monoassiale anche tessuti unidirezionali in fili di acciaio UHTSS ad altissima resistenza e media densità, formati da microtrefoli termosaldati su una rete in fibra di vetro non strutturale che ne facilita la posa e la lavorabilità. Il tessuto, impregnabile sia con matrice organica che inorganica, è stato impregnato in laboratorio con resina epossidica.

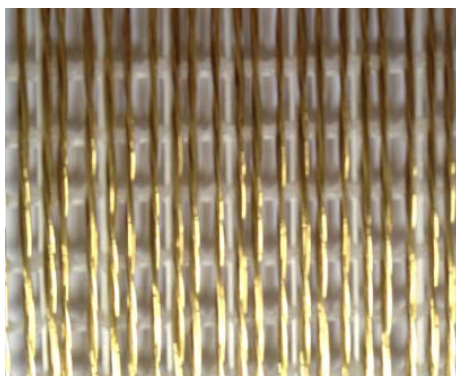


Figura 2.6- Tessuto in fili di acciaio utilizzato nelle prove sperimentali di trazione

Tabella 2.7-Caratteristiche del tessuto in fili di acciaio

<b>PRESTAZIONI</b>	<b>FIDBASALT UNIDIR 400 C95</b>
<b>FILO</b>	
Tensione caratteristica a trazione, $\sigma_{\text{filo}}$ [Mpa]	3.200
Modulo elastico $E_{\text{filo}}$ [Gpa]	206
Area $A_{\text{filo}}$ [mm <sup>2</sup> ]	0,096
<b>NASTRO SECCO/TREFOLO</b>	
Area effettiva di un trefolo (5 fili), $A_{\text{trefolo}}$ [mm <sup>2</sup> ]	0,481
Numero trefoli/cm [trefoli/cm]	4,72
Massa [g/m <sup>2</sup> ]	1.800
Spessore equivalente del rinforzo, $t_{\text{nastro}}$ [mm]	0,277
Carico caratteristico di un trefolo	1.476
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, $\sigma_{\text{nastro}}$ [Mpa]	3.070
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, $E_{\text{nastro}}$ [Gpa]	190
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, $\epsilon_{\text{nastro}}$ [%]	1,60

La Tabella 2.7 riporta le caratteristiche meccaniche e geometriche, fornite dal produttore, del singolo filo di acciaio e del nastro secco.

## 2.8 Resina epossidica

Per l'impregnazione dei tessuti e per l'applicazione dei talloni è stata utilizzata la stessa resina epossidica bicomponente ad elevata adesione, di colore trasparente, con un rapporto di miscelazione resina indurente pari a 100/50 in peso e una densità di 1,08 g/cm<sup>3</sup>. Le prestazioni meccaniche della resina, fornite da produttore, sono riportate nella Tabella 2.8.

Tabella 2.8-Caratteristiche prestazionali della resina epossidica impiegata nella prova preliminare

<b>PRESTAZIONI</b>	<b>Kimitech EP-IN</b>
tempo di gelo (200g a 25°C)	25 minuti
Indurimento completo a 25°C	7 giorni
Resistenza a trazione a 7 giorni, ASTM D 695-02a [Mpa]	>50
Massima tensione di trazione, ASTM D 638 [Mpa]	>30
Modulo tangente a trazione , ASTM D 638 [Mpa]	1760

## 2.9 Programma sperimentale

La Tabella 2.9 rappresenta il programma sperimentale seguito, con l'indicazione della classificazione dei provini, il numero di provini testati per ogni tipologia e i metodi di prova seguiti nella definizione dei test (descritti nei punti precedenti).

Tabella 2.9 Programma delle prove sperimentali statiche

<b>TIPO</b>	<b>SIGLA</b>	<b>DESCRIZIONE</b>	<b>NUMERO</b>	<b>RIFERIMENTI NORMATIVI</b>
B	BC	barra in fibra di carbonio	2	ACI 440. 3R-04
	BG	barra in fibra di vetro	2	CNR-DT 203/2006
L	T	laminato in fibra di carbonio	2	ASTM D3039 UNI
T	TC	tessuto in fibra di carbonio	2	EN ISO 527-5 UNI
	TG	tessuto in fibra di vetro	2	EN ISO 527-1 ACI
	TB	tessuto in fibra di basalto	2	440. 3R-04
	TA	tessuto in fili di acciaio	2	SISTEMA COKIT

## **2.10 Confezionamento provini**

### **Campioni di tipo B – Barre in CFRP e GFRP**

I provini di barre sono stati confezionati in laboratorio seguendo le seguenti fasi:

- Taglio dei tubi di acciaio utilizzati come sistema di ancoraggio con sega circolare;
- Taglio delle barre;
- Realizzazione dell'ancoraggio di un'estremità del provino (Figure 2.7):
  - Posizionamento di un tappo in gomma su un lato del tubo in acciaio per evitare la fuoriuscita della resina durante la colata;
  - Inserimento della barra nel tubo;
  - Fissaggio della barra in modo tale da essere perfettamente centrata tramite l'ausilio di un dispositivo di centraggio (rondella forata metallica);
  - Riempimento del tubo con filler (resina epossidica) precedentemente miscelato);
  - Posizionamento di nastro adesivo per fissare in posizione la rondella metallica;
  - Asciugatura in verticale;
- Realizzazione del secondo ancoraggio del provino a maturazione del primo (il giorno successivo per permettere la completa asciugatura della resina).

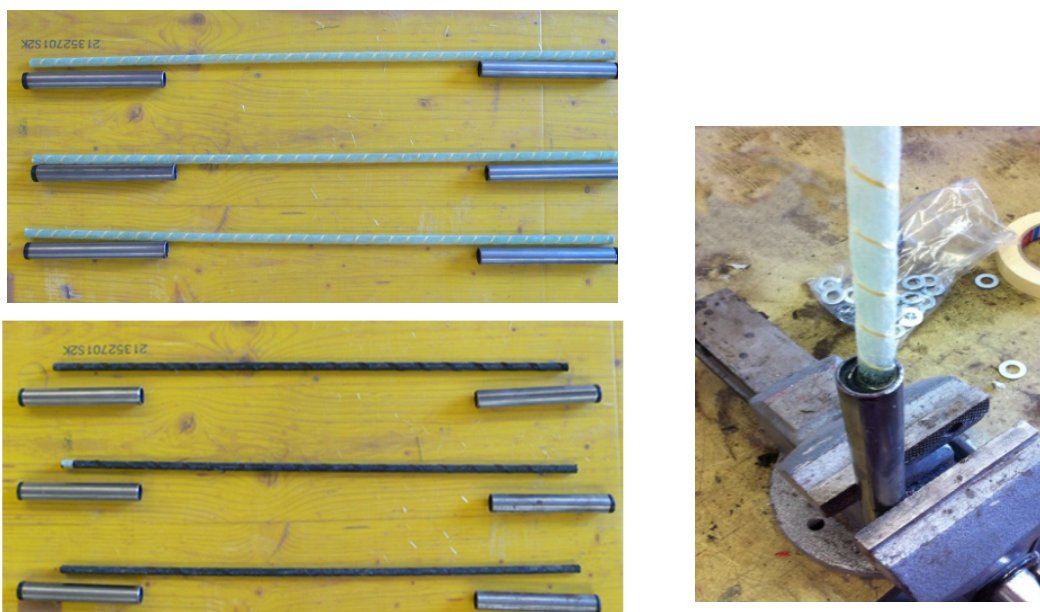


Figure 2.7-Preparazione di campioni di barre in CFRP E GFRP

La Tabella 2.10 riporta le caratteristiche dimensionali dei campioni realizzati, dipendenti dal diametro nominale della barra testata.

Tabella 2.10- Caratteristiche dimensionali provini di tipo B

PROVINO	MATERIALE	DIAMETRO NOMINALE $d_b$	AREA NOMINALE $A_b$	DIAMETRO ESTERNO TUBO, $d$	LUNGHEZZA ANCORAGGIO	LUNGHEZZA TUBO	LUNGHEZZA LIBERA $l$	LUNGHEZZA BARRA $l_b$
		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
BC	CFRP	8	50,27	25	150	160	380	690
BG	GFRP	9,53	71,26	25	120	130	320	570

### Campioni di tipo L – Laminato in CFRP

I provini di laminato in fibra di carbonio sono stati confezionati secondo le dimensioni riportate nel punto § 2.3.2 seguendo le seguenti fasi:

- Taglio del laminato delle dimensioni richieste con una sega al windia;
- Realizzazione dei talloni;
- Taglio del tessuto in fibra di vetro a 45° delle dimensioni richieste;
- Taglio della lastra di alluminio;
- Applicazione di due strati di tessuto alternati a 45° e della lastra di alluminio con resina epossidica e polvere di quarzo (l'operazione va effettuata su tutte le facce del provino) -Figure 2.9;
- Posizionamento dei pesi sopra i talloni per facilitare l'incollaggio;



- Maturazione e asciugatura in ambiente di laboratorio-Figura 2.10.



Figura 2.8-Realizzazione campioni di tipo L (materiali)



Figure 2.9-Applicazione dei talloni (provini di tipo L)



Figura 2.10-Maturazione e asciugatura (provino di tipo L)

In seguito alla realizzazione è stata determinata l'area della sezione trasversale prendendo il valore medio di tre misurazioni effettuate in mezzeria e alle estremità della lunghezza di misurazione. I dati sono riportati nella Tabella 2.11.

Tabella 2.11- Caratteristiche dimensionali provini di tipo L

PROVINO	MATERIALE	SPESSORE NOMINALE [mm]	SPESSORE MISURATO [mm]	LARGHEZZA [mm]	AREA [mm <sup>2</sup> ]
L1	Laminato in CFRP	1,4	1,7	15,63	26,57
L2	Laminato in CFRP	1,4	1,67	15,70	26,22
L3	Laminato in CFRP	1,4	1,66	15,68	26,08
L4	Laminato in CFRP	1,4	1,71	15,73	26,85

### Campioni di tipo T – Tessuti in CFRP, GFRP, fibre di basalto, SRP

I provini di tessuto sono stati preparati secondo la modalità descritta nel sistema COKIT, realizzando preliminarmente una lastra di base costituita da tre strati di tessuto unidirezionale sovrapposti e impregnati di resina epossidica. Una volta seccata, la piastra è stata tagliata delle dimensioni dei provini, cui sono stati applicati i talloni di estremità. Si riportano le fasi di realizzazione:

- Preparazione lastra di base delle dimensioni 20x30cm:
  - Taglio di tre strati di tessuto unidirezionale;
  - Posizionamento di uno strato su una tavoletta di plastica;
  - Impregnazione con resina epossidica;
  - Eliminazione dei vuoti mediante rullo;
  - Sovrapposizione e successiva impregnazione di tutti gli strati di tessuto con attenzione al corretto allineamento delle fibre e eliminazione dei vuoti;
  - Protezione della superficie con uno strato in plastica;
  - Maturazione (curing).
- Taglio della lastra nei provini delle dimensioni richieste (punto § **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)-Figura 2.12
- Realizzazione dei talloni- Figura 2.13:
  - Taglio del tessuto in fibra di vetro a 45° delle dimensioni richieste;

- Taglio della lastra di alluminio;
- Applicazione di due strati di tessuto alternati a 45° e della lastra di alluminio con resina epossidica e polvere di quarzo (l'operazione va effettuata su tutte le facce del provino);
- Posizionamento dei pesi sopra i talloni per facilitare l'incollaggio;
- Maturazione e asciugatura in ambiente di laboratorio.

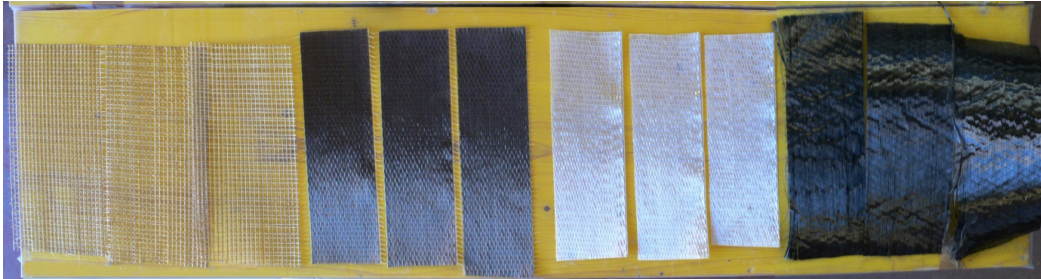


Figura 2.11-Tessuti per la realizzazione della lastra di base

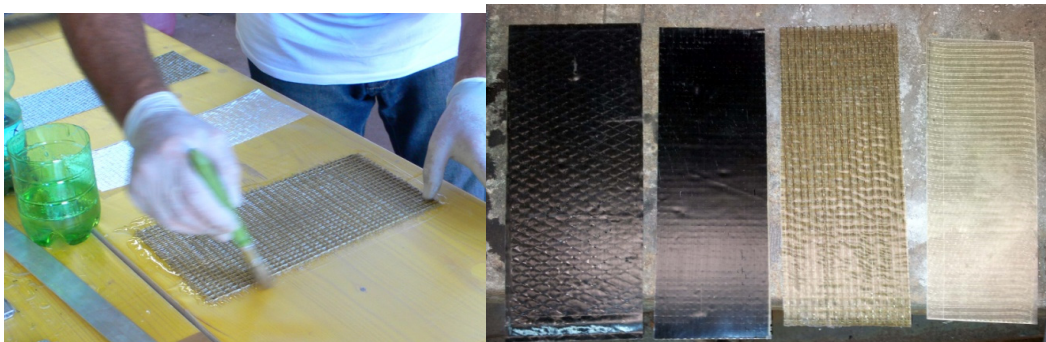


Figure 2.12- Realizzazione della lastra di base (fibra di carbonio, basalto, acciaio, vetro)

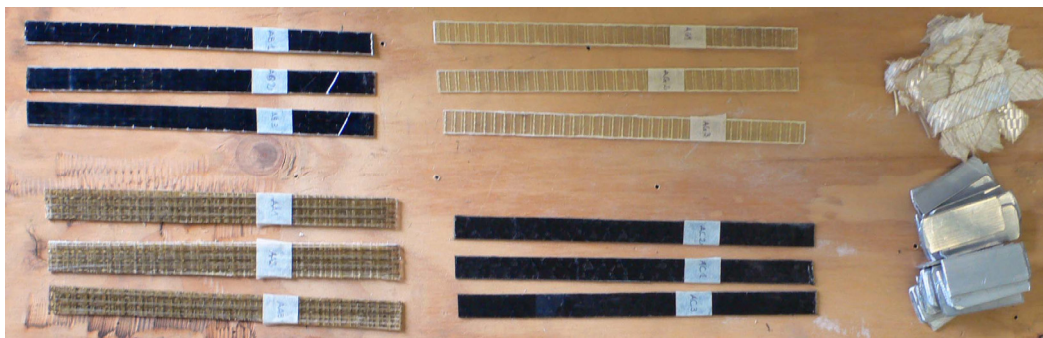


Figura 2.13- Confezionamento dei provini di tessuti in FRP

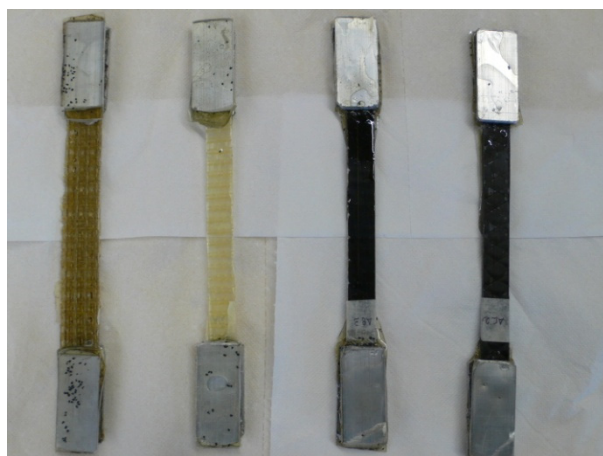


Figura 2.14-Campioni realizzati di tessuto in FRP (acciaio, vetro, basalto, carbonio)

Per i tessuti in FRP, sono state definite sia l'area della sezione trasversale, ottenuta moltiplicando la larghezza misurata per lo spessore misurato del provino, sia l'area equivalente, come da indicazione del documento CNR DT 2004 R1/2012, calcolata come il prodotto tra la larghezza e lo spessore equivalente per il numero di strati applicati (in questo caso tre). I valori di calcolo misurati sono relativi al valore medio di tre misurazioni effettuate in mezzeria e alle estremità della lunghezza di misurazione. Le proprietà meccaniche sono state calcolate con riferimento ad entrambe le aree. I dati sono riportati nella Tabella 2.12.

Tabella 2.12-Caratteristiche dimensionali provini di tipo T in FRP (TC, TG, TB)

PROVINO	MATERIALE	SPESSORE EQUIVALENTE [mm]	SPESSORE MISURATO [mm]	LARGHEZZA [mm]	AREA $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]	AREA EQUIVALENTE $A_{fb}$ [mm <sup>2</sup> ]
TC1	Tessuto in CFRP	0,16	1,54	15,96	24,58	7,66
TC2	Tessuto in CFRP	0,16	1,47	16,09	23,65	7,72
TG1	Tessuto in CFRP	0,12	1,17	14,38	16,82	5,18
TG2	Tessuto in CFRP	0,12	1,22	15,12	18,45	5,44
TB1	Tessuto in fibra di basalto	0,14	1,51	16,1	24,31	6,76
TB2	Tessuto in fibra di basalto	0,14	1,48	15,3	22,64	6,43

Per i tessuti in fili di acciaio l'area equivalente è stata calcolata considerando l'area del trefolo e il numero di trefoli inglobati all'interno del provino (in questo caso 10 e 9). I dati sono riportati nella Tabella 2.13:

Tabella 2.13-Caratteristiche dimensionali provini di tipo a T in fili di acciaio (TA)

PROVINO	MATERIALE	AREA SINGOLA TRECCIA [mm <sup>2</sup> ]	SPESSORE MISURATO [mm]	LARGHEZZA [mm]	AREA A <sub>f</sub> [mm <sup>2</sup> ]	AREA EQUIVALENTE A <sub>fib</sub> [mm <sup>2</sup> ]
TA1	Tessuto in fili di acciaio	0,481	3,3	21,04	69,43	4,81
TA2	Tessuto in fili di acciaio	0,481	3,1	19,24	59,64	4,329

## 2.11 Strumentazioni

Le prove di trazione uniassiale sono state eseguite utilizzando una macchina di prova universale (Zwick/Roell ZMART.PRO). Ogni provetta è stata posizionata tra due morsetti (disposti in modo da sporgere rispetto all'intera lunghezza del tallone) e portata fino a rottura. La prova è stata condotta in controllo di spostamento.



Figura 2.15- Provino in tessuto sotto carico

## Estensimetri

Per la determinazione del modulo elastico E, ad un provino di ogni tipologia è stato applicato un estensimetro (strain gage) in grado di misurare la deformazione della lunghezza di misura in relazione al carico applicato. Per la barra in fibra di carbonio le deformazioni sono state misurate fino alla rottura tramite un estensimetro (LVDT).



Figura 2.16- Applicazione degli estensimetri ai provini

## 2.12 Analisi dei risultati

Di seguito si presentano i risultati ottenuti in termini di:

- Rottura;
- Comportamento meccanico;
- Determinazione delle proprietà meccaniche (resistenza a trazione e modulo elastico).

### Modalità di rottura

Per quanto riguarda le prove di trazione su barre in FRP, i provini in fibra di vetro hanno presentato una rottura di tipo esplosivo, con distacco delle fibre nel classico modo “a spazzola” ma senza completa disgregazione. Secondo la notazione dell’ASTM D 3039 (§ 0), la rottura è classificabile in entrambi i casi come XGM (Explosive, Gage, Middle). Per le barre in fibra di carbonio la rottura è stata raggiunta in un solo provino e localizzata in prossimità degli ancoraggi, suggerendo la probabile insufficienza della lunghezza di ancoraggio. La rottura è classificabile di tipo LAB (Linear A, at Grip, Bottom) e XMV (Explosive Multiple Various).

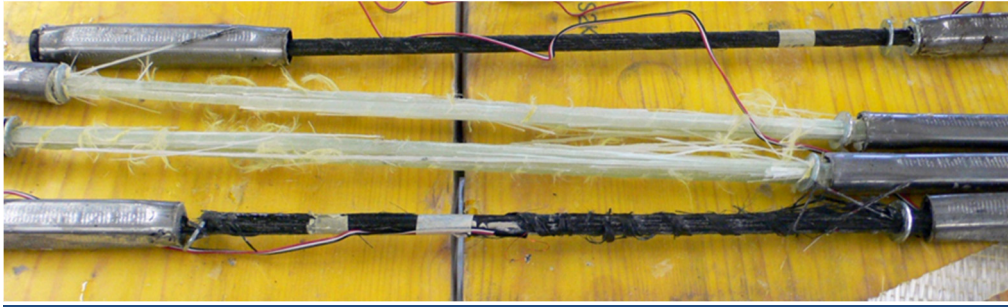


Figura 2.17-Rottura nei provini di barre in FRP

Le modalità di rottura di tessuti e laminati in FRP, sottoposti a prova di trazione, hanno confermato la validità del sistema di rinforzo adottato. Infatti in tutti i casi la rottura è stata di tipo fragile, con completa disgregazione delle fibre. I tessuti impregnati non hanno mostrato una rottura esplosiva (del tipo brush-like), come i laminati, ma una rottura con formazione di fratture di distacco lineari, probabilmente per la presenza di una quantità maggiore di resina, che ha esercitato un effetto di vero e proprio confinamento delle fibre. Le figure seguenti illustrano le modalità di rottura raggiunte nei tessuti e nei laminati in FRP.

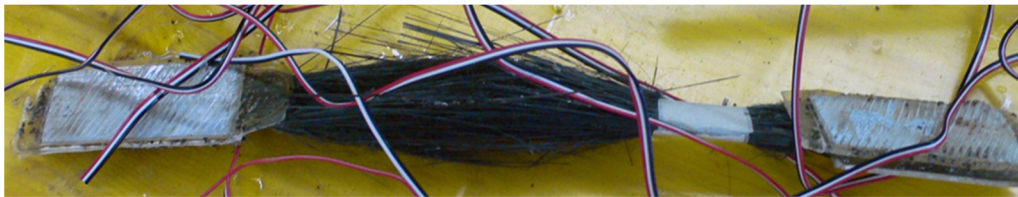


Figura 2.18- Rottura nei provini di tipo L



Figura 2.19-Rottura nei provini di tipo L (laminati in CFRP) -classificazione: XGM (Explosive Gage Middle)





Figure 2.20- Rottura nei provini di tipo TC (tessuti in CFRP)-classificazione: SGM  
(Long Gage Middle)

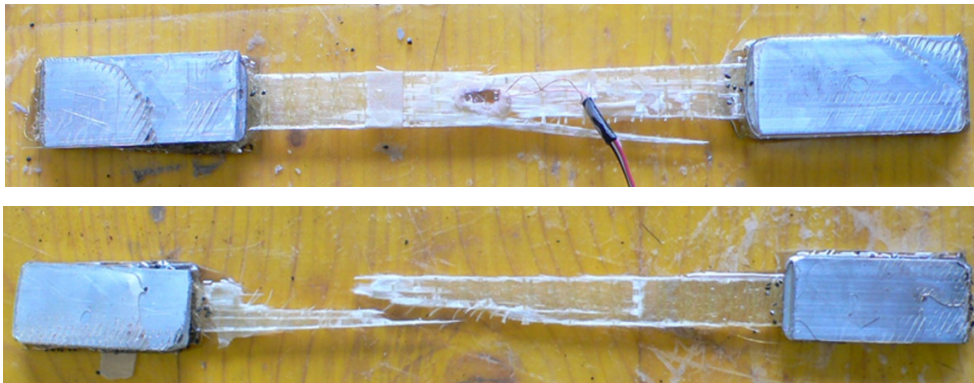


Figure 2.21- Rottura nei provini di tipo TG (tessuti in GFRP) - classificazione: AGM  
(Angled Gage Middle)

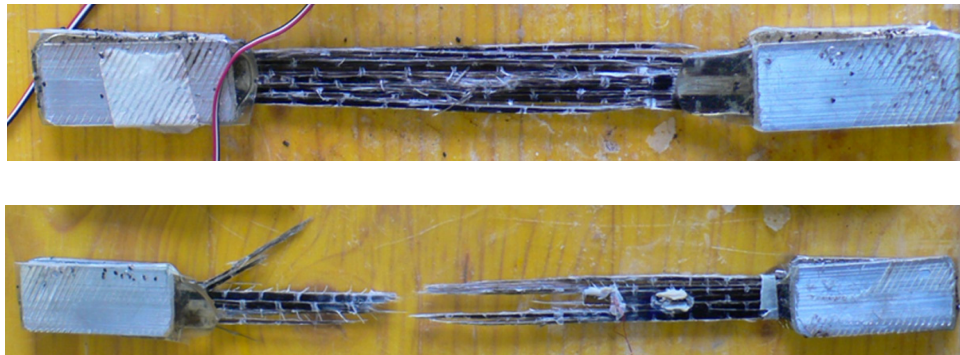


Figure 2.22- Rottura nei provini di tipo TB (tessuti in fibra di basalto) - classificazione:  
SGM (Longe Splitting Gage Middle)







Figure 2.23- Rottura nei provini di tipo TA (tessuti in fili di acciaio) - classificazione:  
LGM (Lateral Splitting Gage Middle)

### Comportamento meccanico

Tutti i campioni hanno mostrato un comportamento lineare fino alla rottura. Questa è stata di tipo fragile, preceduta da deboli suoni indicanti il cedimento del materiale. Le figure seguenti mostrano, per ogni tipologia di campione, i grafici sperimentali di forza-spostamento e di forza-deformazione (relativo al provino testato con estensimetro applicato). Lo spostamento si riferisce allo scorrimento dei due morsetti del macchinario durante la prova.

### Provini di tipo BC – Barre in CFRP

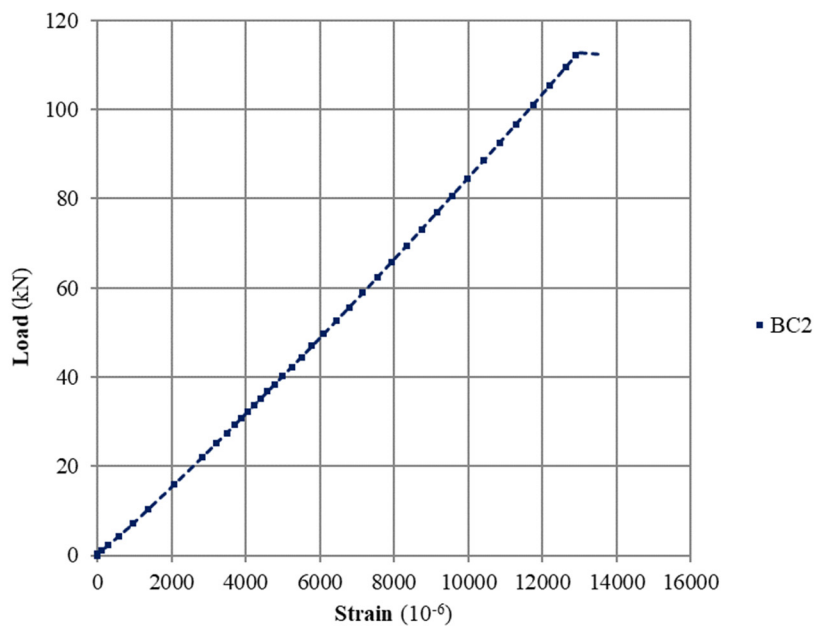


Figura 2.24-Diagramma Forza-Spostamento nel composito provino tipo BC2 (testato con LVDT)

### Provini di tipo BG – Barre in GFRP

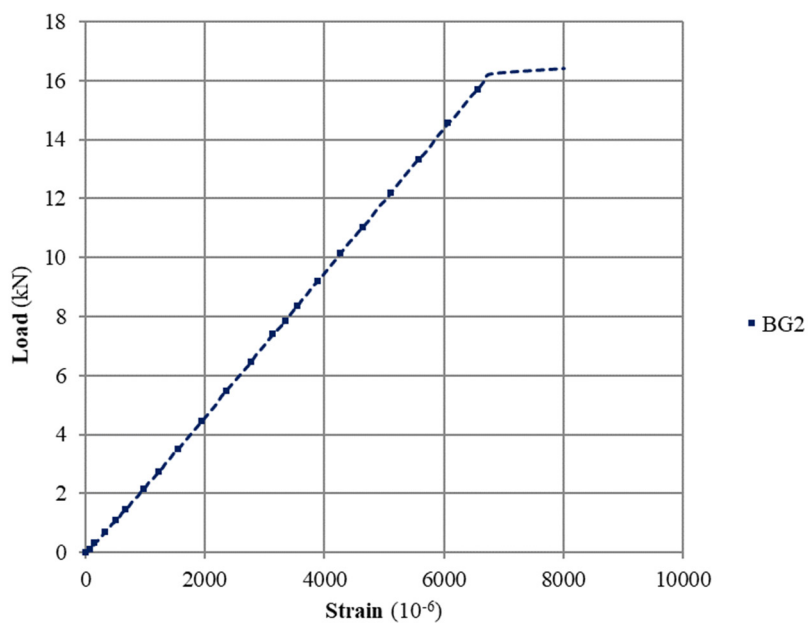


Figura 2.25- Diagramma Forza-Deformazione nel composito provino tipo BG2 (estensimetro)

### Provini di tipo L – Laminati in CFRP

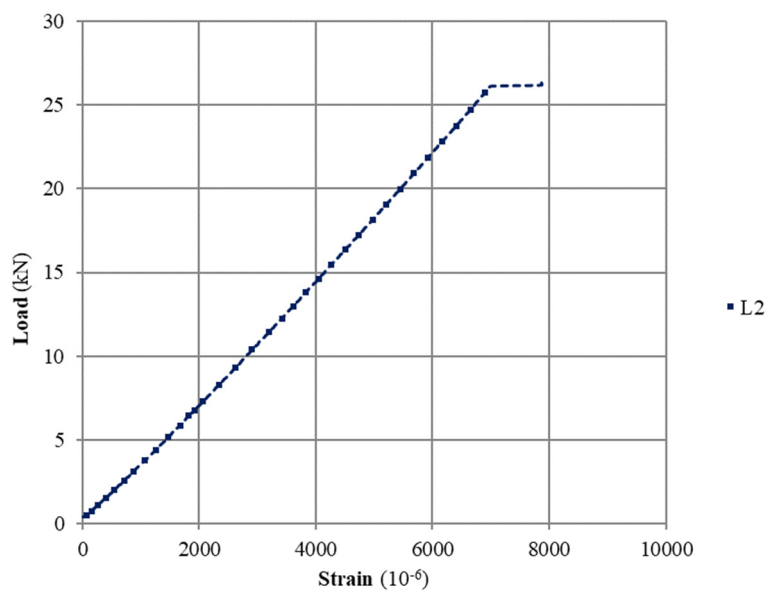


Figura 2.26- Diagramma Forza-Deformazione nel composito provino tipo L2 (estensimetro)

### Provini di tipo TC – Tessuti in CFRP

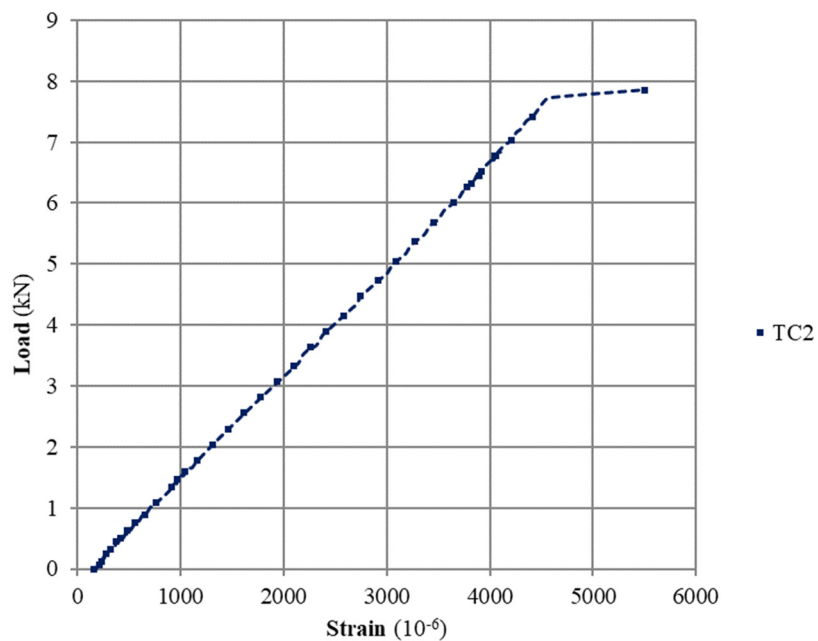


Figura 2.27- Diagramma Forza-Deformazione nel composito provino tipo TC2 (estensimetro)

### Provini di tipo TG – Tessuti in GFRP

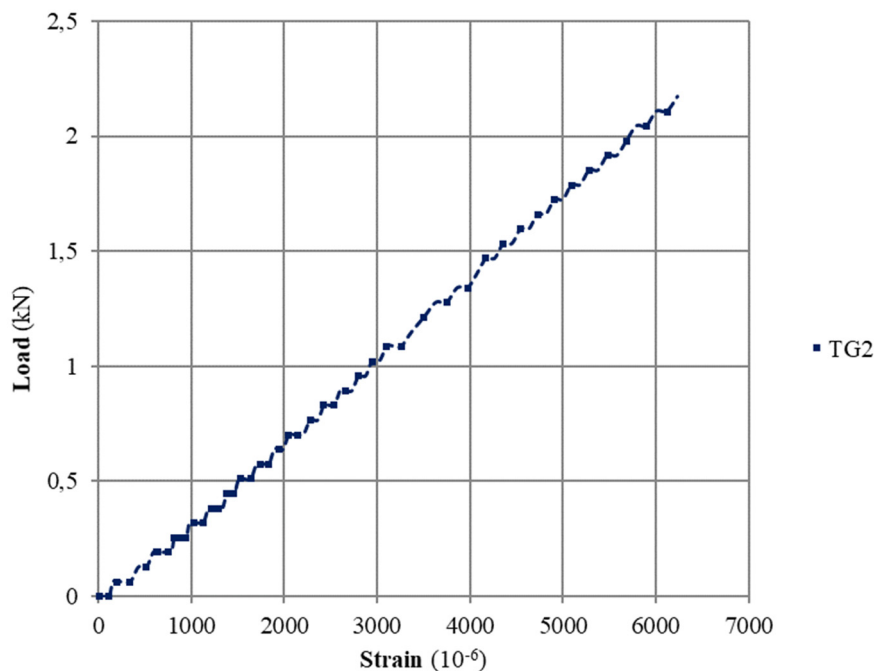


Figura 2.28- Diagramma Forza-Deformazione nel composito provino tipo TG2 (estensimetro)

### Provini di tipo TB – Tessuti in fibra di basalto

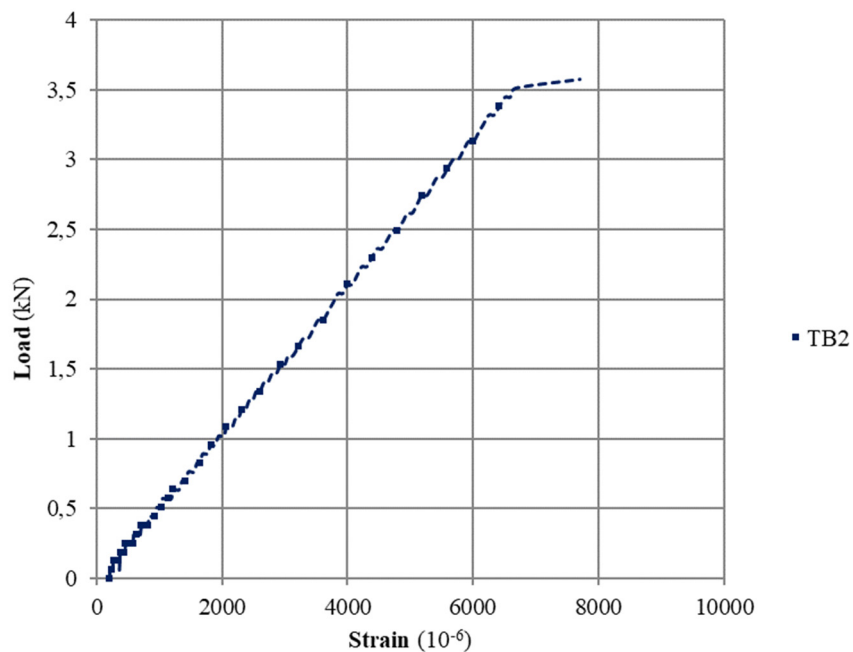


Figura 2.29- Diagramma Forza-Deformazione nel composito provino tipo TB2 (estensimetro)

### Provini di tipo TA– Tessuti in fili di acciaio

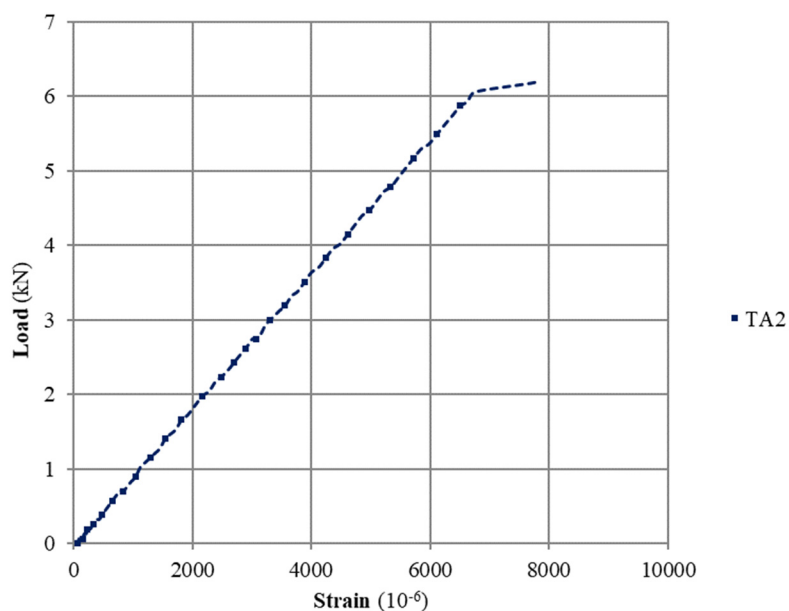


Figura 2.30- Diagramma Forza-Deformazione nel composito provino tipo TA2 (estensimetro)

## Determinazione delle proprietà meccaniche

In seguito alle prove sperimentali sono state determinate la resistenza ultima a trazione e il modulo elastico dei provini.

### Barre

Nel caso di barre, la resistenza ultima è stata determinata in accordo con i metodi di prova descritti nel punto § 2.1.2 dividendo il carico massimo per l'area della barra, tramite la seguente formula:

$$\sigma = \frac{F^{\max}}{A_b} \quad (2.1)$$

L'area della barra è stata calcolata a partire dal diametro nominale fornito dal produttore. Il modulo elastico è stato calcolato con riferimento alle tensioni e alle deformazioni corrispondenti al 50% e al 20% della tensione di rottura (determinata dopo la prova), tramite la seguente formula:

$$E = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot A_b} \quad (2.2)$$

Poiché solo la barra in CFRP è stata testata con un estensimetro (LVDT), che ha permesso di avere a disposizione le deformazioni fino alla rottura, il modulo elastico per la barra in GFRP è stato determinato nella modalità consigliata per tessuti e laminati.

### Tessuti e laminati

Le proprietà meccaniche di tessuti sono state determinate con riferimento sia all'area della sezione trasversale misurata, che all'area equivalente relativa alle sole fibre. Infatti, come suggerisce il documento CNR DT 200 R1/2012, le proprietà meccaniche di sistemi impregnati in situ vanno determinate considerando l'area delle sole fibre (area resistente o area equivalente). Per i provini di laminati l'area è l'area calcolata considerando lo spessore nominale fornito dal produttore. Si riportano le formule utilizzate per il calcolo della resistenza e del modulo elastico:

$$\sigma = \frac{F^{\max}}{A}; \quad E = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'} \quad (2.3)$$

In accordo con lo standard UNI EN ISO 527-5 gli intervalli di deformazione per il calcolo del modulo elastico sono stati assunti pari a 0,0005-0,0025.

Le tabelle seguenti riportano le proprietà meccaniche calcolate per le diverse tipologie di campione.

Tabella 2.14-Proprietà meccaniche di provini di tipo BC e BG

PROVINO	TIPO	F <sub>max</sub>	A <sub>b</sub>	σ	E	ROTTURA
		[N]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[GPa]	
BC1	Barra in fibra di carbonio	91904	50,27	1828,37	-	LAB
BC2	Barra in fibra di carbonio	114316	50,27	2274,24	157,21	XMV
BG1	Barra in fibra di vetro	75470	71,26	1059,08	-	XGM
BG2	Barra in fibra di vetro	73630	71,26	1033,26	33,59	XGM

Tabella 2.15-Proprietà meccaniche provini tipo L

PROVINO	TIPO	F <sub>max</sub>	A <sub>b</sub>	σ	E	ROTTURA
		[N]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[GPa]	
L1	Laminato in fibra di carbonio	53260	26,57	2004,44	-	XGM
L2	Laminato in fibra di carbonio	56513	26,22	2155,42	135,11	XGM

Tabella 2.16-Proprietà meccaniche provini di tipo TC, TG, TB

PROVINO	TIPO	F <sub>max</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>fib</sub>	σ <sub>f</sub>	σ <sub>fib</sub>	E	E <sub>fib</sub>	ROTTURA
		[N]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[GPa]	[GPa]	
TC1	Tessuto in CFRP	17422	24,58	7,66	708,83	2274,175	-	-	SGM
TC2	Tessuto in CFRP	18883	23,65	7,72	798,36	244,971	72,86	223,2	SGM
TG1	Tessuto in GFRP	6365	16,82	5,18	378,32	1229,524	-	-	AGM
TG2	Tessuto in GFRP	7169	18,45	5,44	388,64	1317,056	19,03	64,03	AGM
TB1	Tessuto fibra BFRP	13820	24,31	6,76	568,47	2043,77	-	-	SGM
TB2	Tessuto fibra BFRP	13842	22,64	6,43	611,29	2154,06	24,96	84,43	SGM

Tabella 2.17- Proprietà meccaniche di tipo TA

PROVINO	TIPO	F <sub>max</sub>	A <sub>f</sub>	A <sub>fib</sub>	σ <sub>f</sub>	σ <sub>fib</sub>	E	E <sub>fib</sub>	ROTTURA
		[N]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[GPa]	[GPa]	
TA1	tessuto in fili di acciaio	16910	69,43	4,81	243,55	3515,593	-	-	LGM
TA2	tessuto in fili di acciaio	14267	59,64	4,329	239,2	3295,68	15,52	213,8	LGM

# CAP 3. Stato Limite del CA- flessione, pressoflessione e taglio

---

## 3.1 Generalità

In questo capitolo si analizzano le strutture in c.a. sottoposte a sollecitazione di flessione, taglio, compressione e torsione considerando il loro comportamento allo stato limite ultimo (SLU).

## 3.2 SLU di sezioni sottoposte a tensioni normali

Le norme impongono dei limiti assai prudenti alla deformazione massima dei materiali. Nei calcoli di resistenza delle sezioni in c.a. si trascura la capacità di resistenza a trazione del conglomerato e la deformazione ultima del calcestruzzo a compressione  $\epsilon_{cu}$  è assunta pari a 3,5‰. Per una sezione uniformemente compressa, la  $\epsilon_{cu}$  deve risultare non superiore a valore  $\epsilon_{c1} = 2\text{‰}$ , al fine di salvaguardare la sezione stessa da rottura fragile.

Per l'acciaio presente nella sezione, in zona compressa, sono previsti gli stessi valori della deformazione del calcestruzzo. La deformazione ultima in trazione dell'acciaio  $\epsilon_{su}$  è teoricamente non limitata rispetto al calcestruzzo considerate le capacità deformative ben superiori dell'acciaio; è comunque opportuno che non si utilizzino condizioni di deformazione troppo elevati per l'acciaio per poter conservare una sostanziale integrità del conglomerato teso circostante le barre d'armatura.

**Il comportamento di una sezione inflessa in cemento armato**, semplicemente armata, soggetta a momento flettente crescente, si può schematizzare in più fasi:

- **Fase 1:** la sezione è interamente reagente fino al raggiungimento del momento di prima fessurazione; sia l'acciaio che il calcestruzzo si mantengono in campo elastico.
- **Fase 2:** superato il momento di fessurazione, la sezione si parzializza con comportamento ancora elastico dell'acciaio e calcestruzzo. Questa fase corrisponde a quella situazione tipica di sezione parzializzata con stato di tensione lineare che è di riferimento per le verifiche della tensione normale con il **metodo n.**

- Fase 3:** Nella sezione si supera il limite elastico dell'acciaio con ampia deformazione dello stesso ( $\epsilon_s > \epsilon_{sy}$  = deformazione di snervamento dell'acciaio) e conseguente rottura per schiacciamento del calcestruzzo al lembo compresso. Solo nel caso di alte percentuali di armatura presenti nella sezione, il calcestruzzo può entrare in fase anelastica, fino a schiacciamento, senza che l'acciaio raggiunga lo snervamento.

**Osservazioni utili: rette limite – CAMPI LIMITE**

Si può fare riferimento ad una generica retta limite nella condizione ultima  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ . Consideriamo una sezione rettangolare in c.a. inflessa e determiniamo alcuni valori dei coefficienti adimensionali introdotti, in particolare il coefficiente  $\xi = x_c/d$  che è legato dalla posizione di  $n$ .

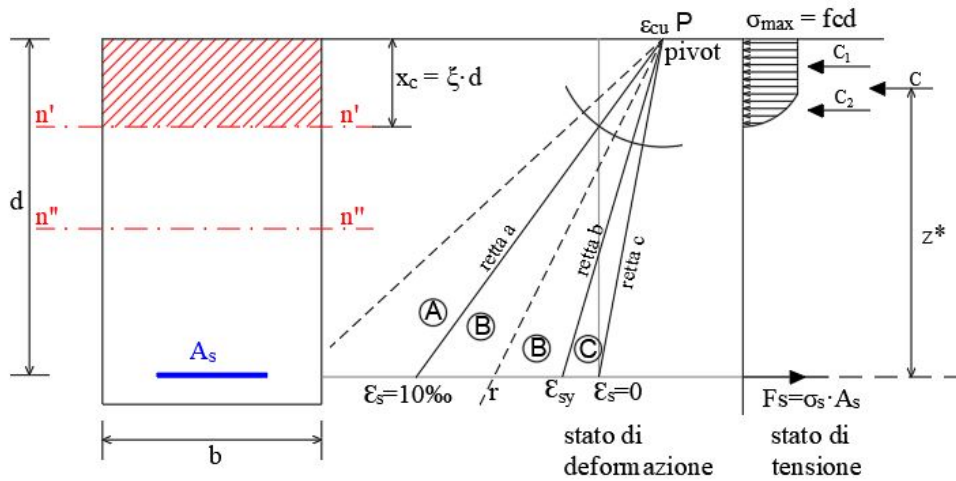


Figura 2.1 -rette limite

Nell’ambito dello studio di una sezione inflessa (o pressoflessa), quindi soggetta a tensioni normali, poiché abbiamo imposto le condizioni di SLU si ha per una deformazione che nel calcestruzzo compresso raggiunge il valore assoluto  $\epsilon_{cu} = 3.5\%$ , considerando il punto P come “pivot” di un fascio di **rette limite** possiamo individuare una serie di “capi limite”. Nella figura abbiamo individuato tre retti limiti su cui possiamo porre l’attenzione: rette limite a, b e c.

In funzione della posizione della generica retta di deformazione ultima (nella Figura 2.1 la retta “r”) si può intuire di trovarci in un certo campo limite caratteristico sia della sollecitazione che della modalità di rottura anche in relazione al quantitativo di armatura presente.



N. B. : Con riferimento alla deformazione di curvatura “ $\Theta$ ” si può calcolare l’inclinazione della retta limite al valore della curvatura.

Retta limite “a”  $\rightarrow \varepsilon_{cu}=3.5 \text{ ‰}$ ;  $\varepsilon_s = 10 \text{ ‰}$

$\varepsilon_s > 10 \text{ ‰}$  CAMPO A flessione (pressoflessione) C<sub>1</sub>

$$\xi_a = \frac{x_c}{d} = \frac{|\varepsilon_{cu}|}{|\varepsilon_{cu}| + \varepsilon_s} = 0.259 \quad (3.1)$$

Per questa condizione di rottura, la posizione di n è circa  $\frac{1}{4}$  dell’altezza utile d dal bordo più compresso. Per valori più bassi di  $\xi_a = 0.259$  ovviamente l’asse neutro si avvicina al bordo più compresso.

Il campo di deformazioni che prendono valori di  $\xi < \xi_a$  è prevalentemente collegato a stati di sollecitazione di flessione semplice (senza poter escludere particolari condizioni di pressoflessione): CAMPO A.

In genere, si può affermare che diminuendo l’ampiezza della zona compressa, quindi considerando rette limite ultime via via più posizionate verso le rette “b” e “c” la sollecitazione di riferimento è quella di pressoflessione.

Retta limite “b”  $\rightarrow \varepsilon_{cu}=3.5 \text{ ‰}$ ;  $\varepsilon_s = \varepsilon_{sy}$  sollecitazione di flessione e pressoflessione CAMPO B.

$$\xi_b = \frac{x_c}{d} = \frac{|\varepsilon_{cu}|}{|\varepsilon_{cu}| + \varepsilon_{sy}} = 0.652 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{sy} * E = f_{yd} \quad (f_{yd} \cong 390 \frac{N}{mm^2} \text{ per B40C}) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{sy} = \frac{390 \frac{N}{mm^2}}{2.1 \times 10^5 N/mm^2} \cong 1.86 \text{ ‰} \quad (3.4)$$

Nel caso della retta limite “b” la posizione dell’asse neutro si trova quindi a circa il 65% dell’altezza utile d dal bordo compresso.

Retta limite “c”  $\rightarrow \varepsilon_{cu} = 3.5 \text{ ‰}$   $\varepsilon_{sy} > \varepsilon_s \geq 0$  CAMPO C sollecitazione prevalente pressoflessione.

$$\xi_c = 1 \quad (x_c = d) \quad (3.5)$$

### Limitazioni armature (TRAVI)

Se si fa riferimento ai seguenti coefficienti:

- (percentuale di armatura tesa)  $\rho = \frac{A_s}{b \cdot h}$
- (percentuale di armatura compressa)  $\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot h}$

Deve essere definito un rapporto tale che:

$$\frac{A_s}{b \cdot h} \leq \frac{A_s'}{b \cdot h} + \frac{3.5}{f_{yk}} \quad (3.6)$$

Quindi  $(\rho - \rho') \leq 0.778\%$  nel caso di acciaio B450C

per la sezione in Figura 1.2 armata con  $A_s = 4\phi 16$  e  $A_s' = 2\phi 16$

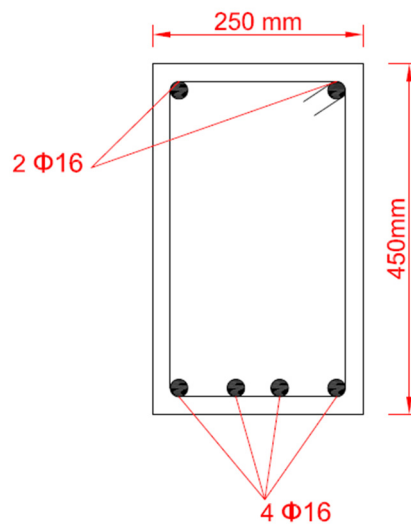


Figura 3.2

Si ricava che:

$\rho = 0.72\%$ ;  $\rho' = 0.36\%$  quindi è verificata la limitazione:  $(\rho - \rho') \leq 0.778\%$  (c.d.d.)

N.B.: l'indicazione di normativa (presenti nel CAP 7 delle NTC) impone implicitamente che la profondità dell'asse neutro non sia eccessiva con ampia duttilità della sezione.

**ESEMPIO** Si può scrivere dall'equilibrio alla traslazione delle forze interne nella sezione inflessa con il metodo dello "stress block" (per  $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy}$ ) che:

$$(b \cdot 0.8x_c) \cdot f_{cd} + A'_s \cdot f_{yd} - A_s \cdot f_{yd} = 0 ; \xi = \frac{x_c}{d}$$

$$(b \cdot 0.8\xi \cdot d) \cdot f_{cd} + A'_s \cdot f_{yd} - A_s \cdot f_{yd} = 0$$

$$b \cdot 0.8\xi \cdot d \cdot f_{cd} = A_s \cdot f_{yd} - A'_s \cdot f_{yd} = 0$$

Da cui:

$$\xi = \frac{1}{0.8} \left( \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} - \frac{A'_s \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} \right) = \frac{1}{0.8} (\omega_s - \omega'_s) = 1.25(\omega_s - \omega'_s) \quad (3.7)$$

Per la condizione di uguaglianza fra il 1° e il 2° membro della Formula 1.6 ponendo:

$(b \cdot d) \cong (b \cdot h)$  si ricava:

$$\xi = \frac{x_c}{d} = 1.25 \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \cdot \frac{3.5}{f_{yk}} \quad (3.8)$$

$$\xi = \frac{x_c}{d} \leq \frac{3.8}{f_{cd}} \quad (3.9)$$

Considerando le seguenti classi di cls, si ottengono i seguenti valori di  $\xi$ :

Tabella 3.1

classi cls	C 20/30	C 25/30	C 28/35
fcd	11.30	14.17	15.87
N/mm <sup>2</sup>			
$\xi \leq$	0.335	0.268	0.239

**Ricordando che il valore di  $\xi$  per la retta "b" limite del campo B è pari a:**

$\xi_b = 0.652$ , risulta che la normativa, almeno in zona sismica, impone alla deformazione dell'acciaio nelle travi inflesse  $\varepsilon_s > \varepsilon_y$  comportando una limitata profondità dell'asse neutro.

**CAMPO LIMITE B: 10 ‰  $> \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy}$**

I coefficienti adimensionali  $\beta_1$  e  $\beta_2$  sono correlati al coefficiente  $\xi = X_c/d$  ciò in generale.

Si noti che nel campo B i coefficienti  $\beta_1$  (coefficiente di totalità) e  $\beta_2$  (coefficiente di posizione) hanno valori costanti indipendentemente dal valore di  $\xi$ .

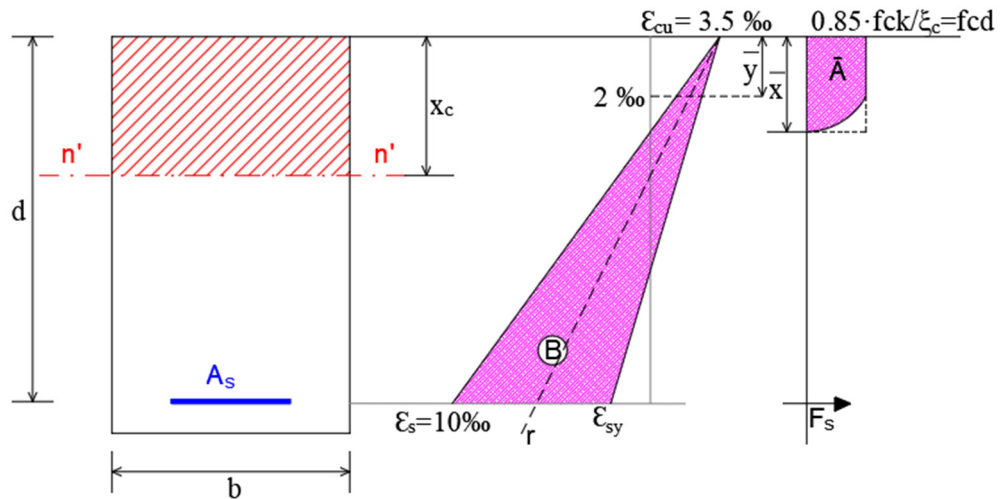


Figura 3.3- campo limite B

Considerando una qualsiasi retta “r” nel campo limite B si ha:

$$\bar{A} = fcd \cdot \left[ \bar{y} + \frac{2}{3} \cdot (\bar{x} - \bar{y}) \right] \quad (3.10)$$

$$\bar{y} = \frac{1.5}{3.5} \cdot \bar{x} \quad (3.11)$$

Da cui:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= fcd \cdot \left[ \frac{1.5}{3.5} \cdot \bar{x} + \frac{2}{3} \cdot \left( \bar{x} - \frac{1.5}{3.5} \cdot \bar{x} \right) \right] = \\ &fcd \cdot \bar{x} \left[ \frac{1.5}{3.5} + \frac{2}{3} \cdot \left( 1 - \frac{1.5}{3.5} \right) \right] \cong 0.81 \cdot fcd \cdot \bar{x} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Essendo:

$$\beta_1 = \frac{\text{(valore della forza di compressione effettiva C)}}{fcd \cdot b \cdot x_c} \quad (3.13)$$

nel caso in esame il valore è:

$$\beta_1 = \frac{\bar{A}}{\text{area rettangolo}} = 0.810 \text{ (c. d. d.)} \quad (3.14)$$

inoltre il coefficiente  $\beta_2 = 0.416$  rappresenta il rapporto fra la distanza di C dal bordo più compresso e la posizione dell'asse neutro.

### 3.3 Verifica allo SLU di una sezione inflessa

#### Metodo semplificato “stress block”

Facciamo riferimento ad un esempio: sezione rettangolare a doppia armatura  $A_s, A'_s$ .

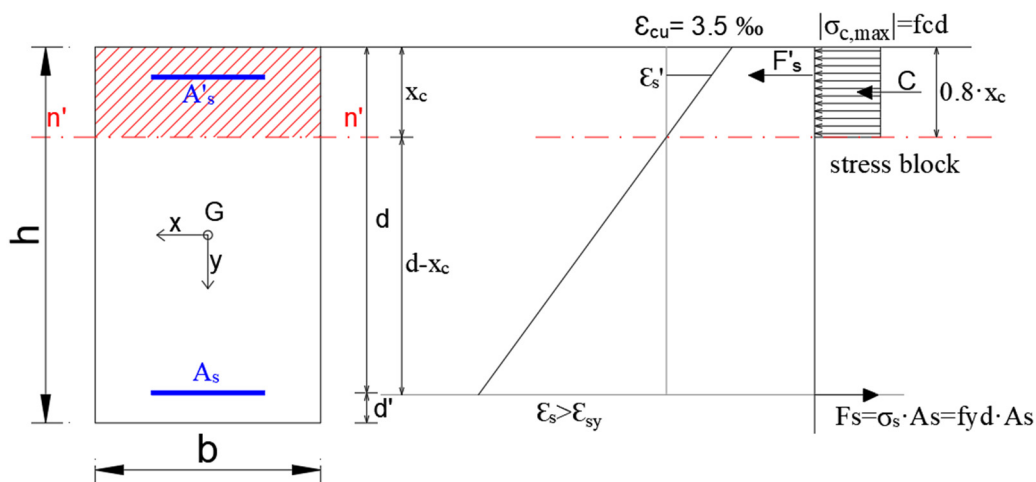


Figura 3.4 – stress block

Il metodo considerato dello “stress block” in sostituzione della effettiva distribuzione delle tensioni nel calcestruzzo compresso, è giustificato e valido per deformazioni  $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy}$ . Infatti in tal caso le tensioni nell'acciaio è nota “ $f_y d$ ” e non dipende dalla deformazione dell'acciaio. Inoltre si è visto, in precedenza, che la distribuzione di tensioni normali di compressione nel cls (CAMPI A, B e C) si può esprimere con:

$$C \cong 0.80 \cdot f_{cd} \cdot x_c \cdot b \quad (3.15)$$

Essendo il coefficiente di totalità  $\beta_1$  poco diverso da 0.80 nei campi suddetti.

La normativa tecnica (NTC 18) suggerisce un'adesione dello “stress block” senza un peso concentrato; in effetti nelle figure presenti nella NTC-Cap 4 si fa riferimento

comunque ad un asse neutro che parzializza la sezione. Vedremo più avanti alcuni commenti utili per capire quanto indicato dalle normative.

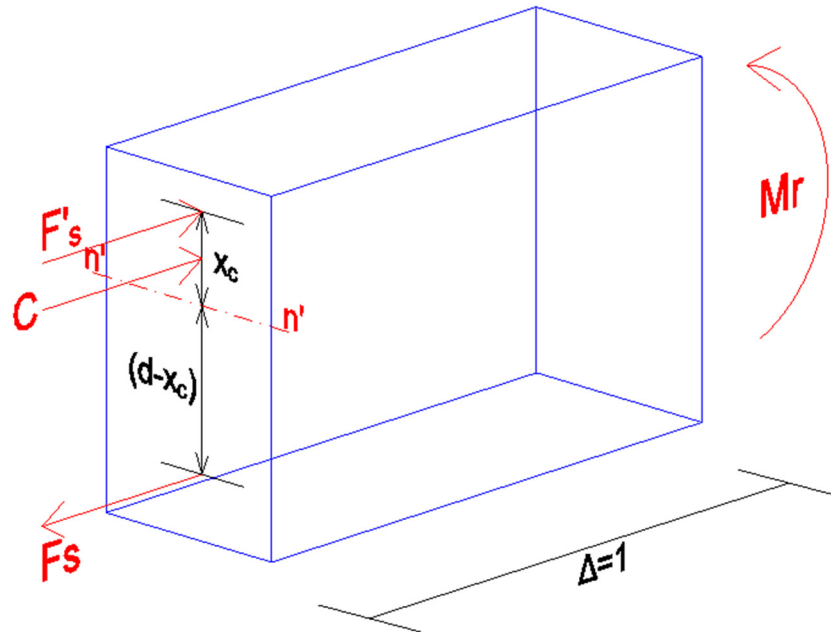


Figura 3.5

Con i riferimenti di Figura 2.5, si hanno le seguenti forze interne sulla sezione:

$$C = 0.8 \cdot f_{cd} \cdot x_c \cdot b \quad (3.16)$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s \quad (3.17)$$

$$F'_s = f_{yd} \cdot A'_s \quad (3.18)$$

Per la posizione dell'asse neutro si può procedere attraverso le seguenti equazioni di equilibrio alla traslazione:

$$f_{yd} \cdot A'_s + 0.8 \cdot f_{cd} \cdot x_c \cdot b - f_{yd} \cdot A_s = 0 \quad (3.19)$$

Da cui:

$$(0.8 \cdot f_{cd} \cdot b) \cdot x_c = f_{yd} \cdot (A_s - A'_s) \quad (3.20)$$

e:

$$x_c = \frac{f_{yd}}{0.8 \cdot b \cdot f_{cd}} \cdot (A_s - A'_s) \quad (3.21)$$

N.B.: nel calcolo rigoroso l'ipotesi di armatura compressa  $A'_s$  va controllata. È infatti improbabile che l'armatura compressa sia snervata  $\sigma'_s = f_{yd}$  poiché se l'armatura

compressa  $A'_s$  è uguale a quella tesa, si avrebbe l'assurdo che l'asse neutro avrebbe una profondità nulla e quindi non ci sarebbe bisogno di calcestruzzo compresso per l'equilibrio della Formula 3.19.

Nel calcolo allo SLU di sezione inflessa ad armatura simmetrica l'analisi deve essere rigorosa senza assumere  $\sigma'_s = f_{yd}$  ma  $\sigma'_s = E_s \cdot \epsilon'_s$  la Formula 1.19 diventa:

$$E_s \cdot \epsilon'_s \cdot A'_s + 0.8 \cdot f_{cd} \cdot x_c \cdot b - f_{yd} \cdot A_s = 0 \quad (3.22)$$

Definita la profondità dell'asse neutro con la Formula 3.21 è noto anche la distribuzione dello stato di deformazione  $\epsilon(y)$  e tensionale completo.

Dall'equilibrio alla rotazione del concio di trave in Figura 3.5 si ricava il momento resistente  $M_r$  per la sezione:

$$F'_s \cdot (x_c - d') + C \cdot (x_c - 0.4 \cdot x_c) + F_s(d - x_c) - M_r = 0 \quad (3.23)$$

In definitiva si ha:

$$M_r = f_{yd} \cdot A'_s(x_c - d') + C \cdot 0.6 \cdot x_c + F_s \cdot (d - x_c) \quad (3.24)$$

La verifica si esegue quindi controllando la disuguaglianza:

$$M_r \leq M_{soll} \quad (3.25)$$

Si ricorda che il  $M_{soll}$ . È quello che si può ottenere con un calcolo elastico lineare per le condizioni di carico presente allo SLU espresso col le combinazioni delle azioni di peso proprio, pesi permanenti e accidentali moltiplicati per i coefficienti maggiorativi  $\gamma_G, \gamma_Q$  previsti dalle Norme Tecniche (NTC 18).

### 3.4 ESERCIZIO- SLU di sezioni a "T" inflesse

Come esempio applicativo si esamina la sezione di un travetto di solaio in latero-cemento con riferimento ai dati geometrici e dei materiali seguenti Figura 3.6:

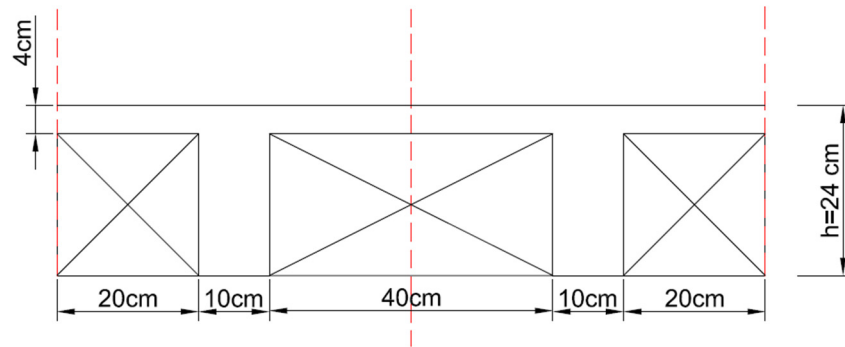


Figura 3.6

-Cls classe C 25/30

$$f_{cd} = \frac{0.86 \cdot 25}{1.5} = 14.17 \text{ N/mm}^2$$

-Acciaio B450C

$$f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yd} \cong 390 \text{ N/mm}^2$$

$$E_s = 2.10 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

Si determina il valore del momento resistente  $M_r$  in campata del singolo travetto a T". Si considera  $A_s = (2\text{Ø}12) = 226 \text{ mm}^2$

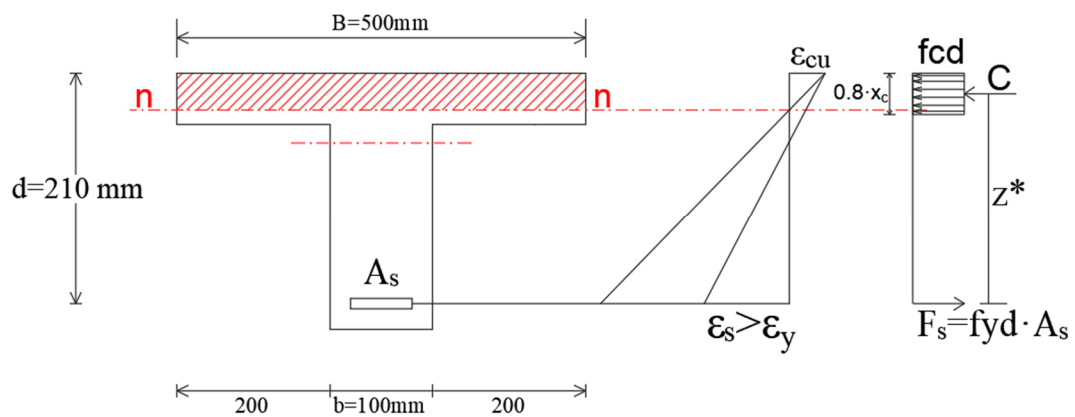


Figura 3.7

Nel caso di sezione a "T" l'asse neutro può essere collocato nella soletta o l'interno dell'anima della sezione.



Si ipotizza in prima approssimazione che l'asse neutro sia interno alla sezione nella soletta n<sub>1</sub>-n<sub>1</sub> di Figura 3.7.

Dall'equilibrio traslazione dalle forze interne si ha:

$$C - F_s = 0 \Rightarrow f_{cd} \cdot (0.8 \cdot x_c) \cdot B = f_{yd} \cdot A_s \quad (3.26)$$

Da cui:

$$x_c = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0.8 \cdot B \cdot f_{cd}} \quad (3.27)$$

Quindi:

$$x_c = \frac{226 \text{ mm}^2 \cdot 390 \text{ N/mm}^2}{0.8 \cdot 500 \text{ mm} \cdot 14.17 \text{ N/mm}^2} \cong 15.6 \text{ mm} < s = 40 \text{ mm} \quad (3.28)$$

Quindi l'asse neutro taglia la soletta e l'ipotesi iniziale è valida.

Il valore del momento resistente M<sub>r</sub> di progetto della sezione è:

$$M_r = f_{yd} \cdot A_s \cdot z^* = 390 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 226 \text{ mm}^2 \cdot (d - 0.4x_c) = 17.95 \text{ KNm} \quad (3.29)$$

### 3.5 Progetto dell'armatura per sezione inflessa

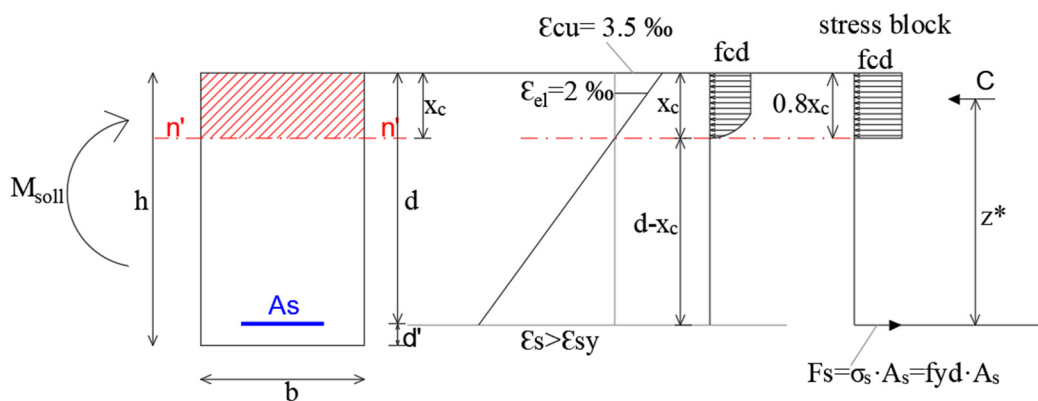


Figura 3.8

Con riferimento alla Figura 2.8 si evince che la condizione SLU usuale di flessione semplice (retta) per una sezione (ad esempio rettangolare) in C.A. è quella di  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$  e  $\epsilon_s > \epsilon_{sy}$ .

Per quanto già ricordato in precedenza, alla distribuzione di tensioni normali  $\sigma_c$  sulla parte di sezione reagente di cls (zona compressa), si può utilizzare uno “stress block” che semplifica l’operatività sia per la verifica che per il progetto allo SLU.

Si noti che il momento resistente per la sezione di Figura 3.8 è dato da:

$$M_r = F_s \cdot z^* \quad (3.30)$$

Con  $z^*$  = braccio della coppia interna

Si ha che:

$$z^* = \left( d - \frac{0.8 \cdot x_c}{2} \right) = d - \frac{0.8}{2} \cdot \xi \cdot d = d \left( 1 - \frac{0.8}{2} \cdot \xi \right) \quad (3.31)$$

Se in prima approssimazione considerassimo per  $\xi=0.259$  che il coefficiente associato come già visto alla retta limite “a” di separazione fra i campi limite A e B otteniamo:

$$z^* = d \cdot (1 - 0.4 \cdot 0.259) \cong 0.9 \cdot d \quad (3.32)$$

L'espressione è sufficientemente corretta per alti valori di  $\xi$  per  $\varepsilon_s > \varepsilon_{sy}$ . Questo risultato ci permette di avere a disposizione un'espressione molto semplificata per il progetto dell'armatura tesa nelle sezioni inflesse (N.B. nel caso di armatura A's anche in compressione la Formula 3.32 è ancora adottabile perché sufficientemente corretta):

$$M_r = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d \cdot 0.9) \quad (3.33)$$

E ponendo  $M_r$  pari al  $M_{soll}$ :

$$A_s = \frac{M_r}{0.9 \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{[F \cdot L]}{[L] \cdot [F \cdot L^{-2}]} = [L^2] \quad (3.34)$$

Si noti che la Formula 3.34 è formalmente identica alle espressioni già determinate per il progetto di armatura in campo elastico dove derivano  $\sigma_s$  al denominatore.

La formula 3.34 permette di definire con semplicità la distribuzione delle armature longitudinali di una trave, costruendo il diagramma del momento resistente  $M_r$  dell'armatura tesa che deve includere il diagramma del momento sollecitante.

### **3.6 Ulteriori considerazioni sui campi di deformazione limite – tensioni normali in sezioni in C.A.**

Si faccia riferimento alla Figura 3.9 seguente dove è presentata una sezione rettangolare a doppia armatura con vari stati di deformazione allo SLU.

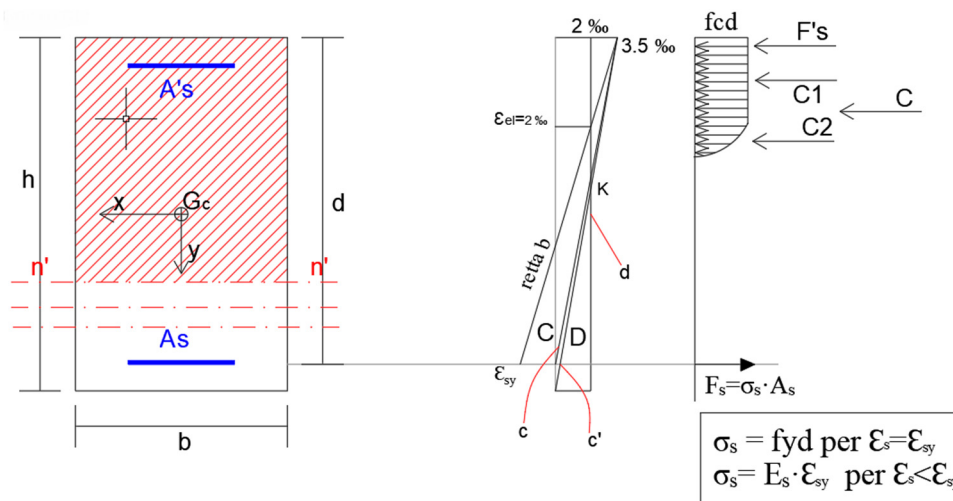


Figura 3.9

Con riferimento allo stato di deformazione di Figura 3.9 si vede che le rette limite definiscono dei nuovi campi limite oltre a quelli che abbiamo già introdotto per i problemi di flessione semplice e composta (retta) che inducono tensioni normali sulle sezioni. Sempre con riferimento al punto di “Pivot” P, dalla retta limite “b” si passa alle rette limite “c” e “c'” definiamo il campo C e C'. Abbiamo già introdotto questo campo che è caratterizzato da  $\epsilon_s < \epsilon_{sy}$  e posizione dell'asse neutro piuttosto bassa da  $n_1 - n_1$  a  $x_c = d$  (o addirittura  $x_c = h$  asse neutro tangente alla sezione). La retta limite P-Z incontra la retta parallela alla fondamentale di lettura ( $\epsilon = 0$ ) per  $\epsilon_c = 2 \text{‰}$  nel punto K che è un altro punto cosiddetto “pivot” per un fascio di rette di deformazione che rappresentano una condizione limite ultima di deformazione con sezione totalmente reagente: cls compresso e armature  $A_s$  e  $A'_s$  anch'essa compressa.

Si veda come esempio, per maggior chiarezza la Figura 3.10 che visualizza una condizione limite ultima (SLU) di pressoflessione per tensioni normali su una sezione rettangolare.

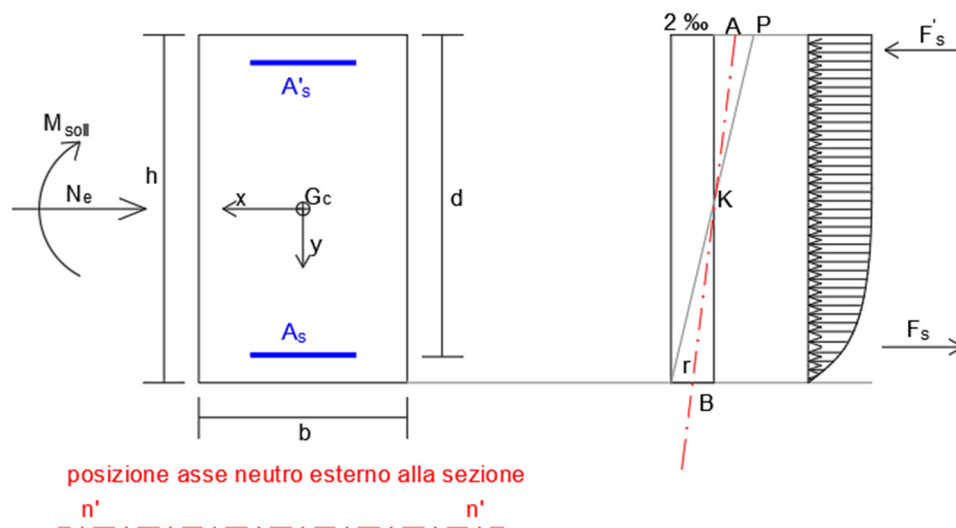


Figura 3.10

In alcune situazioni di pressoflessione (N+M) per condizioni di eccentricità limitata la sezione può risultare totalmente compressa.

In tali condizioni le rette limite non hanno più come “pivot” il punto “P” ma lo stato deformativo minimo per la parte di cls compresso deve ridursi di conseguenza alla posizione esterna dell’asse neutro sino alla situazione di deformazione costante  $\epsilon_c = 2\text{‰}$  con la posizione dell’asse neutro teoricamente all’infinito. Quindi nel caso di forze normali semplici di compressione, la deformazione limite per il cls e l’armatura non deve superare il  $2\text{‰} = \epsilon_c = \epsilon_s$ .

si vedrà in seguito come costruire diagrammi di interazione M-N che rappresenta la visualizzazione di condizioni ultime espresse dalle rette limite.

### 3.7 Ulteriori considerazioni sul progetto di sezioni inflesse

Come già presentato nell’analisi in campo elastico, il progetto di sezione inflesse anche allo SLU riguarda l’altezza della sezione ed il quantitativo di armatura tesa. Quindi in prima approssimazione l’armatura compressa si può trascurare, il problema si riduce ad avere solo due incognite.

Dall’equazione di equilibrio alla rotazione intorno al baricentro dell’armatura tesa, si ha:

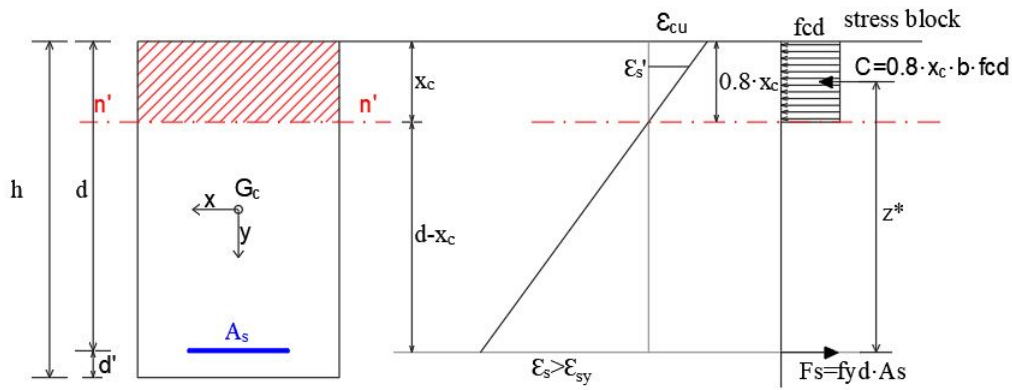


Figura 3.11

$$C \cdot z^* = 0.8 \cdot x_c \cdot b \cdot f_{cd} \cdot (d - 0.4 \cdot x) = M_r \geq M_{soll} \quad (3.35)$$

Dalla Formula 1.35 si ricava:

$$d \geq r^* \cdot \sqrt{\frac{M_{soll}}{b}} \quad (3.36)$$

Con:

$$r^* = \sqrt{\frac{1}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \xi \cdot (1 - 0.4 \cdot \xi)}} \quad (3.37)$$

$$\xi = \frac{x_c}{d} \quad (3.38)$$

Pertanto per una particolare classe di cls (C20/25; C30/35, etc.), nota la larghezza della sezione assegnata la posizione dell'asse neutro,  $\xi$ , dalle Formula 2.36 si valuta l'altezza utile  $d$ .

Infine per la determinazione di  $A_s$  con l'equilibrio alla rotazione intorno alla  $C$ , si determina la formula già introdotta.

### 3.8 Esercizio: verifica allo SLU di sezioni in C.A. inflessa (flessione retta)

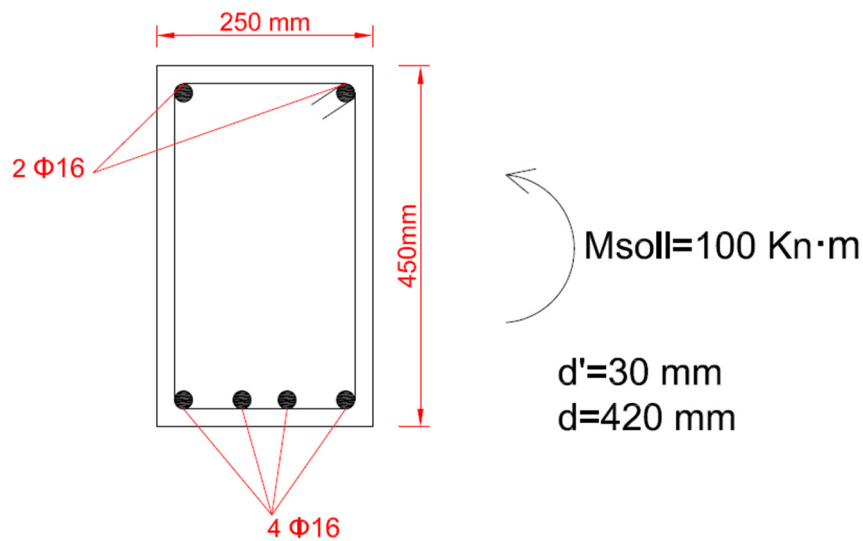


Figura 3.12

Dati:

-calcestruzzo C20/25

$$f_{cd} = \frac{20}{1.5} \cdot 0.85 = 11.30 \text{ N/mm}^2 \quad (3.39)$$

(riferimento NTC-punto 4.1.2.1)

$$\gamma_c = 1.5 ; \alpha_{cc} = 0.85 f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2 \quad (3.40)$$

-Acciaio tipo B450C → tensione di snervamento di progetto  $f_{yd}$

$$f_{yd} = 390 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ con } \gamma_s = 1.15 \quad (3.41)$$

Con riferimento alla lezione svolta, si procede con riferimento alle equazioni adimensionali seguenti, per la soluzione dell'esercizio:

- equazione equilibrio alla rotazione

$$\xi \cdot \beta_1 \cdot (1 - \beta_2 \cdot \xi) + w'_s \cdot K' \cdot (1 - d') = \mu_{sez} \quad (3.42)$$

Essendo il momento resistente adimensionale

$$\mu_{sez} = \frac{M_r}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \quad (3.43)$$

- equazione di equilibrio alla traslazione

$$\xi \cdot \beta_1 + w'_s \cdot K' - w_s \cdot K = 0 \quad (3.44)$$

- equazione di congruenza

$$\xi = \frac{x_c}{d} = \frac{|\epsilon_{cu}|}{|\epsilon_{cu}| + \epsilon_s} \quad (3.45)$$

Con riferimento alle armature presenti nella sezione si ha:

-( $A_s = 804 \text{ mm}^2$ );  $w_s$  (rapporto meccanico di armatura tesa)

$$\frac{A_s \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} \cong 0.860 \quad (3.46)$$

-( $A'_s = 402 \text{ mm}^2$ );  $w'_s$  (rapporto meccanico di armatura compressa)

$$\frac{A'_s \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} \cong 0.132 \quad (3.47)$$

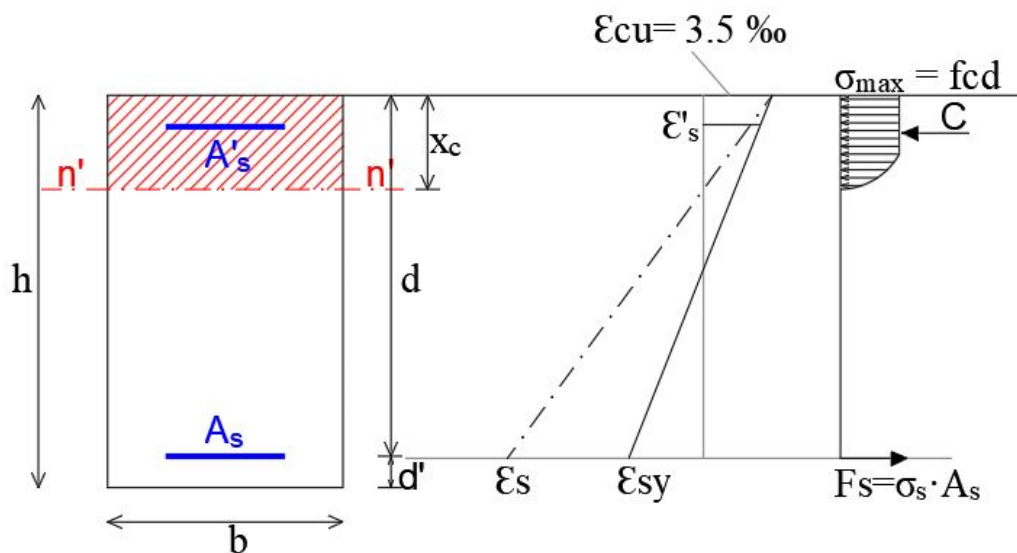


Figura 3.13

Siano:

$$\beta_1 = \frac{\int_0^{x_c} \sigma_c(y) \cdot b \cdot dy}{f_{cd} \cdot b \cdot x_c}; \quad \beta_2 \cdot x_c = (\text{posizione della risultante } C) \quad (3.48)$$

Nella Formula 1.44 possiamo porre per le ipotesi di retta limite “a” che:

$$K'_1 = 1; \quad K_1 = 1; \quad w'_s = 0.132; \quad w_s = 0.260$$

Da cui:

$$\xi \cdot \beta_1 + 0.132 + .0260 = 0 \quad (3.49)$$

Assumendo  $\varepsilon_s = \varepsilon_s^* = 15 \text{ ‰}$  si ricava che il coefficiente  $\xi = 0.189$  (cioè l'asse neutro è collocato a circa 79 mm dal bordo più compresso).

Con riferimento al diagramma parabola rettangolo delle tensioni nel cls, il coefficiente di totalità  $\beta_1 \cong 0.78$ .

Quindi dalla Formula 2.49 si ricava che il primo membro è circa nullo e quindi il valore assunto di  $\varepsilon_s^*$  può essere considerato sufficientemente corretto.

Valutando il coefficiente  $\beta_2$  attraverso la posizione della risultante delle forze di compressione, si determina il  $\mu_{sez}$  adimensionale della Formula 1.42 e quindi il  $M_{res} \cong 129 \text{ KNm} > M_{soll}$ .

### 3.9 Verifica sezione rettangolare (pressoflessione) – asse neutro interno alla sezione

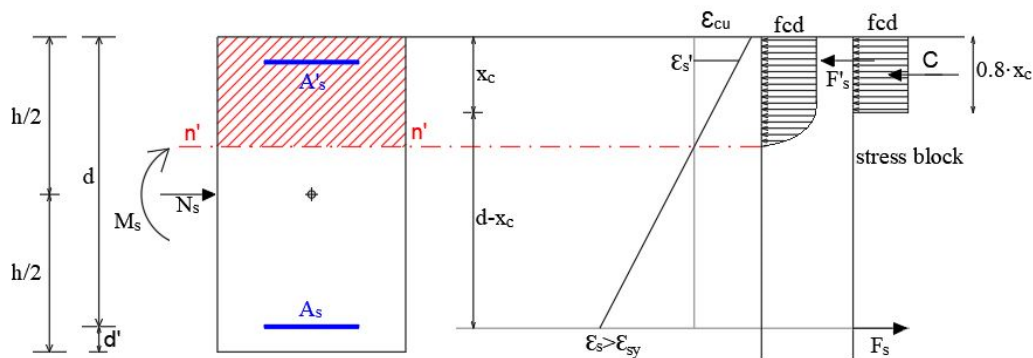


Figura 2.14

Nel caso di pressoflessione si opera esattamente come per la flessione: si individua la condizione di deformazione ultima  $\varepsilon_{cu}$  per il cls ; nell'ipotesi che lo stato deformativo presenti una  $\varepsilon_s > \varepsilon_{sy}$  (Figura 2.14) si determinano le forze interne nel modo seguente :

$$C = 0.8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x_c \quad (2.50)$$

$$F'_s = f_{yd} \cdot A'_s \quad (2.51)$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s \quad (2.52)$$

(considerando in prima approssimazione  $\varepsilon'_s > \varepsilon_{sy}$ )



Per l'equilibrio alla traslazione di un concio di trave si ha:

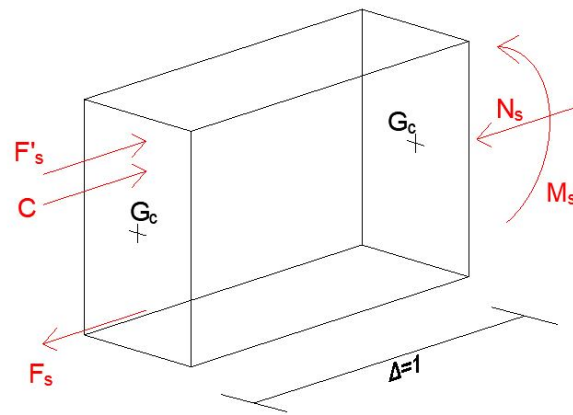


Figura 2.15

$$0.8 \cdot b \cdot x_c \cdot f_{cd} \cdot + A'_s \cdot f_{yd} - A_s \cdot f_{yd} = N_s \quad (3.53)$$

Da cui:

$$x_c = \frac{N_s + A_s \cdot f_{yd} - A'_s \cdot f_{yd}}{0.8 \cdot b \cdot f_{cd}} \quad (3.54)$$

Dall'equilibrio alla rotazione intorno al baricentro  $G_c$  si ricava immediatamente il momento resistente della sezione:

$$\begin{aligned} M_r &= C \left( \frac{h}{2} \cdot 0.4 \cdot x_c \right) + F'_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) + F_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) = \\ &= f_{cd} \cdot 0.8 \cdot b \cdot x_c \left( \frac{h}{2} - 0.4 \cdot x_c \right) + f_{yd} \cdot A'_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) + f_{yd} \cdot A_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) = \\ &= 0.8 \cdot x_c \cdot f_{cd} \left( \frac{h}{2} - 0.4 \cdot x_c \right) + f_{yd} \left( \frac{h}{2} - d' \right) \cdot (A_s - A'_s) \end{aligned} \quad (3.55)$$

Introducendo la (2.54) inserendola nella (2.55) si ottiene il valore di  $M_r = M_r(N_s)$  che è una funzione della sollecitazione  $N_s$ .

La verifica si risolve se vale la disequaglianza:

$$M_r(N_s) \geq M_s \quad (\text{c.d.d.}) \quad (3.56)$$

### 3.10 Verifica sezione rettangolare (pressoflessione) – asse neutro esterno alla sezione

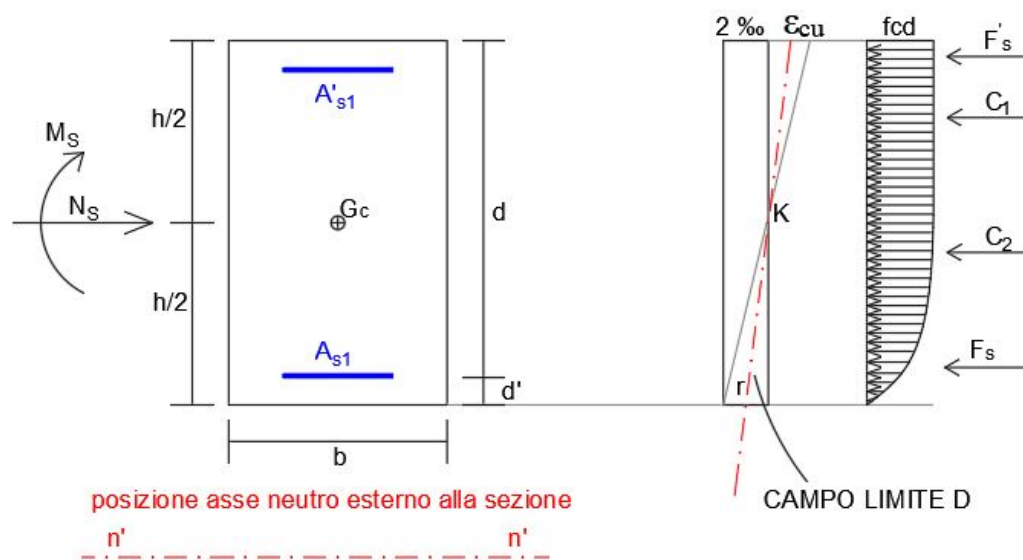


Figura 3.16

È evidente che se la sezione non è parzializzata e l'armatura inferiore è compressa, cioè  $x_c > d$ , allora il calcolo se impostato con il metodo generale di verifica allo SLU che abbiamo indicato nelle precedenti lezioni sulla verifica di sezioni inflesse.

Il procedimento prevede, in sintesi, che non si possa far riferimento ad uno “stress block” e che si debba riferirsi ad una retta di deformazione nel campo D.

Assumendo una retta limite, attraverso le equazioni di congruenza e di equilibrio alla traslazione si verifica la corretta scelta dello stato deformativo. Quindi si procede alla definizione delle forze interne e per l'equilibrio alla rotazione si determina il valore del momento resistente  $M_R = M_R(N_S)$ .

### 3.11 Meccanismi resistenti a taglio

a) Calcolo dello sforzo nell'armatura d'anima

Una fessura inclinata di  $\theta$  attraversata dalle armature trasversali aventi area singola  $A_{sw}$ , inclinazione  $\alpha$ , tensione  $\sigma_s$  e passo  $s$ .



$$V_w = \sigma_y \cdot A_{sw} \cdot \frac{z}{s} \cdot (\operatorname{ctg}\theta + \operatorname{ctg}\alpha) \cdot \operatorname{sen}\alpha \quad (3.61)$$

$$V_w = \sigma_{c,R} \cdot b \cdot \operatorname{sen}^2\theta \cdot [z \cdot (\operatorname{ctg}\theta + \operatorname{ctg}\alpha)] \quad (3.62)$$

b) Calcolo dello sforzo di compressione nel cls d'anima

Per l'equilibrio del nodo, si ha che le componenti reticolari si devono equilibrare:

$$\sigma_s \cdot A_{sw} \cdot \operatorname{sen}\alpha = (\sigma_c \cdot b_w \cdot s \cdot \operatorname{sen}\alpha) \cdot \operatorname{sen}\theta \quad (3.63)$$

Essendo:

$$\frac{V \cdot s}{z \cdot (\operatorname{ctg}\theta + \operatorname{ctg}\alpha)} = \sigma_s \cdot A_{sw} \cdot \operatorname{sen}\alpha \quad (3.64)$$

Si ricava:

$$V = \sigma_c \cdot b_w \cdot z \cdot (\operatorname{ctg}\theta + \operatorname{ctg}\alpha) \cdot \operatorname{sen}^2\theta \quad (3.65)$$

(Taglio resistente cls d'anima)

Da cui:

$$V = \frac{\sigma_c \cdot b_w \cdot z \cdot (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\theta)}{1 + \operatorname{ctg}^2\theta} \quad (3.66)$$

c) Calcolo dello sforzo nel corrente teso

Per calcolare la forza  $F_s$  dell'armatura longitudinale tesa si può scrivere l'equilibrio alla rotazione intorno al punto P del tronco di trave (Figura 2.17):

$$F_s \cdot z - V \cdot \left( a + \frac{z}{2} \cdot \operatorname{ctg}\theta \right) + (V \cdot \operatorname{ctg}\alpha) \cdot \frac{z}{2} = 0 \quad (3.67)$$

(Equilibrio alla rotazione del tronco di trave)

Da cui:

$$F_s = \frac{V}{z} \cdot \left[ a + \frac{z}{2} \cdot (\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\alpha) \right] = \frac{|M|}{z} + \frac{|V|}{2} \cdot (\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\alpha) \quad (3.68)$$

La (3.68) mostra come la forza di trazione  $F_s$  nel corrente teso della trave fessurata nella sezione alla distanza “a” dall’appoggio, debba essere calcolata in base al momento flettente agente nella sezione posta a distanza:

$$a + \frac{z}{2} \cdot (ctg\theta - ctg\alpha) \quad (3.69)$$

(Poiché nella collocazione della quantità  $F_s$  si può cadere nell’errore di collocare  $F_s$  a  $\pm \frac{s}{2}$ , per capire il caso più sfavorevole si deve assumere una traslazione orizzontale del diagramma del momento  $\Delta_x = \frac{z}{2} \cdot (ctg\theta - ctg\alpha) + \frac{s}{2}$ ).

### 3.12 Verifica delle armature longitudinali-REGOLA DELLO SCALARE

Con riferimento alla Figura 2.19, dall’equilibrio alla rotazione attorno al punto P si ricava per le forze di trazione  $F_s$  nell’armatura longitudinale il valore:

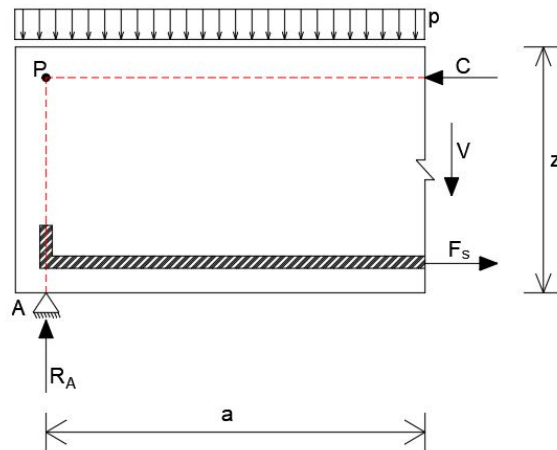


Figura 3.19

In assenza di fessurazione e di carico distribuito:

$$F_s = \frac{a}{z} \cdot V \quad (3.70)$$

In presenza di fessurazione e carico distribuito:

$$F_s = \frac{a}{z} \cdot (V + p \cdot \frac{a}{2}) \quad (3.71)$$

In presenza di fessurazione, per il meccanismo resistente a taglio si ha:

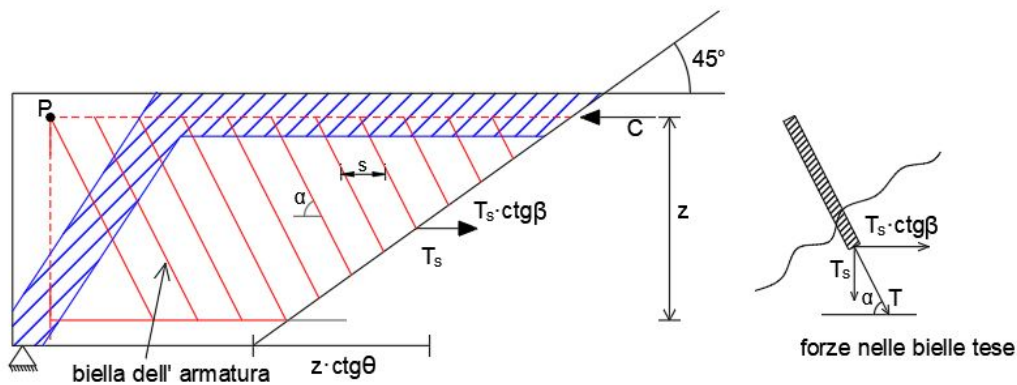


Figura 3.20

Si ipotizza che le fessure siano inclinate di  $\theta=45^\circ$  e che l'armatura trasversale d'anima sia uniformemente distribuita in modo tale da poter ritenere che la sua risultante sia applicata a metà delle fessure stesse.

Dall'equilibrio alla rotazione in P, si ha:

$$F_s \cdot z + T \cdot \text{ctg}\alpha \cdot \frac{z}{2} - T_s \cdot \left( a + \frac{z}{2} \cdot \text{ctg}\theta \right) = 0 \quad (3.72)$$

$$F_s = \frac{T_s}{z} \cdot (a + a_1) \quad (3.73)$$

$$a_1 = \frac{z}{2} \cdot (\text{ctg}45^\circ - \text{ctg}\alpha) = \frac{z}{2} \cdot (1 - \text{ctg}\alpha) \quad (3.74)$$

Dal confronto delle (3.70) e (3.73) si può notare che la forza di trazione  $F_s$  in una trave fessurata, valutata a distanza "a" dall'appoggio è uguale a quella della trave ritenuta non fessurata ad una distanza  $(a+a_1)$ .

Ne consegue che per un corretto calcolo dell'armatura longitudinale tesa occorre traslare il diagramma del momento della quantità  $a_1$ .

### 3.13 Considerazioni generali sul comportamento a taglio di elementi inflessi

La rottura per taglio è in realtà una rottura per l'azione combinata di flessione e taglio e, spesso, sforzo normale e torsione, la cui esatta valutazione è particolarmente complessa. Tale tipo di struttura risulta purtroppo particolarmente insidiosa, sia perché abbiamo la resistenza degli elementi strutturali al di sotto della resistenza a flessione, sia perché

riduce considerevolmente la duttilità degli elementi stessi, provocando a volte rotture repentine con caratteristiche di fragilità.

Va sottolineato il ruolo determinante delle armature trasversali ed in particolare delle staffe che, opponendosi al propagarsi delle lesioni inclinate, accrescono la duttilità degli elementi e permettono di controllare i fenomeni di crollo che risulterebbero repentini.

Il taglio, fin quando l'elemento in c.a. non è fessurato equilibrato dal sistema di tensioni principali che si sviluppano nel cls e le armature non partecipano particolarmente alla resistenza.

Nel momento in cui la tensione principale raggiunge in un punto la resistenza a trazione del cls, si ha la formazione di fessure pressoché ortogonali alle isostatiche di trazione, con una radicale redistribuzione degli sforzi interni.

Pur mantenendosi, sostanzialmente, ancora valido il modello di Mörsch, il taglio esterno  $V$  viene fronteggiato oltre che dalle armature trasversali fondamentalmente come aste tese, anche dal rilevante intervento di altri meccanismi resistenti.

### **3.14 Meccanismi resistenti a taglio di tipo secondario**

Secondo il modello di Mörsch si ha per tutta la trave un unico tipo di lesioni inclinate a  $45^\circ$  rispetto all'asse dell'elemento e la forza di taglio esterna viene interamente fronteggiata dall'armatura trasversale. In assenza di armatura trasversale, di conseguenza secondo lo schema del traliccio, l'elemento non potrebbe sopportare alcun incremento di carico al di là di quello di fessurazione. È stato invece provato sperimentalmente che il taglio esterno  $V$  viene fronteggiato oltre che dall'armature trasversali funzionanti come aste tese, anche dal rilevante intervento di altri meccanismi resistenti.

#### **a) Meccanismo arco-tirante**

In tutti gli elementi di cls, anche non armati a taglio, ma dotati di armatura longitudinale continua, si instaura un meccanismo resistente ad arco-tirante.

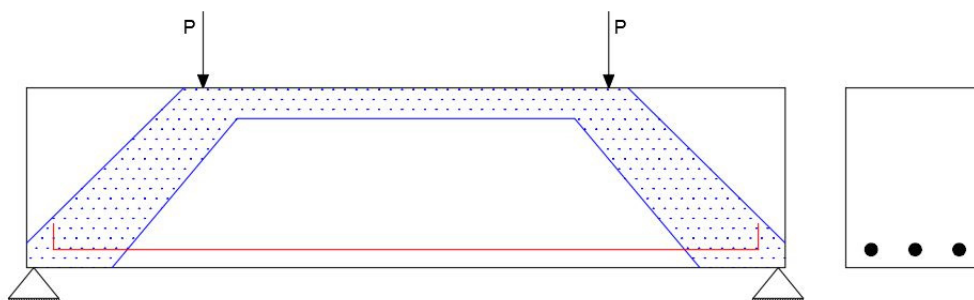


Figura 3.21

In realtà questo non è un vero e proprio meccanismo resistente a taglio nel senso che, non trasmette azioni taglianti da una sezione all'altra. Il suo effetto è quello di aumentare opportunamente la resistenza a taglio attraverso la riduzione del taglio effettivo della trave.

b) Effetto del corrente compresso

Un' aliquota del taglio esterno  $V$  viene assorbita dalla zona di conglomerato compresso. Il corrente compresso è soggetto a tensioni tangenziali non nulle e tensioni principali negative, e pertanto è in grado di assorbire una certa componente di sforzo tangenziale che è la risultante delle  $\tau$  sul cls integro.

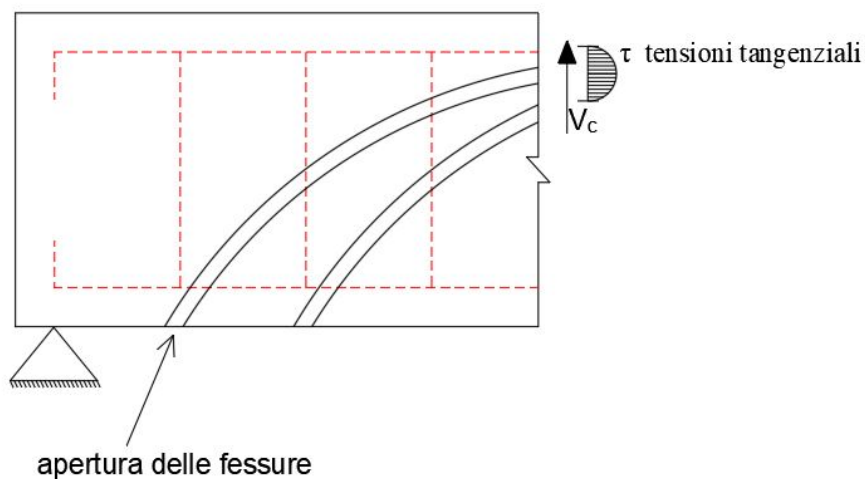


Figura 3.22



N.B.

È comunque necessaria una quantità minima di armatura di staffe per impedire che la fessurazione dovuta alle tensioni principali di trazione possa insidiarsi sotto il corrente compresso.

c) Effetto biella o spinotto

Le barre dell'armatura longitudinale offrono una certa resistenza alla deformazione trasversale cui sono soggetto attraverso la fessura.

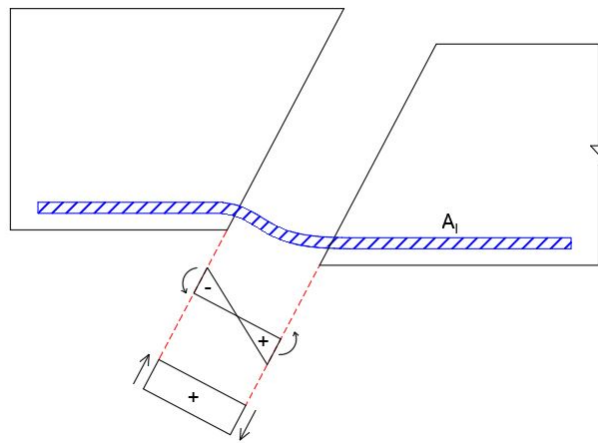


Figura 3.23

L'effetto biella, lungo una superficie di taglio si può sviluppare dai seguenti 3 meccanismi:

1- flessione delle barre d'armatura

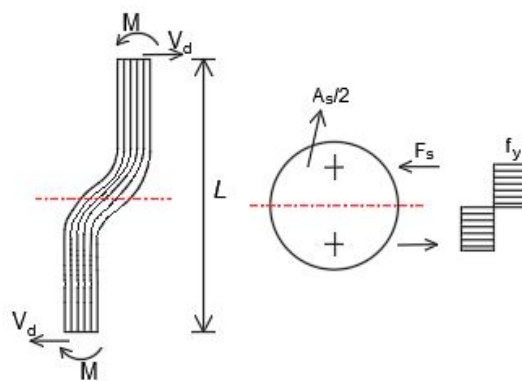


Figura 3.24

Nello studio dell'analisi limite per una sezione circolare si ha :

$$M_{lim} = \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot d_p \cdot f_y \cdot A_s \quad (3.75)$$

Con:

$d_p$  = diametro della sezione

$f_y$  = tensione di snervamento acciaio

$$M_{lim} = f_y \cdot \left( \frac{\pi \cdot R^2}{2} \right) \cdot 0.4244 \cdot R \quad \text{c. d. d.} \quad (3.76)$$

2- resistenza a taglio lungo le barre

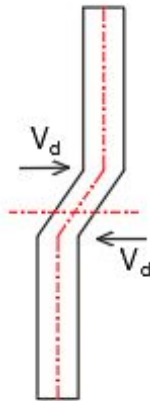


Figura 2.25

$$M_{lim} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (3.77)$$

(in assenza di tensioni normali dal criterio di Von Mises  $\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2 = f_y^2$ )

$$V_d = A_s \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (3.78)$$

### 3- Sgretolamento delle barre

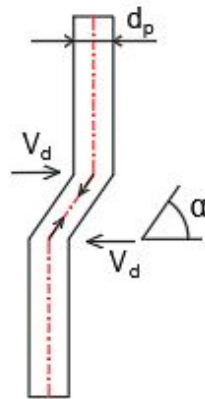


Figura 3.26

$$\frac{V_d}{\cos\alpha} = A_s \cdot f_y \quad (3.79)$$

N.B.

L'effetto biella nelle travi può rilevarsi dannoso perché tende ad innescare lesioni di distacco lungo l'armatura longitudinale.

d) Effetto ingranamento

L'effetto ingranamento è quel taglio che si trasmette attraverso una superficie lesionata in conseguenza dell'attrito degli inerti quando i due elementi separati della lesione tendono ad avere uno scorrimento relativo.

Il moto relativo crea su ciascuna delle facce separate dal taglio una tensione normale ( $\sigma$ ) ed una tensione tangenziale ( $\tau$ ).

L'effetto dell'ingranamento dipende esclusivamente dall'ampiezza della lesione, dal momento relativo parallelo alla lesione, dalla forma e dimensione e resistenza degli inerti.

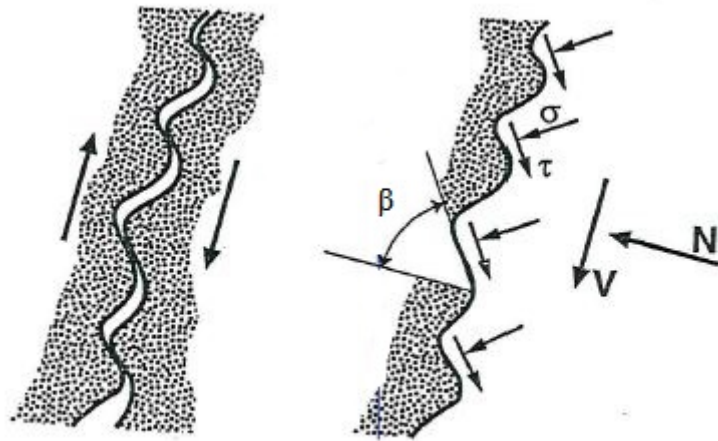


Figura 3.27

L'effetto ingranamento sembra possa trasmettere dal 33 % al 60% dell'azione tagliante verticale.

e) Effetto pettine o biella d'anima

Un'aliquota del taglio esterno viene portata dalle stesse bielle di conglomerato compresso che si evidenziano tra due lesioni successive. L'effetto di incastro di bielle di cls (o effetto pettine) deriva dall'incastro dei denti di cls che si formano tra fessure successive nel corrente compresso. Tali denti comprimendosi come mensole incastrate hanno la possibilità di assorbire forze di pressoflessione e taglio.

L'effetto è più significativo per le travi basse nelle quali i denti sono più lontani.

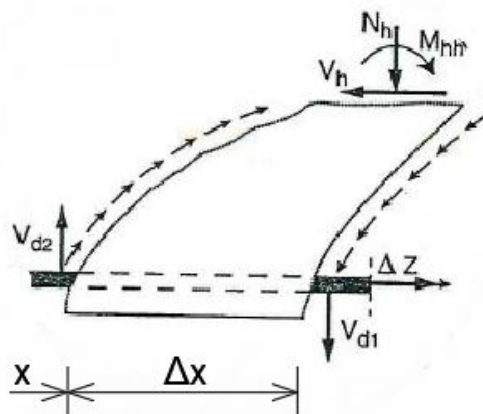


Figura 3.28

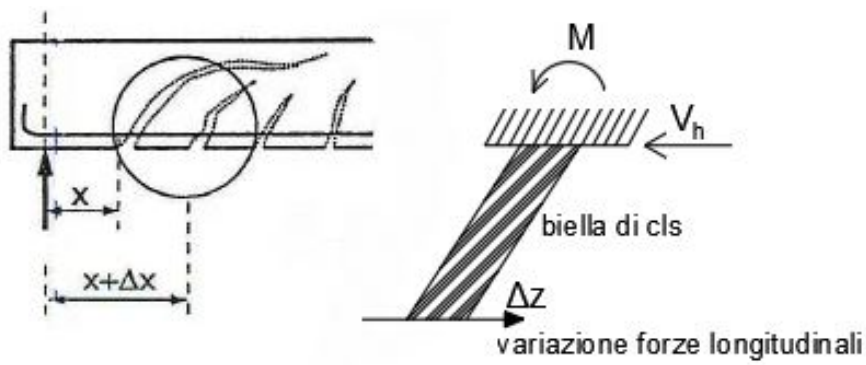


Figura 3.29

Alla luce di quanto esposto, si può concludere che il taglio esterno  $V$  risulta assorbito oltre che dall'armatura trasversale, anche dai meccanismi resistenti prima descritti.

$$V = V(A_{st}) + \sum_{i=1}^k V_i \quad (3.80)$$

### 3.15 Meccanismi di rottura

I meccanismi con cui si previene alla crisi dell'elemento strutturale possono distinguersi in due tipi fondamentali.

- Il primo per Taglio interno, generalmente l'anima e le fessure si presentano inclinate secondo la direzione ortogonale delle isostatiche di trazione e crea tensioni nelle armature trasversali. Esso si manifesta in presenza di insufficiente armatura d'anima;

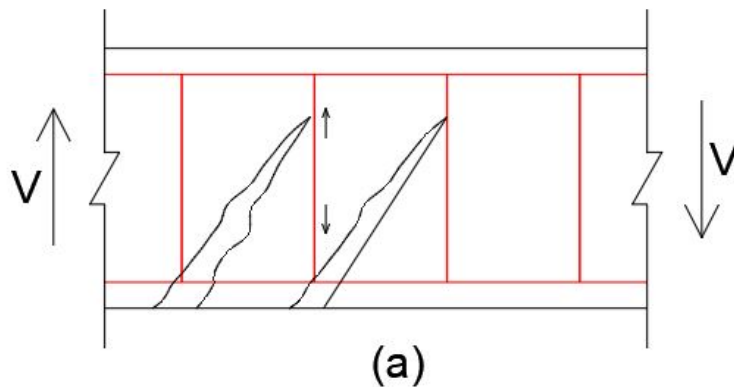


Figura 3.30

- b) Il secondo per TAGLIO-FLESSIONE, si può innescare al confine delle zone di taglio-flessione; la fessura di flessione è inclinata per effetto del taglio e penetra nella zona compressa riducendone l'efficacia;

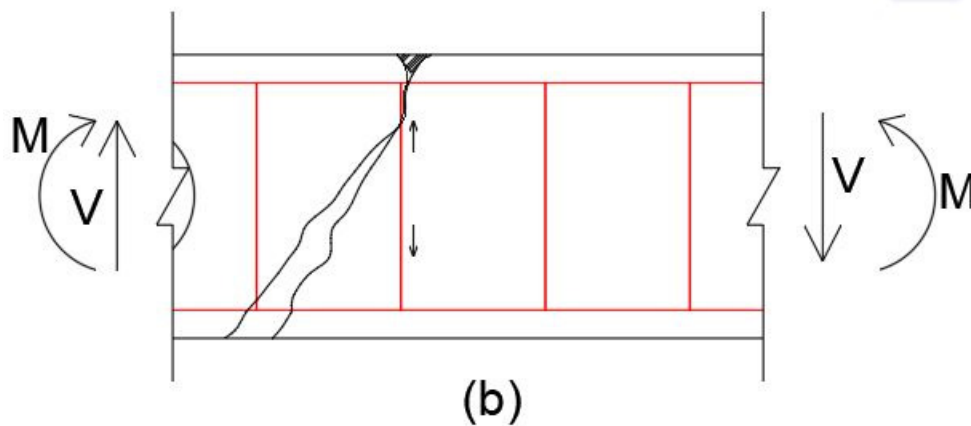


Figura 3.31

- c) Un probabile meccanismo è infine la rottura per COMPRESSIONE D'ANIMA ad esempio nelle anime sottili di sezioni a T.

Pertanto, come già evidenziato in precedenza, il comportamento a rottura di elementi in c.a. sollecitati a flessione e taglio risulta estremamente complesso e variabile; quindi anche diversi modelli di calcolo sono proposti:

- Metodo dei domini resistenti;
- Metodo a traliccio interno iperstatico;
- Metodi empirici, etc.

Nel seguito si fa riferimento, in particolare, al metodo del traliccio resistente di Morsch da cui discendono le raccomandazioni più recenti in varie normative.

### 3.16 Meccanismo resistente principale: il traliccio di Morsch

Lo schema resistente di una trave in c.a. allo S.L.U. di rottura per taglio può essere rappresentato attraverso un reticolo isostatico di bielle compresse in cls e tiranti tesi costituiti dalle armature d'anima. L'ipotesi a base del calcolo è che il taglio esterno venga

interamente portato dalle armature d'anima  $V=V(A_{st})$  e che pertanto siano nulle o trascurabili le altre aliquote relative ai contributi di altri meccanismi di rottura.

Si ha che:

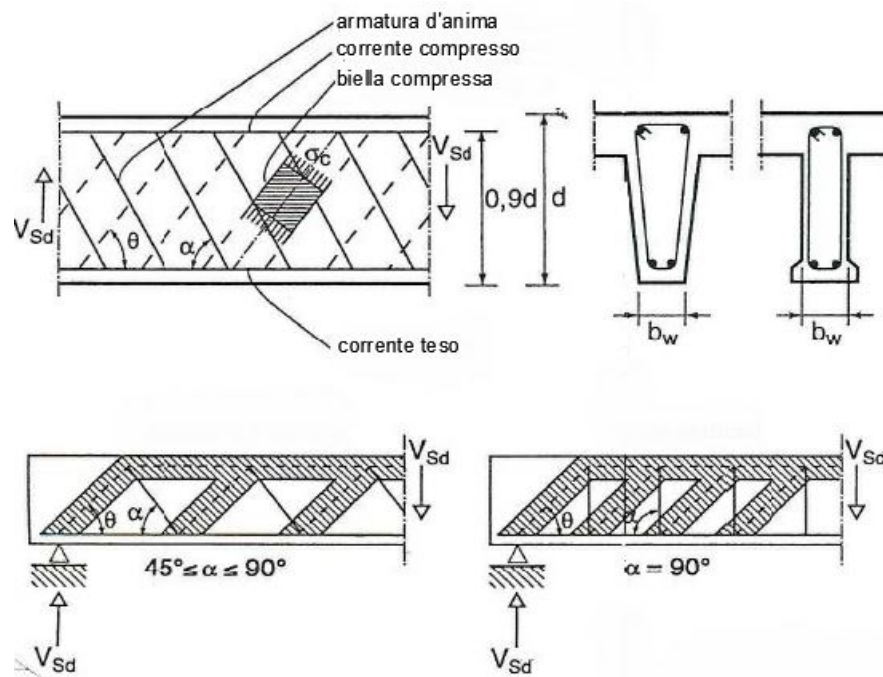


Figura 3.32

### 3.17. Considerazioni sul progetto e verifica a taglio – SLU

I due principali meccanismi resistenti a taglio, cioè il meccanismo taglio-trazione, ed il meccanismo taglio-compressione portano alle seguenti formulazioni date dalla NTC 18:

$$V_{r,s} = A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot \frac{z^*}{t} \cdot (\text{ctg}\theta + \text{ctg}\alpha) \cdot \text{sena}\alpha \quad (3.81)$$

$$V_{r,c} = b \cdot z^* \cdot \alpha_c \cdot (v \cdot \sigma_c) \cdot \frac{(\text{ctg}\theta + \text{ctg}\alpha)}{1 + \text{ctg}^2\theta} \quad (3.82)$$

Nel caso in cui si utilizzassero come armature trasversali le sole staffe, l'angolo  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , e quindi si ottengono :

$$V_{r,s} = A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot \frac{z^*}{t} \cdot \text{ctg}\theta \quad (3.83)$$

$$V_{r,c} = b \cdot z^* \cdot \alpha_c \cdot (v \cdot \sigma_c) \cdot \frac{1}{\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta} \quad (3.84)$$

Nel caso delle staffe, l'area dell'armatura è data da :

$$A_{sw} = n \cdot A_{\phi} \quad (3.85)$$

Con  $n$ = numero dei bracci delle staffe;  $A_{\phi}$ = sezione delle staffe

Le staffe che si impiegano sono di diametro 8 mm ( $\emptyset 8$ ); in casi particolari di diametro 6 mm o numeri più elevati.

Nella NTC si prevede che l'angolo d'inclinazione delle bielle di cls compresso possa variare con  $1 \leq \text{ctg}\theta \leq 2.5$ .

Nota:

$$\frac{\text{ctg}\theta}{1 + \text{ctg}^2\theta} = \frac{\cos\theta/\text{sen}\theta}{1 + \cos^2\theta/\text{sen}^2\theta} = \frac{\cos\theta \cdot \text{sen}\theta}{\text{sen}^2\theta + \cos^2\theta} = \frac{1}{\text{tg}\theta + \text{ctg}\theta} \quad (3.86)$$

Pertanto se si pensa di ridurre l'angolo  $\theta_1$  da  $\frac{\pi}{4}$  al valore minimo pari a  $\text{ctg}\theta=2.5$ , cioè  $\theta_2=22^\circ$ , le capacità resistenti  $V_{R,S}$  e  $V_{R,C}$ , si comportano in modo diverso:

- a) Al diminuire dell'angolo  $\theta$  cresce la resistenza a taglio-trazione espressa dalla  $V_{R,S}$ , in cui contiene al numeratore  $\text{ctg}\theta$ ;
- b) Al diminuire dell'angolo  $\theta$  diminuisce la resistenza taglio-compressione.

Le due condizioni di progetto potrebbero essere meglio visualizzate dalle figure seguenti in cui per uno stesso passo delle staffe "t" si considerano le due situazioni di inclinazione della superficie inclinata fessurata della trave (Figura 3.33).

È facile verificare che il numero delle staffe che attraverso la fessura nel caso di angolo  $\theta \rightarrow \theta_2$ .

Quindi l'incremento di  $V_{R,S}$ , è dovuto sia alla presenza di un valore di  $\text{ctg}\theta$  più alto per  $\theta \rightarrow \theta_2$ , sia per la maggior presenza di armatura trasversale.



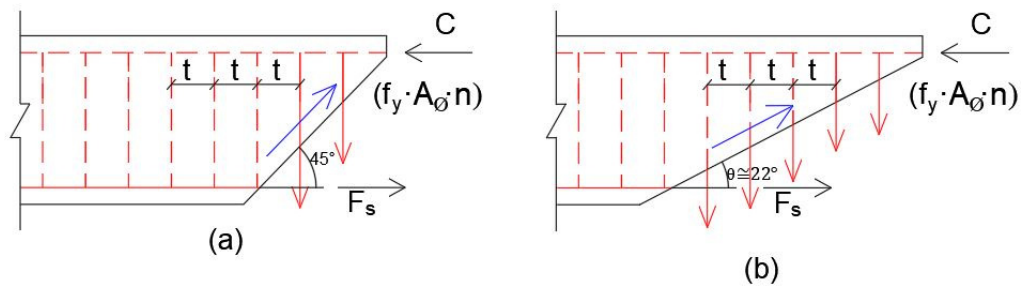


Figura 3.33

Nei problemi di progetto (e/o verifica) è sempre necessario garantire la sicurezza che nel caso del taglio è affidata a due “resistenze”  $V_{R,S}$ ,  $V_{R,C}$  delle staffe tese e delle bielle di cls compresso.

Deve valere quindi la seguente condizione:

$$V_{sollecitante} \leq \text{minore fra } V_{R,S} \text{ e } V_{R,C} \quad (3.87)$$

Come si è ricordato, qualora si utilizzasse come previsto dalle norme, il modello a traliccio con bielle compresse inclinate di un angolo  $\theta$  variabile è necessario garantire sempre la Formula 2.87.

Nel progetto delle armature, si può procedere considerando, in generale, la condizione che si abbia perdita di resistenza al più per la contemporanea perdita di resistenza per taglio-compressione e taglio-trazione. Si possono utilizzare, quindi, le procedure seguenti:

- Primo caso:  $V_{soll} > V_{RC1}$  (minimo valore del taglio-compressione  $\theta=45^\circ$ )

Se si verifica questa condizione non si può assolutamente garantire la resistenza della trave perché si ha schiacciamento delle bielle compresse del cls integro fra fessure adiacenti. Ordinariamente, questa condizione può verificarsi per cls poco resistenti e per geometri con spessore d'anima ridotto come, per esempio, nelle strutture prefabbricate.

È necessario quindi cambiare sezione o resistenza del calcestruzzo.

- Secondo caso:  $V_{RC1} \leq V_{soll} \leq V_{RC2}$  ( $\theta \cong 22^\circ$ )

In questo caso, verificando che il taglio sollecitante risulti minore del minimo valore del taglio resistente  $V_{RC1}(\text{ctg}\theta=1, \theta=45^\circ)$  si può valutare il valore di “ctg $\theta$ ” per il quale si ha l’uguaglianza di  $V_{\text{soll}}=V_{R,C}(\text{ctg}\theta^*)$  e quindi l’angolo  $\theta^*$  per un meccanismo probabile per il quale la resistenza del calcestruzzo delle bielle compresse inclinate di  $\theta^*$  è almeno pari al taglio sollecitante. Quindi per tale angolo  $\theta^*$  si calcola l’armatura  $A_{sw}$  (con passo “t”) ponendo  $V_{R,S}(\text{ctg}\theta^*)=V_{\text{soll}}$ .

Questa procedura permette di garantire che i due meccanismi di taglio-trazione e taglio-compressione non sono minori del taglio sollecitante.

- Terzo caso:  $V_{\text{soll}}<V_{RC,2} (\theta\cong 22^\circ)$

In tal caso è assicurata la resistenza a compressione dell’elemento di trave per le bielle compresse di cls nell’ intervallo di  $\theta$  variabile previsto.

Quindi il calcolo delle armature può essere fatto considerando un’armatura di staffe che garantisca la minima capacità resistente a taglio-trazione  $V_{R,S}(\text{ctg}= 2.5)$ .

Si noti che usualmente procedendo con la procedura con la determinazione di  $V_{R,S}$  per  $\theta=45^\circ$  si ottengono “armature deboli” per le staffe nella condizione che il meccanismo resistente delle armature possa essere considerato il valor minimo di resistenza a taglio fra  $V_{R,C}$  e  $V_{R,S}$ . La condizione di armatura debole si ha per coefficiente  $\omega_{sw} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{(b \cdot t) \cdot \sigma_{cd}} < 0.07$ .

Se la trave è fortemente armata ( $\omega_{sw}>0.25$ ) la crisi può determinare il cedimento delle bielle compresse.

## ESEMPIO

Calcolare le armature a taglio costituite da staffe per la trave seguente sottoposta ad un diagramma del taglio del tipo di Figura 3.34.

Dati:

$$V_{\text{soll}}= 177 \text{ KN} ; f_{ck}= 25 \text{ N/mm}^2 \text{ (B450C)} \rightarrow f_{cd}=14.17 \text{ N/mm}^2$$

(B450C)  $f_{yd} \cong 391 \text{ N/mm}^2$

$b=300 \text{ mm}$ ;  $d=465 \text{ mm}$ ;  $\alpha_c=1$ ;  $v=0.5$

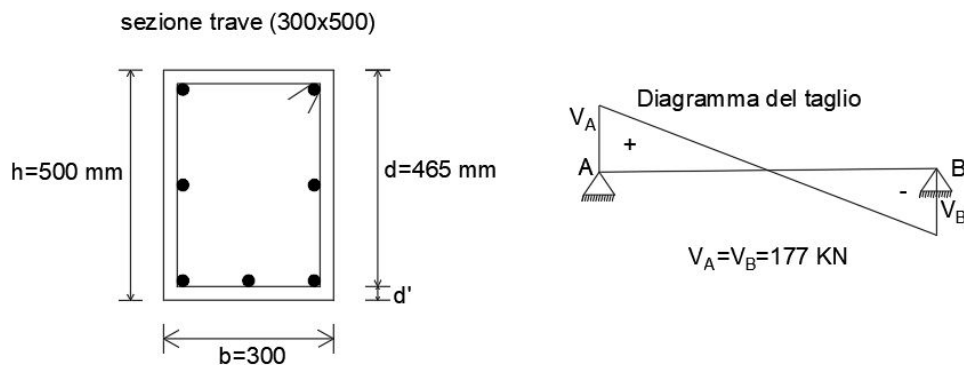


Figura 3.34

Si calcolano i valori del taglio-compressione nei due casi  $\theta=45^\circ$  e  $\theta=22^\circ$ :

$$V_{RC,1} = 0.5 \cdot 0.9d \cdot b \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} \cong 445 \text{ kN} \quad (3.88)$$

$$V_{RC,2} = 0.5 \cdot 0.9d \cdot b \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} \cong 302 \text{ kN} \quad (3.89)$$

Si verifica che  $V_{soll}=177 \text{ kN} < V_{RC,2} \cong 302 \text{ kN}$ ; l'armatura di staffe si calcola ponendo il  $V_{rs}(\theta \cong 22,5) = V_{soll}$ ; da cui il passo  $t$ :

$$t = \frac{0.9d \cdot (n \cdot A_{\phi}) \cdot f_{yd} \cdot 2.5}{V_{soll}} = \frac{0.9 \cdot 100 \cdot 391}{177000} \cdot 46.5 \cong 231 \text{ mm} \quad (3.90)$$

quindi il passo di calcolo è  $t \cong 23 \text{ cm}$ . È necessario ovviamente verificare le ulteriori prescrizioni presenti nella normativa per il quantitativo delle armature trasversali anche in zone sismiche.

N.B.

Controllo della percentuale di armatura trasversale:

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{b \cdot t \cdot f_{cd}} = \frac{100 \cdot 391}{300 \cdot 230 \cdot 14.17} = 0.039 < 0.07 \text{ (armatura debole)} \quad (3.91)$$

# CAP 4. Rinforzi nel C.A. - norme CNR

---

## 4.1 Generalità

In questo capitolo vengono riportate le indicazioni delle norme CNR riguardanti i rinforzi nel C.A.; sia per quanto riguarda la progettazione che la verifica per elementi rinforzati a flessione, taglio, torsione e confinamento.

## 4.2 Valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

Nel rinforzo di elementi di c.a. mediante lamine o tessuti di materiale composito, il ruolo dell'aderenza tra calcestruzzo e composito assume grande importanza in quanto il meccanismo di rottura per delaminazione (perdita di aderenza) è di tipo fragile. Nello spirito del criterio di gerarchia delle resistenze tale meccanismo di crisi non deve precedere il collasso per flessione o per taglio dell'elemento rinforzato.

La perdita di aderenza tra composito e calcestruzzo può riguardare lamine o tessuti applicati all'intradosso di travi di c.a. per il rinforzo a flessione e sulle facce laterali (usualmente tessuti) per il rinforzo a taglio. In linea di principio (Figura 4.1), la delaminazione può prodursi all'interno dell'adesivo, tra calcestruzzo ed adesivo, nel calcestruzzo o all'interno del rinforzo (ad esempio tra strati di tessuto orditi con differenti angoli di inclinazione delle fibre). Nel caso di rinforzi posti correttamente in opera, poiché la resistenza dell'adesivo è in genere molto più elevata di quella a trazione del calcestruzzo, la delaminazione avviene sempre all'interno di quest'ultimo con l'asportazione di uno strato di materiale, il cui spessore può variare da pochi millimetri fino ad interessare l'intero copriferro delle barre di armatura.

I modi di collasso per delaminazione di lamine o tessuti utilizzati per il rinforzo a flessione possono essere classificati nelle seguenti quattro categorie:

- Modalità 1 (Delaminazione di estremità);
- Modalità 2 (Delaminazione intermedia, causata da fessure per flessione nella trave);

- Modalità 3 (Delaminazione causata da fessure diagonali da taglio);
- Modalità 4 (Delaminazione causata da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo).



Figura4.1- Perdita di aderenza rinforzo-calcestruzzo

#### 4.3 Verifiche di sicurezza nei confronti della delaminazione

La verifica di sicurezza nei confronti della crisi per delaminazione richiede la valutazione della massima forza trasmissibile dal calcestruzzo al rinforzo, nonché la valutazione delle tensioni, sia tangenziali che normali, mobilitate all'interfaccia calcestruzzo-FRP. La prima valutazione risulta necessaria per la verifica allo SLU, la seconda per la verifica dello stato tensionale in esercizio.

Con riferimento ad una tipica prova di aderenza, come quella rappresentata schematicamente in Figura 4.2, il valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo di FRP, prima che subentri la delaminazione, dipende, a parità di tutte le altre condizioni, dalla lunghezza,  $l_b$ , della zona incollata. Tale valore cresce con  $l_b$  fino ad attingere un massimo corrispondente ad una ben definita lunghezza,  $l_e$ : ulteriori allungamenti della zona di incollaggio non comportano incrementi della forza trasmessa. La lunghezza  $l_e$  viene definita lunghezza ottimale di ancoraggio e corrisponde quindi alla lunghezza minima di quest'ultimo che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza.

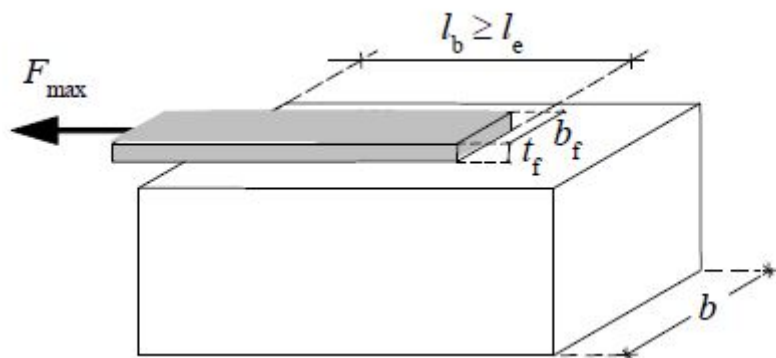


Figura 4.2 - Forza massima trasmissibile da un rinforzo di FRP

La lunghezza ottimale di ancoraggio,  $l_e$ , può essere stimata nel modo seguente:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (\text{mm}) \quad (4.1)$$

dove  $E_f$  e  $t_f$  sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale nella direzione della forza e lo spessore del composito fibrorinforzato ed  $f_{ctm}$  è la resistenza media a trazione del calcestruzzo costituente il supporto.

#### **Resistenza allo stato limite ultimo per delaminazione di estremità (modalità 1)**

Con riferimento ad una delaminazione che coinvolga i primi strati di calcestruzzo e per lunghezze di ancoraggio maggiori o uguali a quella ottimale, la tensione di progetto del rinforzo,  $f_{dd}$ , ovvero il valore della massima tensione alla quale il rinforzo può lavorare nella sezione terminale di ancoraggio, una volta avvenuto il trasferimento degli sforzi dal calcestruzzo al rinforzo di FRP vale:

$$f_{dd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}} \quad (4.2)$$

Energia specifica di rottura:

$$\Gamma_{FK} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad (\text{Forze in N e lunghezze in mm}) \quad (4.3)$$

essendo  $\gamma_{fd}$  il coefficiente parziale indicato in Tabella 1.1 e  $\gamma_c$  il coefficiente parziale del calcestruzzo.

Tabella 4.1- coefficienti parziali per i materiali ed i prodotti

Modalità di collasso	Coefficiente parziale	Applicazione di tipo A	Applicazione di tipo B
Rottura	$\gamma_f$	1.10	1.25
Delaminazione	$\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

La relazione (4.3) può essere utilizzata per le verifiche di delaminazione:

- Nel caso di rinforzi a flessione;
- Nel caso di rinforzi a taglio.

Nel caso di lunghezze di ancoraggio,  $l_b$ , minori di quella ottimale,  $l_e$ , la tensione di progetto deve essere opportunamente ridotta in accordo con la relazione:

$$f_{fdd,nd} = f_{fdd} \cdot \frac{l_b}{l_c} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_c}\right) \quad (4.4)$$

Quando si faccia ricorso a particolari dispositivi di ancoraggio (barre trasversali di composito, fasciatura dell'estremità mediante tessuti, ecc.), la forza massima di ancoraggio deve essere valutata mediante apposite indagini sperimentali.

### **Resistenza allo stato limite ultimo per delaminazione intermedia (modalità 2)**

Allo scopo di prevenire il meccanismo di delaminazione secondo la modalità 2, si può verificare che la variazione di tensione  $\Delta\sigma_f$  nel rinforzo di FRP tra due fessure consecutive non superi un opportuno valore limite  $\Delta\sigma_R$ . Quest'ultimo dipende, in generale, dalle caratteristiche del legame di aderenza, dalla distanza tra le fessure e dal livello di tensione  $\sigma_f$  nel rinforzo.

In alternativa, è possibile ricorrere ad una procedura semplificata consistente nel verificare che allo SLU la tensione nel composito fibrorinforzato non ecceda un valore massimo,  $f_{fdd,2}$ , fornito dalla seguente relazione:

$$f_{fdd,2} = \frac{k_{cr}}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}} \quad (4.5)$$

nella quale, in mancanza di dati specifici, il coefficiente  $k_{cr}$  può essere assunto pari a 3.0. Il corrispondente valore della deformazione di progetto del composito fibrorinforzato,  $\varepsilon_{fdd}$ , vale:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \quad (4.6)$$

### **Resistenza allo stato limite ultimo per delaminazione di estremità (modalità 1)**

In una trave rinforzata con FRP, all'interfaccia tra calcestruzzo e rinforzo si verificano concentrazioni tensionali (tangenziali e normali) localizzate in corrispondenza di fessure trasversali presenti nel calcestruzzo, soprattutto alle estremità del rinforzo. Tali concentrazioni possono provocare la fessurazione dell'interfaccia innescando il distacco tra i due materiali.

È opportuno che, in condizioni di esercizio, ciò non accada, soprattutto in presenza di cicli di carico e di cicli di gelo/disgelo. La competente verifica può essere eseguita mediante un calcolo delle tensioni di interfaccia utilizzando modelli elastici lineari.

Si deve controllare che, all'interfaccia adesivo-calcestruzzo, per la combinazione di carico rara o frequente, la tensione tangenziale "equivalente", sia inferiore alla resistenza di adesione tra il rinforzo ed il substrato di calcestruzzo:

$$\tau_{b,c} = f_{bd} \quad (4.7)$$

Nel calcolo delle tensioni di ancoraggio, in condizioni di esercizio (SLE), è possibile riferirsi allo stato di sollecitazione corrispondente all'incremento di carico che interviene successivamente all'applicazione del rinforzo.

### **4.4 Rinforzo a flessione**

Il rinforzo a flessione si rende necessario per elementi strutturali soggetti ad un momento flettente di progetto maggiore della corrispondente resistenza. In particolare, nel prosieguo sarà esaminato il caso di flessione retta, ad esempio quello che si verifica in presenza di asse di sollecitazione coincidente con un asse di simmetria della sezione trasversale dell'elemento rinforzato.



Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere eseguito applicando una o più lamine, ovvero uno o più strati di tessuto, al lembo teso dell'elemento da rinforzare.

#### **4.4.1 Analisi del comportamento allo stato limite ultimo**

Il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP in modo che il momento sollecitante di progetto,  $M_{Sd}$ , e quello resistente di progetto della sezione rinforzata,  $M_{Rd}$ , soddisfino la disequazione:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (4.8)$$

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- Conservazione della pianeità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- Perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo, FRP-calcestruzzo);
- Incapacità del calcestruzzo di resistere a sforzi di trazione;
- Legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- Legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza che la rottura per flessione si manifesti quando si verifica una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP.

È importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto. L'incremento del taglio resistente, eventualmente necessario, deve essere conseguito in accordo con le prescrizioni fornite nel § 4.3 delle NCR.

Poiché generalmente il rinforzo di FRP viene applicato su una struttura già sollecitata, si deve tenere conto dello stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo.

## **Stato della struttura all'atto del rinforzo**

Nell'ipotesi che il rinforzo di FRP sia applicato su un elemento soggetto ad una sollecitazione preesistente, cui corrisponda un momento applicato  $M_0$  si deve procedere alla valutazione dello stato deformativo iniziale quando  $M_0$  sia maggiore del momento di fessurazione. In caso contrario, lo stato deformativo iniziale può essere di norma trascurato.

Il calcolo viene eseguito nell'ipotesi di comportamento elastico lineare dei due materiali costituenti la trave e, in particolare, di incapacità del calcestruzzo a sopportare sforzi di trazione.

Le deformazioni significative sono quella al lembo compresso,  $\varepsilon_{co}$ , e quella al lembo teso,  $\varepsilon_o$ , dove viene applicato il rinforzo di FRP. Esse possono essere ricavate in base alla linearità del diagramma delle deformazioni normali sulla sezione retta, in funzione delle caratteristiche meccaniche e geometriche della sezione reagente.

## **Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP**

La valutazione della resistenza flessionale della sezione si effettua secondo quanto indicato nel capitolo 4.4.1.

Le due equazioni da utilizzare per la risoluzione del problema sono quella di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese e parallelo all'asse neutro.

Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in Figura 4.3, si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima dilatazione del rinforzo di FRP (zona 1) o la massima contrazione del calcestruzzo (zona 2).

Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nelle fibre: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione delle fibre,  $\varepsilon_{fd}$ , definito dalla relazione (4.9):

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_s \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\} \quad (4.9)$$

Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate, invocando la linearità del diagramma, attraverso le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{fd} \quad - \text{(FRP)} \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)} \quad - \text{(acciaio compresso)} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)} \quad - \text{(acciaio in trazione)} \quad (4.13)$$

nelle quali si è utilizzata la simbologia di Figura 4.3 e dove  $\varepsilon_{cu}$  è la deformazione limite che il calcestruzzo può attingere a compressione (deformazione di progetto). In particolare, la posizione,  $x$ , dell'asse neutro è individuata dalla distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso della sezione retta.

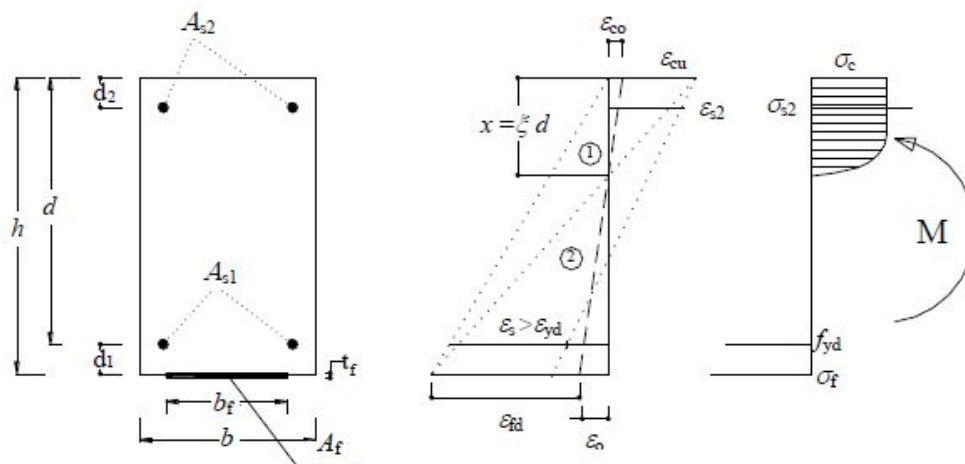


Figura 4.3- modalità di rottura di una sezione in c.a. rinforzata esternamente con lamine FRP

Generalmente è superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dall'acciaio teso allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre,  $\varepsilon_{fd}$ , e del calcestruzzo,  $\varepsilon_{cu}$ , il valore di progetto di tale deformazione non viene mai attinto.

Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superata, se ne deve tenere conto nel calcolo della posizione dell'asse neutro e conseguentemente in quello del momento resistente. Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione limite delle fibre non è stata ancora raggiunta: in tal caso resta fissata la deformazione massima del calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Ancora una volta le deformazioni normali competenti alle diverse fibre della sezione retta dell'elemento, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate invocando la linearità.

Se gli acciai sono in fase elastica, le loro tensioni di lavoro sono ottenibili moltiplicando le competenti deformazioni per il modulo di elasticità normale; altrimenti sono da assumere pari al limite di snervamento,  $f_{yd}$ . Nelle zone 1 e 2 l'entità della deformazione esibita dalle barre d'acciaio in trazione è sempre superiore a quella di progetto,  $\varepsilon_{yd}$ . Poiché il rinforzo di FRP ha un comportamento elastico-lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale del composito fibrorinforzato (nella direzione dell'asse della trave). Per evitare che allo SLU l'acciaio teso sia in campo elastico, il coefficiente adimensionale  $\xi = x/d$  non deve eccedere il valore limite  $\xi_{lim}$  fornito dalla seguente relazione:

$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \quad (4.14)$$

### **Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP in presenza di forza assiale**

L'attivazione dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assi-curata attraverso l'adozione di soluzioni costruttive idonee. Inoltre, le fibre longitudinali impiegate per il rinforzo a pressoflessione devono essere adeguatamente confinate al fine di evitare il distacco delle stesse e l'espulsione del materiale di supporto. In tali condizioni, nella valutazione della deformazione massima mediante la (4.9), si assume il valore corrispondente al primo termine in parentesi.

possibile valutare in modo approssimato la resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP in presenza di forza assiale (pressoflessione) seguendo la procedura descritta nell'Appendice C della NCR.

#### **4.4.2 collasso per delaminazione di estremità**

La delaminazione di estremità dipende da una serie di fattori quali l'ubicazione della zona di formazione delle fessure e la tipologia di queste ultime (fessure taglianti e/o flessionali), la presenza di irregolarità sulla superficie di applicazione del rinforzo, la concentrazione di tensioni nelle zone di ancoraggio.

Nel caso di travi di c.a., la massima distanza dall'appoggio,  $a$ , alla quale è possibile applicare il rinforzo di FRP senza temere il collasso per delaminazione, può essere calcolata imponendo l'uguaglianza tra il valore di progetto della massima tensione di trazione trasferibile al rinforzo e-sterno (eq. (4.2) per  $l_b \geq l_e$ ) e quello della tensione mobilitata nel composito ad una distanza  $a+l_b$  dall'appoggio sotto l'azione del carico ultimo di progetto agente sull'elemento rinforzato.

Nel caso che la lunghezza di ancoraggio disponibile sia  $l_b < l_e$  si utilizza la (4.4) al posto della (4.2).

Qualora l'ancoraggio sia realizzato in una zona soggetta a prevalenti sollecitazioni taglianti, che possono quindi indurre fessure inclinate, la forza di trazione mobilitata nel composito, alla distanza  $a+l_b$ , deve essere calcolata dopo aver operato un'opportuna traslazione del diagramma del momento flettente, di entità  $a_1$ . Tale traslazione deve avvenire nel verso che dà luogo ad un aumento del valore assoluto del momento flettente (Figura 4-6).

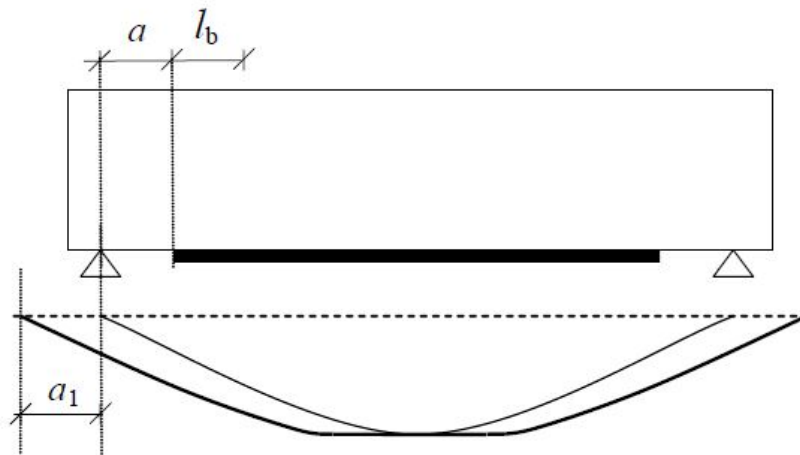


Figura 4.4-Traslazione del diagramma del momento flettente

Sul piano operativo, generalmente, la forza di ancoraggio può essere valutata incrementando il momento di calcolo sollecitante della seguente quantità:

$$M = V_{sd} \cdot a_1 \quad (4.15)$$

dove  $V_{sd}$  è il taglio sollecitante di progetto,  $a_1 = 0.9 \cdot d \cdot (1 - \cot\alpha)$ ,  $\alpha$  è l'inclinazione dell'armatura a taglio e  $d$  è l'altezza utile della sezione.

In presenza di dispositivi speciali per l'ancoraggio delle estremità di lamine o tessuti, è possibile omettere le verifiche di cui al § 4.1.3 (NCR) a condizione di disporre di un'opportuna certificazione di tali dispositivi basata su adeguate indagini sperimentali. La certificazione deve riguardare i materiali impiegati (adesivi e rinforzi), gli specifici sistemi utilizzati per migliorare l'ancoraggio (barre trasversali annegate nel copriferro, fasciatura trasversale mediante tessuti, ecc.), la successione delle fasi indicate dal produttore per la preparazione delle superfici, i tempi di esecuzione e le condizioni ambientali.

### Analisi del comportamento agli SLE

Sotto i carichi di esercizio è necessario verificare che:

- I livelli tensionali nei materiali siano opportunamente limitati allo scopo di evitare lo snervamento dell'acciaio e di mitigare i fenomeni di viscosità nel calcestruzzo e nel rinforzo esterno;

- Le deformazioni e le frecce non attingano valori eccessivi, tali cioè da inficiare il normale uso della struttura, produrre danni ad elementi non portanti, arrecare disturbo psicologico agli utenti;
- I fenomeni fessurativi risultino opportunamente contenuti, dal momento che la presenza di fessure troppo numerose o troppo aperte potrebbe ridurre notevolmente la durabilità delle strutture, la loro funzionalità, il loro aspetto e danneggiare l'integrità del legame di aderenza all'interfaccia FRP-calcestruzzo.

Le verifiche in condizioni di esercizio possono essere svolte in campo elastico-lineare tenendo conto sia del comportamento per sezione interamente reagente che per sezione fessurata. Va tenuta in conto l'eventuale deformazione preesistente al momento dell'applicazione del rinforzo. Le tensioni nei materiali sono valutabili per sovrapposizione degli effetti.

Le ipotesi a base di calcolo sono:

- Comportamento elastico lineare omogeneo dei materiali;
- Conservazione della planeità delle sezioni rette;
- Assenza di scorrimento (perfetta aderenza) tra calcestruzzo ed armatura metallica tra calcestruzzo e rinforzo di FRP.

La prima ipotesi comporta l'assunzione di un modulo di elasticità normale (nella direzione dell'asse della trave) costante per ciascun materiale; la seconda implica la linearità del diagramma delle deformazioni sulla sezione retta dell'elemento inflesso; la terza, insieme con la prima, permette di definire un rapporto di proporzionalità tra la tensione dell'acciaio e quella di una fibra di calce-struzzo posta alla stessa quota ( $\sigma_s / \sigma_c = E_s / E_c = n_s$ ), nonché tra la tensione del rinforzo di FRP e quella della fibra di calcestruzzo ad esso adesa ( $\sigma_f / \sigma_c = E_f / E_c = n_f$ ). Tali rapporti sono definiti come coefficienti di omogeneizzazione: nell'ordine, dell'acciaio o del rinforzo rispetto al calcestruzzo compresso. Essi permettono di rappresentare il diagramma delle tensioni su una sezione di c.a. rinforzata con FRP come quello su una sezione omogenea, purché si intendano i valori delle tensioni che competono all'acciaio e al rinforzo amplificati, rispettivamente,  $n_s$  e  $n_f$  volte. I valori dei coefficienti di omogeneizzazione devono essere stabiliti tenendo conto dell'evoluzione della viscosità e quindi facendo riferimento a situazioni sia a breve che a lungo termine.

Per effettuare le verifiche in condizioni di esercizio è necessario valutare la posizione dell'asse neutro ed il momento di inerzia della sezione di c.a. fessurata e non fessurata, prima e dopo l'applicazione del rinforzo di FRP.

Nel calcolo delle tensioni, se del caso, è necessario considerare, oltre agli effetti dei carichi, anche quelli delle variazioni termiche, della viscosità, del ritiro e di eventuali altre distorsioni.

### **Verifica delle tensioni**

In condizioni di esercizio le tensioni nel composito fibrorinforzato, calcolate per la combinazione di carico quasi permanente, devono soddisfare la limitazione, essendo  $f_{tk}$  la tensione caratteristica di rottura del rinforzo ed  $\eta$  il fattore di conversione. Le tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio vanno limitate in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente.

In presenza di un momento  $M_0$  agente sulla sezione all'atto dell'applicazione del rinforzo e di un momento  $M_1$  dovuto ai carichi applicati dopo l'intervento, le tensioni indotte dal momento complessivo  $M=M_0+M_1$  possono essere valutate in maniera additiva.

Inoltre, per quanto riguarda le caratteristiche geometriche della sezione retta e la posizione dell'asse neutro, nell'ipotesi che il momento  $M_0$  induca fessurazione nella sezione, i momenti di inerzia  $I_0$  e  $I_1$  e le distanze  $x_0$  e  $x_1$  degli assi neutri dall'estremo lembo compresso sono relativi, rispettivamente, alla condizione di sezione di c.a. fessurata e non rinforzata, e di sezione di c.a. fessurata e rinforzata con FRP. Anche in questo caso i coefficienti di omogeneizzazione utilizzati devono tenere conto dell'evoluzione della viscosità del calcestruzzo, distinguendo tra verifiche a breve ed a lungo termine.

### **Verifica delle frecce**

Le deformazioni esibite dalle strutture rinforzate con FRP devono rispettare le limitazioni imposte dalla Normativa vigente

Il modello adottato deve simulare il comportamento reale della struttura con un livello di accuratezza adeguato agli obiettivi del calcolo.



In particolare, si deve tenere conto dell'eventuale presenza della fessurazione per gli effetti da essa prodotti sulla deformazione del corrente teso e di quello compresso.

Se risulta appropriato, il modello meccanico adottato deve consentire di tenere conto:

- Degli effetti della viscosità e del ritiro;
- Dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra le fessure;
- Della fessurazione preesistente, provocata da carichi antecedenti all'applicazione del rinforzo;
- Dell'influenza di distorsioni eventualmente agenti, quali ad esempio quelle di origine termica;
- Della modalità di applicazione del carico, sia essa statica o dinamica;
- Del valore più appropriato del modulo di elasticità normale del calcestruzzo in funzione del tipo di inerte e della maturazione al momento della messa in carico.

È opportuno rilevare che, in caso di calcolo non lineare delle frecce, non vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

Il calcolo della freccia per travi di c.a. rinforzate con FRP può essere effettuato mediante integrazione del diagramma delle curvature. Queste ultime possono essere valutate attraverso un'analisi non lineare che tenga conto della fessurazione e dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso. In alternativa, sono possibili analisi semplificate, del tipo di quelle in uso per le ordinarie sezioni di c.a., sempre che siano suffragate da adeguate sperimentazioni.

La presenza di una deformazione iniziale, preesistente all'applicazione del rinforzo, può essere tenuta in conto sommando le frecce che competono alle diverse fasi.

### **Verifica dell'apertura delle fessure**

Per proteggere l'armatura metallica interna e garantire la funzionalità degli elementi, occorre prevedere opportune limitazioni sui valori dell'apertura delle fessure in condizioni di esercizio.

I limiti di fessurazione delle strutture rinforzate con FRP devono soddisfare le prescrizioni contenute nella Normativa vigente.

Allo stato attuale non sono disponibili modellazioni accurate e completamente affidabili per il calcolo dell'apertura delle fessure di strutture di c.a. rinforzate con FRP.

In letteratura sono reperibili diverse formulazioni a base sperimentale che modificano opportunamente le espressioni in uso per le ordinarie sezioni di c.a. onde tener conto della presenza del rinforzo esterno. L'evidenza sperimentale dimostra che le membrature di c.a. placcate con FRP presentano, general-mente, fessure di ampiezza inferiore anche se più ravvicinate.

È possibile adottare modellazioni più complesse ed accurate purché siano supportate da adeguate sperimentazioni.

### **Duttilità**

Per elementi inflessi la duttilità, intesa come capacità di deformazione in campo plastico, dipende sia dal comportamento della sezione, sia dalle modalità effettive di collasso dell'elemento strutturale nel suo complesso.

Per quanto riguarda la sezione, una maggiore duttilità è assicurata quando il collasso avviene per schiacciamento del calcestruzzo. La rottura del rinforzo di FRP, per superamento della sua resistenza a trazione, comporta invece un collasso di tipo fragile. La duttilità è influenzata soprattutto dalla modalità di rottura dell'elemento strutturale nel suo complesso, indipendentemente dal tipo di sezione. Può ritenersi del tutto assente se si innesca il fenomeno di delaminazione prima di ogni altro meccanismo di rottura.

## **4.5 Rinforzo a taglio**

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo.

Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale presente.

Il rinforzo a taglio va verificato per il solo SLU. In aggiunta alle tipologie nel seguito considerate, se ne possono adottare anche altre non contemplate in queste Istruzioni, purché ne sia dimostrata l'efficacia e ne sia quantificato il contri-buto resistente a taglio.

### **4.5.1 Configurazione per il rinforzo a taglio**

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando strisce di tessuto, su uno o più strati, in aderenza alla superficie esterna dell'elemento da rinforzare (Figura 4.5). Le strisce possono essere applicate in maniera discontinua, con spazi vuoti fra

strisce consecutive, oppure in maniera continua, con strisce adiacenti l'una all'altra. In quest'ultimo caso il rinforzo assume l'aspetto di un foglio.

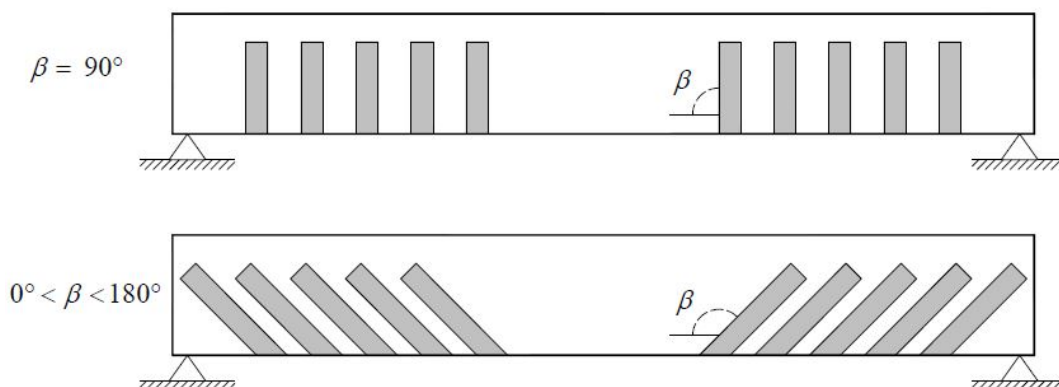


Figura 4.5- orientamento del rinforzo a taglio in forma di strisce

Elementi distintivi del rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di tessuto adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima.

La disposizione del rinforzo attorno alla sezione può avvenire nelle seguenti modalità: rinforzo laterale, rinforzo ad U e rinforzo in avvolgimento (Figura 4.6)

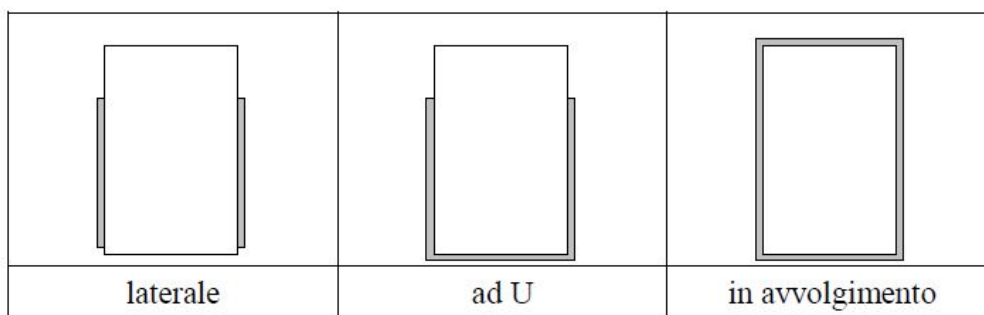


Figura 4.6- Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di rinforzi ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni) dei tessuti, mediante l'applicazione, in tali zone, di barre, lamine o strisce di materiale composito. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato mediante l'inserimento di barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale tipologia di rinforzo non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse utilizzata, la sua efficacia dovrebbe essere supportata da evidenze sperimentali.

#### **4.5.2 Resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato con FRP**

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,ct} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max}\} \quad (4.16)$$

Dove  $V_{Rd,ct}$  e  $V_{Rd,s}$  sono, rispettivamente, i contributi del calcestruzzo e dell'armatura trasversale di acciaio, da valutarsi in accordo con i Codici e la Letteratura Tecnica più recenti; è il contributo del rinforzo di FRP, da valutarsi come indicato nel seguito;  $V_{Rd,max}$  è la resistenza della biella compressa di calcestruzzo, da valutarsi in accordo con i Codici e la Letteratura Tecnica più recenti.

#### **4.5.3 Limitazioni e dettagli costruttivi**

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano delle concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare la delaminazione del rinforzo. Una procedura semplificata per valutare lo stato tensionale responsabile del fenomeno consiste nell'introdurre la cosiddetta "resistenza efficace" del rinforzo, definita come la tensione di trazione in esso presente all'atto della delaminazione.

Nel caso di disposizione ad U ed in avvolgimento, gli spigoli della sezione dell'elemento da rinforzare a contatto con il materiale composito devono essere arrotondati, in modo da evitare il tranciamento del rinforzo. Il raggio di curvatura,  $r_c$ , dell'arrotondamento deve essere non minore di 20 mm.

Nel caso di rinforzi discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza,  $w_f$ , ed il passo,  $p_f$ , delle strisce, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare le seguenti limitazioni:  $50 \text{ mm} \leq w_f \leq 250 \text{ mm}$  e  $w_f \leq p_f \leq \min\{0.5 \cdot d, 3 \cdot w_f, w_f + 200 \text{ mm}\}$ .

## **4.6 Rinforzo a torsione**

Il rinforzo a torsione si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il momento torcente di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale presente.

Il rinforzo a torsione va verificato per il solo SLU. In aggiunta alle tipologie appresso elencate, se ne possono adottare anche altre non contemplate in queste Istruzioni, purché sia dimostrata la loro efficacia e sia quantificato il loro contributo resistente a torsione.

### **4.6.1 Configurazione per il rinforzo a torsione**

Il rinforzo a torsione con materiali compositi si realizza applicando strisce di tessuto, su uno o più strati, in aderenza alla superficie esterna dell'elemento da rinforzare (Figura 4.5). Le strisce possono essere applicate in maniera discontinua, con spazi vuoti fra strisce consecutive, oppure in maniera continua, con strisce adiacenti l'una all'altra. In quest'ultimo caso il rinforzo assume l'aspetto di un foglio.

Il rinforzo è contraddistinto dalla geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di tessuto adese alla membratura rinforzata. Le fibre devono essere disposte con un angolo di inclinazione  $\beta=90^\circ$  rispetto all'asse longitudinale.

Il rinforzo può essere disposto attorno alla sezione solo in avvolgimento (Figura 4.6).

Il rinforzo a torsione può anche essere realizzato mediante l'inserimento di barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale tipologia di rinforzo non è oggetto delle presenti Istruzioni; qualora fosse adottata, la sua efficacia dovrebbe essere supportata da evidenze sperimentali.

### **4.6.2 Resistenza di progetto a torsione**

La resistenza di progetto a torsione dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione (applicabile agli elementi prismatici in cui si possa individuare una sezione anulare fittizia resistente):

$$T_{Rd} = \min\{T_{Rd,s} + T_{Rd,f}, T_{Rd,max}\} \quad (4.17)$$

Dove  $T_{Rd,s}$  è il contributo dell'armatura di acciaio, da valutarsi in accordo con i Codici e la Letteratura Tecnica più recenti;  $T_{Rd,f}$  è il contributo del rinforzo di FRP, da valutarsi come indicato nel seguito;  $T_{Rd,max}$  è la resistenza della biella compressa di calcestruzzo, da valutarsi in accordo con i Codici e la Letteratura Tecnica più recenti.

#### **4.6.2 Resistenza di progetto a torsione**

Nel caso di rinforzi per torsione, gli spigoli della sezione dell'elemento da rinforzare a contatto con il materiale composito devono essere arrotondati, in modo da evitare il tranciamento di quest'ultimo. Il raggio di curvatura,  $r_c$ , dell'arrotondamento deve essere non minore di 20 mm.

Nei rinforzi eseguiti con strisce di materiale composito, la larghezza  $w_f$  ed il passo  $p_f$  di queste, misurati (in mm) ortogonalmente alla direzione delle fibre, dovranno rispettare le seguenti limitazioni:  $50 \text{ mm} \leq w_f \leq 250 \text{ mm}$ , e  $w_f \leq p_f \leq \min\{0.5 \cdot d, 3 \cdot w_f, w_f + 200 \text{ mm}\}$ .

#### **4.7 Confinamento**

Un adeguato confinamento degli elementi di c.a. può determinare un miglioramento delle prestazioni dell'elemento strutturale. In particolare, esso consente di incrementare:

- la resistenza ultima e la corrispondente deformazione ultima, per elementi sollecitati da sforzo normale centrato o con piccola eccentricità;
- la duttilità e, congiuntamente all'impiego di rinforzi longitudinali (§ 4.2.2.4 e Appendice C), la resistenza ultima per membrature pressoinflesse.

Il confinamento di elementi di c.a. può essere realizzato con tessuti o lamine di FRP disposti sul contorno in modo da costituire una fasciatura esterna continua (ricoprimento) o discontinua (cerchiatura). L'incremento della resistenza a compressione e della corrispondente deformazione ultima del calcestruzzo confinato con FRP dipendono dalla pressione di confinamento applicata. Quest'ultima è funzione della rigidità del sistema e della forma della sezione trasversale dell'elemento da confinare. Per la redistribuzione dei carichi verticali non è consentito fare affidamento sulla duttilità di elementi soggetti a sforzo normale centrato o con piccola eccentricità. Un sistema confinante a base di FRP (elastico fino a rottura), a differenza di un sistema di acciaio (elasto-plastico), esercita

una pressione laterale sempre crescente, in senso stretto, all'aumentare della dilatazione trasversale dell'elemento confinato.

Un tipico legame tensione-deformazione “ $\sigma$ - $\varepsilon$ ” relativo a prove di compressione condotte su provini confinati con FRP è riportato in Figura 4.7

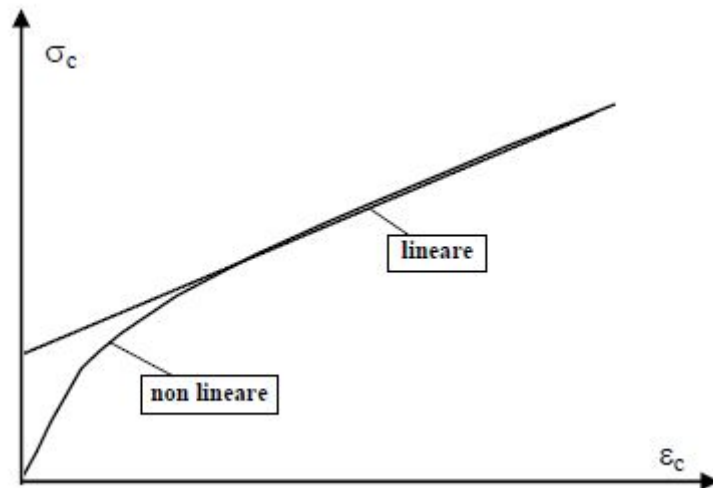


Figura 4.7- Andamento del legame tensione-deformazione per calcestruzzo confinato con FRP

Per valori della deformazione assiale  $\varepsilon_c$  pari allo 0.2%, la tensione nel calcestruzzo confinato è solo di poco superiore a quella esibita dal calcestruzzo non confinato, e cioè alla resistenza di quest'ultimo. Per deformazioni superiori allo 0.2% il legame tensione-deformazione è non lineare e la pendenza della corrispondente curva “ $\sigma$ - $\varepsilon$ ” diminuisce progressivamente fino ad assumere, nell'ultimo tratto, un valore pressoché costante. In quest'ultimo tratto, ad andamento lineare, il calcestruzzo confinato perde progressivamente la sua integrità per effetto di una fessurazione sempre più estesa.

Il collasso dell'elemento confinato si raggiunge per rottura delle fibre. Tuttavia, a partire da un certo valore della deformazione assiale, l'elemento confinato con FRP è assimilabile ad un recipiente dalle pareti molto flessibili riempito di materiale incoerente. Da questo momento in poi, esso perde di fatto la propria funzionalità potendo assorbire solo modeste ed insignificanti sollecitazioni trasversali. In considerazione di ciò, il collasso dell'elemento confinato è convenzionalmente raggiunto quando si attinge una deformazione limite delle fibre pari a 0.004.

#### **4.7.1 Resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato**

Il confinamento di un elemento di c.a. con FRP si rende necessario quando occorre incrementare la sua resistenza in condizioni di compressione centrata o in presenza di piccola eccentricità.

Per ottenere un efficace confinamento è buona norma disporre le fibre in direzione perpendicolare all'asse dell'elemento.

Nel caso di disposizione ad elica, l'efficacia del confinamento va opportunamente valutata.

In assenza di una pretensione iniziale, il rinforzo di FRP esercita un confinamento passivo sulla membratura compressa. L'azione di confinamento diventa significativa nella fase di plasticizzazione, e quindi di fessurazione, dell'elemento rinforzato, a seguito della più vistosa dilatazione trasversale esibita da quest'ultimo. In maniera esplicita, si rileva che prima della fessurazione del calcestruzzo il sistema a base di FRP è praticamente scarico.

La verifica dell'elemento confinato consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

$$N_{Sd} \leq N_{Rcc,d} \quad (4.18)$$

Essendo  $N_{Sd}$  il valore di progetto dell'azione assiale agente (da valutarsi, per le diverse combinazioni di carico previste, come prescritto dalla Normativa vigente),  $N_{Rcc,d}$  il valore di progetto della resistenza dell'elemento confinato.

#### **4.7.2 Duttività di elementi presso-inflessi confinati con FRP**

Il confinamento con FRP può essere realizzato anche su elementi di calcestruzzo soggetti a pressoflessione; in tal modo è possibile incrementare la loro duttilità e, solo in misura ridotta, la loro resistenza. In mancanza di determinazioni più accurate, la valutazione della curvatura ultima di una sezione pressoinflessa può essere perseguita ipotizzando un classico legame costitutivo del tipo parabola-rettangolo, caratterizzato da una



resistenza massima pari a  $f_{cd}$ , il cui tratto costante si estenda fino ad un valore della deformazione ultima di progetto,  $\varepsilon_{cu}$ , fornito dalla seguente relazione:

$$\varepsilon_{cu} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}} \quad (4.19)$$

essendo  $f_{l,eff}$  la pressione efficace di confinamento e  $f_{cd}$  la resistenza di progetto del calcestruzzo non confinato.

# Bibliografia

---

- **Experimental response of masonry walls in-plane loading strengthened with GFRP strips**  
COMPOSITE STRUCTURES.  
Autore/i: Capozucca, R.; Magagnini, E.
- **Delamination Buckling of FRP: Experimental Tests and Theoretical Model**  
Proceedings of the 13th International Conference on Damage Assessment of Structures  
Autore/i: Capozucca, R.; Magagnini, E.; Vecchiotti, M. V.  
Editore: Springer
- **Modelling of historic brickwork walls strengthened with GFRP strips. Brick and Block Masonry**  
From Historical to Sustainable Masonry - Proceedings of the 17th International Brick/Block Masonry Conference  
Autore/i: Capozucca, R.; Magagnini, E.  
Editore: Taylor & Francis Group, London
- **Analysis of Damaged RC beams strengthened with NSM FRP**  
Proc.23rd International Conference on Composite Structures (ICCS23) & 6th International Conference on Mechanics of Composites (MECHCOMP6).  
Autore/i: Capozucca, R.; Magagnini, E.; Vecchiotti, M. V.
- **RC beam models damaged and strengthened with GFRP strips under bending loading and free vibration**  
COMPOSITE STRUCTURES  
Autore/i: Capozucca, R.; Magagnini, E.
- **Experimental static and dynamic response of RC beams damaged and strengthened with NSM GFRP rod**  
COMPOSITE STRUCTURES  
Autore/i: Capozucca, R.; Magagnini, E.; Vecchiotti, M. V.

- **Experimental response of historic masonry under compression and shear loading: damage and strengthening with FRP – plenary lecture**  
Advanced Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures  
Autore/i: Capozucca, R.  
Editore: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
- **Delamination Buckling of FRP Strips in Strengthened Structural RC Beams and Masonry Walls**  
TEM JOURNAL  
Autore/i: Capozucca, R.; Magagnini, E.; Samir, Khatir
- **Experimental vibration analysis of damaged RC beams and strengthened with FRP**  
Proc. ICCE-26  
Autore/i: Capozucca, R.; Magagnini, E.; M., Vittoria Vecchiatti
- **Static and free vibration analysis of RC beams with NSM CFRP rectangular rods**  
COMPOSITES. PART B, ENGINEERING  
Autore/i: Capozucca R.; Bossoletti S.
- **Effects of mortar layers in the delamination of GFRP bonded to historic masonry**  
COMPOSITES. PART B, ENGINEERING  
Autore/i: Capozucca R.
- **Experimental FRP/SRP-historic masonry delamination**  
COMPOSITE STRUCTURES  
Autore/i: Capozucca R.