

*All In One: Vulnerabilità ed adeguamento di strutture esistenti in
cemento armato e muratura anche con l'ausilio di materiali
fibrorinforzati*



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: **teoria e normativa**

Luciano Feo

*Dipartimento di Ingegneria Civile
Università degli Studi di Salerno*

l.feo@unisa.it

Roma, 29 novembre 2012

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Definizione dei Materiali Compositi

Un **materiale composito** può essere definito come la combinazione di due o più materiali distinti in modo che le sue proprietà (fisiche e chimiche) siano superiori a quelle dei singoli componenti.

I principali costituenti di un materiale composito sono:

- la **matrice** (o **materiale base**) che agisce da legante,
- il **materiale di rinforzo** (o **carica**) che viene aggiunto sotto forma di particelle, fibre corte o fibre lunghe (**compositi fibrosi**).

Generalmente il **materiale di rinforzo** possiede elevate proprietà meccaniche (rigidezza e resistenza) ed una bassa densità, mentre la **matrice** è caratterizzata da proprietà meccaniche più scadenti.

Classificazione dei Materiali Compositi

In base alla natura della matrice i materiali compositi possono essere classificati in:

- Materiali compositi a matrice polimerica (o plastici):
NMMC (*Non Metal Matrix Composites*) o
PMC (*Polymer Matrix Composites*);
- Materiali compositi a matrice metallica:
MMC (*Metal Matrix Composites*);
- Materiali compositi a matrice ceramica:
CMC (*Ceramic Matrix Composites*).

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Definizione degli FRP (*Fiber Reinforced Polymers*)

Nel **campo dell'Ingegneria Civile** i materiali compositi più diffusi sono quelli plastici fibrorinforzati, generalmente denominati con la sigla **FRP** (*Fiber-Reinforced Polymers*).

In base alla natura delle fibre, questi ultimi vengono denominati rispettivamente:

- **GFRP** (*Glass Fiber-Reinforced Polymers*) o semplicemente **GRP** (*Glass-Reinforced Polymers*), nel caso di fibre di vetro;
- **CFRP** (*Carbon Fiber-Reinforced Polymers*) o semplicemente **CRP** (*Carbon-Reinforced Polymers*), nel caso di fibre di carbonio;
- **AFRP** (*Aramid Fiber-Reinforced Polymers*) o semplicemente **ARP** (*Aramid-Reinforced Polymers*) nel caso di fibre aramidiche.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Materiali compositi fibrosi

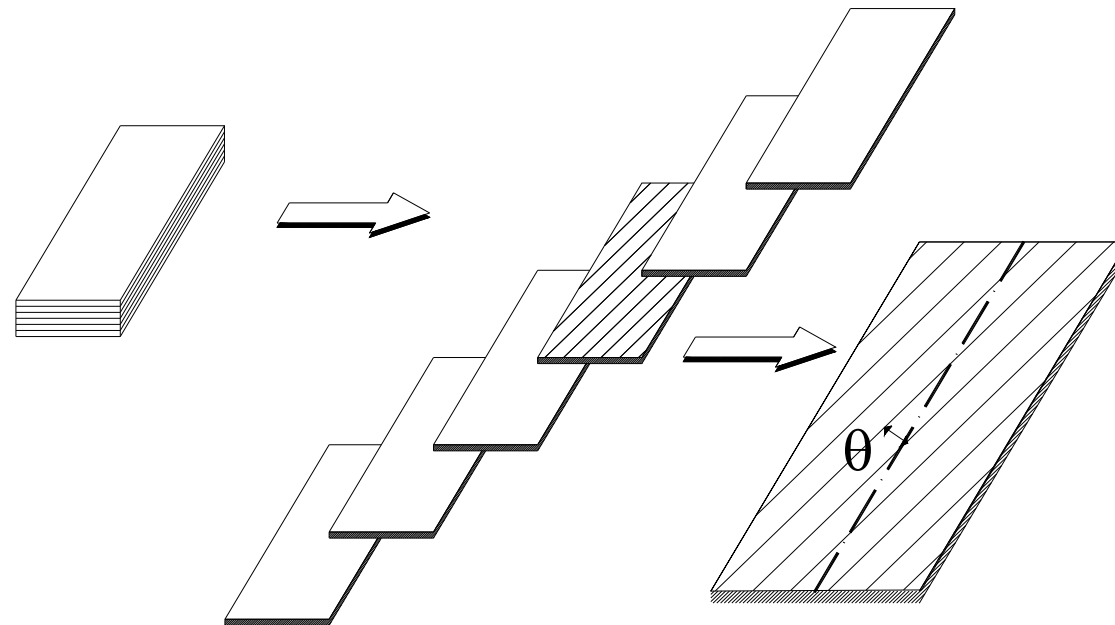
- le fibre sono disposte in modo da risultare tutte parallele fra loro (**fibre unidirezionali**),
- le fibre sono disposte in più direzioni (**fibre multidirezionali**).

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Compositi laminati

Sovrapponendo più strati di materiale composito fibroso (**LAMINE**) si ottengono i **compositi laminati**.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Tipi di fibre

Le fibre più comunemente utilizzate nei materiali compositi fibrosi a **matrice polimerica** sono:

Fibre di vetro

Fibre di carbonio

Fibre aramidiche

Confronto tra le proprietà delle fibre maggiormente utilizzate



| Tipo di Fibra | Diametro tipico (μm) | Densità ρ (g/cm^3) | Carico di rottura (MPa) | Modulo elastico E (MPa) |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Vetro E | 10 | 2,54 | 3.400 | 73.000 |
| Vetro S (R) | 10 | 2,53 | 4.400 | 86.000 |
| Aramide Kevlar 29 | 11,9 | 1,44 | 3.600 | 62.000 |
| Aramide Kevlar 49 | 11,9 | 1,45 | 3.600 | 131.000 |
| Carbonio P-55 | 10 | 2,00 | 1.900 | 380.000 |
| Carbonio P-100 | 10 | 2,15 | 2.200 | 690.000 |
| Carbonio T-300 | 7 | 1,76 | 3.200 | 228.000 |

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Matrici polimeriche

Le matrici polimeriche possono essere distinte in:

- **resine termoindurenti (TS – *Thermoset polymers*)**,
- **resine termoplastiche (TP – *Thermoplastic polymers*)**.

La **scelta** fra i due suddetti tipi di resina è spesso condizionata dalla facilità del processo produttivo o da considerazioni di carattere economico.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Resine termoindurenti

Le resine termoindurenti più comuni sono le seguenti:

le poliesteri,

le vilinesteri,

le resine epossidiche,

le resine fenoliche.

Resine epossidiche

Tra le resine termoindurenti quelle **epossidiche** sono le più utilizzate, grazie alle seguenti caratteristiche:

- versatilità,
- elevate proprietà meccaniche,
- ottima resistenza alla corrosione,
- semplicità del processo di trattamento, che può avvenire con successo ad una qualsiasi temperatura compresa tra 5 C e 150 C.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Valori medi delle proprietà meccaniche delle matrici termoindurenti

| Matrici termoindurenti | Modulo di elasticità a trazione [GPa] | Resistenza a trazione [MPa] | Resistenza a compressione [MPa] | Resistenza a taglio [MPa] | Deformazione ultima a trazione [%] | Modulo di elasticità a flessione [GPa] | Resistenza a flessione [MPa] | coefficiente di dilatazione termica [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$] | Coefficiente di Poisson | T_g [$^{\circ}\text{C}$] | Densità [g/cm^3] |
|------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|------------------------------|--|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| <i>Polyester</i> | | | | | | | | | | | |
| Orthophthalic | 3.4 | 55.2 | - | - | 2.1 | 6.9 | 220.7 | - | 0.38 | - | - |
| Isophthalic | 3.4 | 75.9 | 117.2 | 75.9 | 3.3 | 7.6 | 241.4 | 30 | 0.38 | - | - |
| BPA Fumavate | 2.8 | 41.4 | 103.5 | - | 1.4 | 9 | 158.6 | - | 0.38 | - | - |
| Chlorendic | 3.4 | 20.7 | 103.5 | - | - | 9.7 | 193.1 | - | 0.38 | - | - |
| <i>Vinyl Ester</i> | | | | | | | | | | | |
| Derakane 411-45 | 3.4 | 82.7 | 117.1 | 82.7 | 5 – 6 | 3.1 | 124 | - | 0.38 | - | - |
| <i>Epoxy</i> | | | | | | | | | | | |
| 9310/9360 @23°C | 3.12 | 75.8 | - | - | 4 | - | - | 54 | 0.38 | 185 | 1.2 |
| 9310/9360 @ 149°C | 1.4 | 26.2 | - | - | 5.2 | - | - | - | - | 185 | 1.2 |
| 9420/9470 (A) @23°C | 2.66 | 57.2 | - | - | 3.1 | - | - | - | - | 195 | 1.162 |
| 9420/9470 (B) @23°C | 2.83 | 77.2 | - | - | 5.2 | - | - | - | - | 155 | 1.158 |
| HPT1072/1062-M@23°C | 3.383 | - | - | - | - | 3.383 | 131 | - | - | 239 | - |
| <i>Bismaleimide</i> | | | | | | | | | | | |
| 796/TM-123 @24°C | 3.582 | - | - | - | - | 3.582 | 132 | - | - | 260 | - |
| 796ITM-123 249°C | - | - | - | - | - | 2.48 | 90 | - | - | 260 | - |

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Valori medi delle proprietà meccaniche di matrici termoplastiche

| Matrici termoplastiche | Modulo di elasticità a trazione | Resistenza a trazione | Deformazione ultima a trazione | Coefficiente di Poisson | Coefficiente di dilatazione termica | T _g | T ₀ | Temperatura di processo | Densità |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------------|
| | [GPa] | [MPa] | [%] | | [10 ⁻⁴ /°C] | [°C] | [°C] | [°C] | [g/cm ³] |
| PEEK | 3.24 | 100 | 50 | 0.4 | 47 | 143 | 343 | 400 | 1.32 |
| PPS | 3.3 | 82.7 | 5 | 0.37 | 49 | 90 | 290 | 343 | 1.36 |
| PSUL | 2.48 | 70.3 | 75 | 0.37 | 56 | 190 | - | 300 | 1.24 |
| PEI | 3 | 105 | 60 | 0.37 | 56 | 217 | - | 343 | 1.27 |
| PAI | 2.756 | 89.57 | 30 | 0.37 | 36 | 243 | - | 300 | 1.4 |
| K-111 | 3.76 | 102 | 14 | 0.365 | - | 250 | - | - | 1.31 |
| LARC-TPI | 3.72 | 119.2 | 5 | 0.36 | 35 | 264 | 325 | 343 | 1.37 |

Confronto tra le proprietà fisico-meccaniche di alcuni materiali compositi e convenzionali

| Materiali | Moduli elastici (KN/mm ²) | | | Resistenza ultima (N/mm ²) | | | Densità (g/ cm ³) |
|---|--|--------------------------|--------------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| | Assiale E _L | Trasv. E _T | Tang. G _{LT} | Tensione assiale σ _L | Tensione trasv. σ _T | Tensione tang. τ _{LT} | |
| Grafite / epoxy ad alta resistenza | 138 | 6,9 | 4,5 | 1517 | 41 | 97 | 1,57 |
| Grafite / epoxy ad alto modulo | 221 | 6,9 | 4,8 | 1206 | 34 | 69 | 1,60 |
| Grafite / epoxy ad altissimo mod | 303 | 6,9 | 6,6 | 758 | 28 | 48 | 1,68 |
| kevlar 49 / epoxy | 86 | 5,5 | 2,1 | 1517 | 28 | 41 | 1,38 |
| Vetro S / epoxy | 55 | 14 | 3,4 | 1793 | 41 | 69 | 2,00 |
| Acciaio | 207 | 207 | 79 | 414 | 414 | 241 | 7,83 |
| Alluminio 6061-T6 | 72 | 72 | 26 | 290 | 290 | 193 | 2,70 |

Rapporti rigidezze/peso e resistenze/peso di alcuni materiali compositi e convenzionali

| Materiali | E_L / ρ | E_T / ρ | σ_L / ρ | σ_T / ρ |
|--|---------------|--------------|-------------------|-------------------|
| Grafite / epoxy <i>ad alta resistenza</i> | 87,90 | 4,39 | 966,24 | 26,11 |
| Grafite / epoxy <i>ad alto modulo</i> | 138,12 | 4,31 | 753,75 | 21,25 |
| Grafite / epoxy <i>ad altissimo mod</i> | 180,36 | 4,11 | 451,19 | 16,67 |
| kevlar 49 / epoxy | 62,32 | 3,96 | 1099,27 | 20,29 |
| Vetro S / epoxy | 27,50 | 7,00 | 896,5 | 20,50 |
| Acciaio | 26,44 | 26,44 | 52,87 | 52,87 |
| Alluminio 6061-T6 | 26,67 | 26,67 | 107,41 | 107,41 |

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Forme commerciali

In commercio i materiali compositi sono disponibili sotto forma di:

- **tessuto,**
- **lamine (pultruse).**

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa

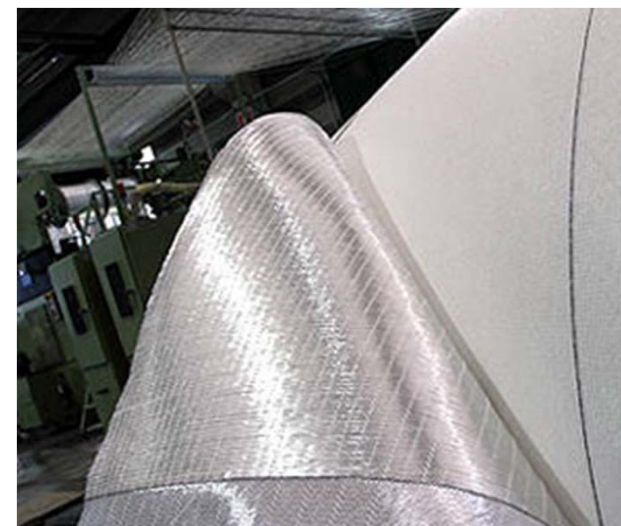


Forme commerciali

Lamine pultruse



Tessuti



Ordito, trama



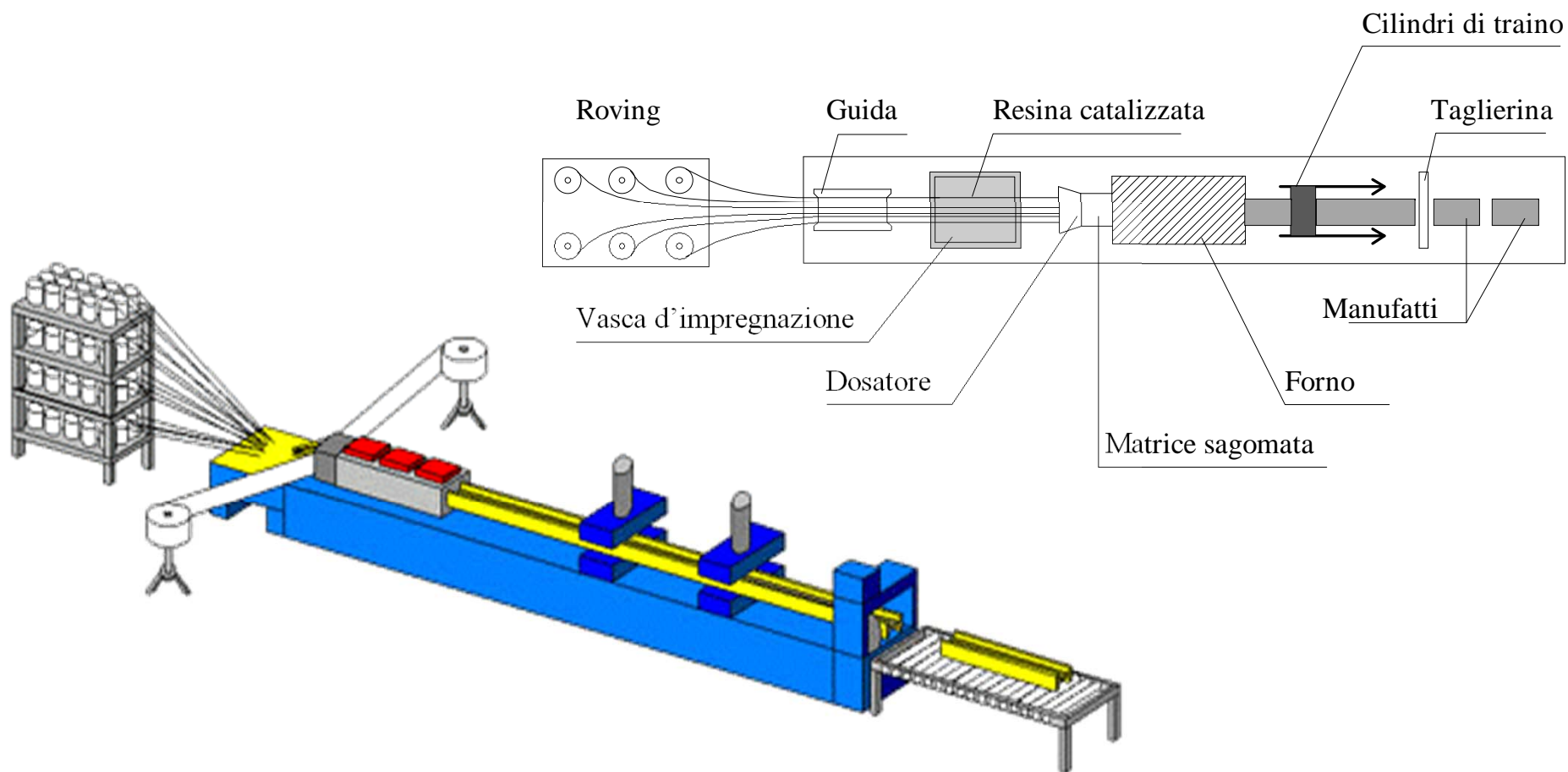
La serie dei fili verticali (nella direzione della lunghezza del tessuto) è denominata **ordito** (*warp*), mentre la serie dei fili orizzontali (nella direzione della larghezza del tessuto) è denominata **trama** (*fill* o *weft*).

I tessuti si dicono **non ibridi** se sono costituiti da un solo tipo di fibra oppure **ibridi** se presentano più tipi di fibre.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Pultrusione



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Concetti base della progettazione e della sicurezza

Un ambito molto importante, nel quale i compositi fibrorinforzati si stanno diffondendo attiene al **rinforzo strutturale**.

Gli interventi più comuni riguardano la **riabilitazione di elementi in c.a. sia inflessi** (travi) che **prevalentemente compressi** (pilastri) e di **strutture in muratura**.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Rinforzo di elementi inflessi

Le situazioni più comuni che motivano il placcaggio sono:

Incremento dei carichi

- modifiche di destinazione d'uso di edifici,
- incremento dei carichi accidentali nei magazzini e nei depositi,
- incremento dei carichi di traffico sui ponti,
- installazione di macchinari pesanti in edifici ad uso industriale,
- strutture soggette a vibrazioni.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Rinforzo di elementi inflessi

Danni agli elementi strutturali

- invecchiamento e degrado dei materiali,
- corrosione delle barre di armatura,
- collisione di veicoli,
- incendi.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Rinforzo di elementi inflessi

Miglioramento dell'efficienza statica

- riduzione delle deformazioni,
- riduzione delle tensioni a carico delle armature,
- riduzione dell'ampiezza delle fessurazioni.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Rinforzo di elementi inflessi

Modifiche dello schema strutturale

- demolizione di parti di solette per praticare aperture,
- demolizione di pareti e colonne.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Rinforzo di elementi inflessi

Difetti di progettazione o di costruzione

- armature insufficienti,
- sezioni strutturali inadeguate.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Rinforzo di colonne prevalentemente compresse

Le situazioni più comuni che motivano il placcaggio sono:

Incremento dei carichi

- incremento dei carichi assiali (-> fasciature orizzontali),
- adeguamento sismico (-> fasciature verticali ed orizzontali).

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Rinforzo di colonne prevalentemente compresse

Difetti di progettazione o di costruzione

- duttilità insufficiente
(-> confinamento trasversale continuo con nastri),
- armature insufficienti.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



VANTAGGI DEGLI FRP

I materiali fibrorinforzati, se comparati con gli acciai convenzionali, presentano indubbi vantaggi, quali:

- **elevata resistenza a trazione,**
- **basso peso specifico,**
- **eccellente resistenza alla corrosione.**

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



VANTAGGI DEGLI FRP

Inoltre, le tecniche di ripristino mediante FRP sono caratterizzate da:

- semplicità,
- rapidità.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



VANTAGGI DEGLI FRP

Interventi di placcaggio o di fasciatura possono essere infatti effettuati in **tempi brevissimi** e spesso **senza dover interdire temporaneamente l'esercizio della struttura**. Tale aspetto rappresenta, nella maggior parte dei casi, un notevole vantaggio, come ad esempio accade per gli edifici industriali.

Poiché la resistenza dei compositi fibrorinforzati è cospicua, gli **spessori di rinforzo risultano molto contenuti**, cosicché gli **elementi strutturali placcati o fasciati presentano variazioni minime rispetto alle loro dimensioni originarie**.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



SVANTAGGI DEGLI FRP

- il **modulo elastico** di questi materiali è **più basso** di quello dell'acciaio (ad eccezione dei compositi in fibra di carbonio), cosicché per interventi di irrigidimento sono necessari spessori più elevati;
- il **costo è attualmente superiore rispetto a quello dell'acciaio**, anche in relazione all'elevato costo degli impianti di fabbricazione ed alla modesta domanda del prodotto;
- tutti i tipi di matrice impiegati presentano una **temperatura** al di sopra della quale le caratteristiche meccaniche decadono rapidamente;
- il comportamento degli **FRP è elasto-fragile**, il che induce ad elevare i coefficienti di sicurezza in fase di progetto.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.

Nuovo Palazzo di Giustizia di Napoli Torre "A"



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.

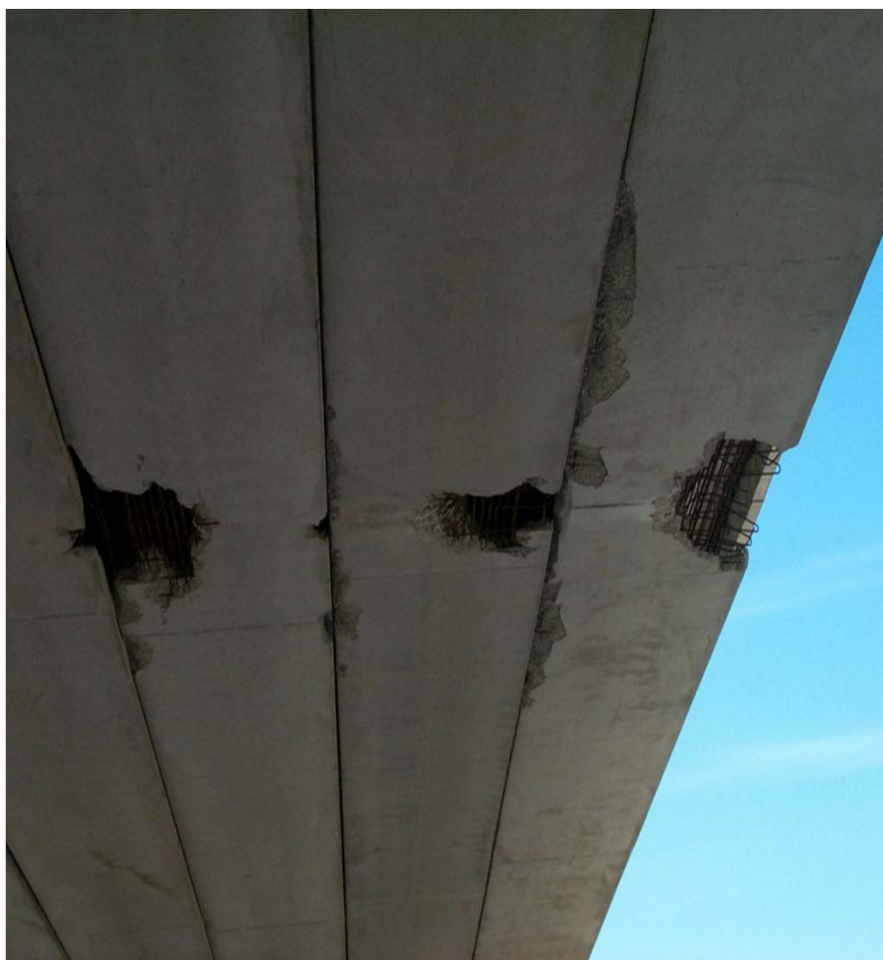
Ripristino di alcune travi da ponte fortemente danneggiate da un impatto con un veicolo fuori sagoma che ha tranciato alcuni trefoli interni



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.

Dopo il rinforzo

Prima del rinforzo



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.

Il collaudo

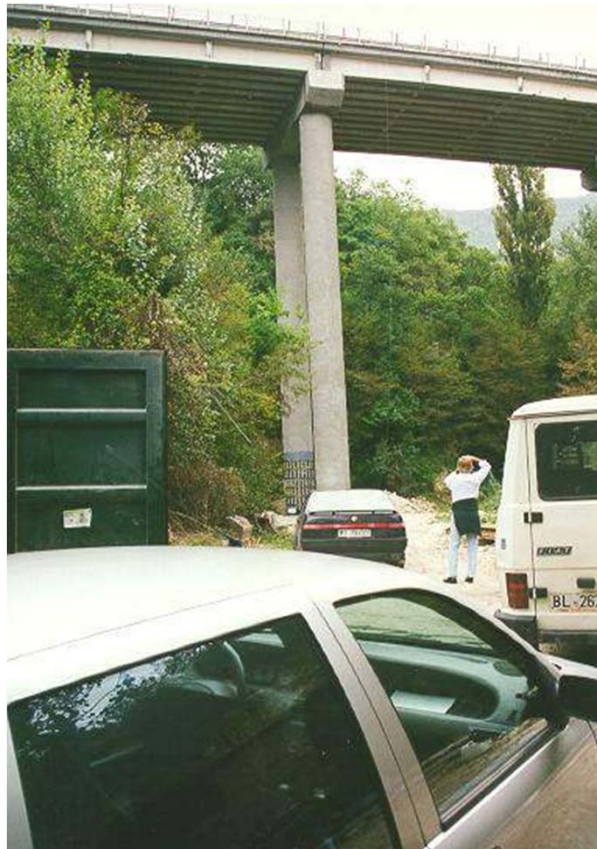


Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.

Rinforzo post sisma Umbro marchigiano del Settembre 1997 di alcune colonne del viadotto della strada statale Ancona - Fabriano.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



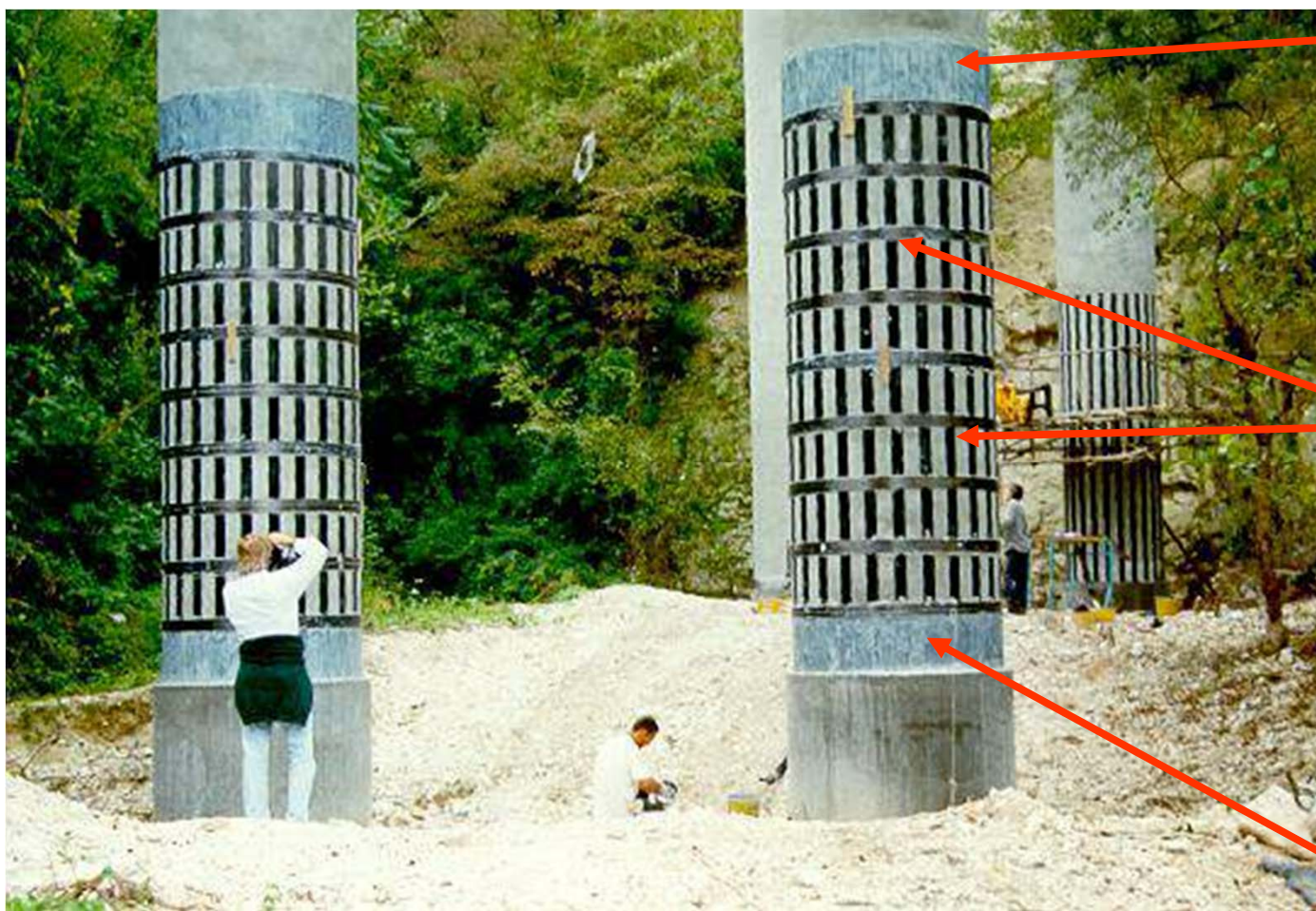
ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



ESEMPI DI RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A.



Tessuti in CFRP

Lamine in CFRP

Tessuti in CFRP

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



MECCANISMI DI COLLASSO FLESSIONALE “CLASSICI” DI UNA TRAVE PLACCATA CON FRP

Il collasso di una sezione inflessa in c.a. placcata con nastri/lamine in FRP può avvenire:

- **per raggiungimento della deformazione ultima del conglomerato compresso,**
- **per raggiungimento della deformazione ultima dell'acciaio teso,**
- **per raggiungimento della deformazione ultima del rinforzo in FRP.**

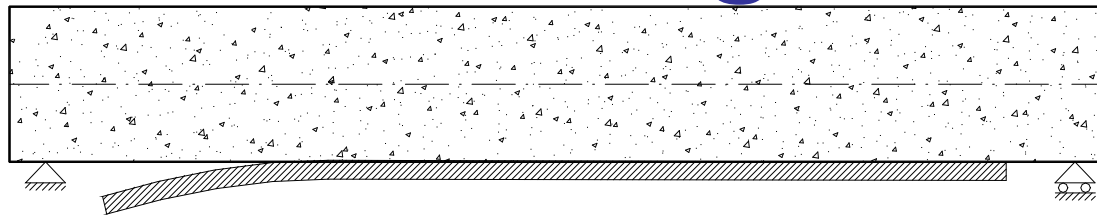
Le sperimentazioni effettuate hanno mostrato come possano verificarsi anche altri meccanismi di rottura.

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



MECCANISMI DI COLLASSO PREMATURO

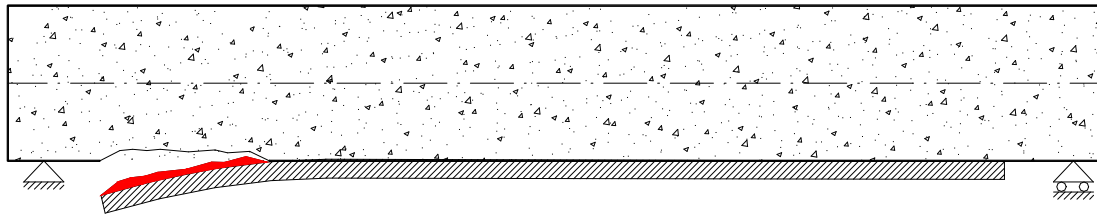
“Peeling”



collasso per distacco della lamina dall'intradosso della trave

MECCANISMI DI COLLASSO PREMATURO

“Concrete ripping”



*Collasso a taglio per distacco dello strato di
conglomerato tra la lamina e l'armatura
longitudinale di acciaio*

***Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di
strutture esistenti: teoria e normativa***



MECCANISMI DI COLLASSO PREMATURO



***Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di
strutture esistenti: teoria e normativa***



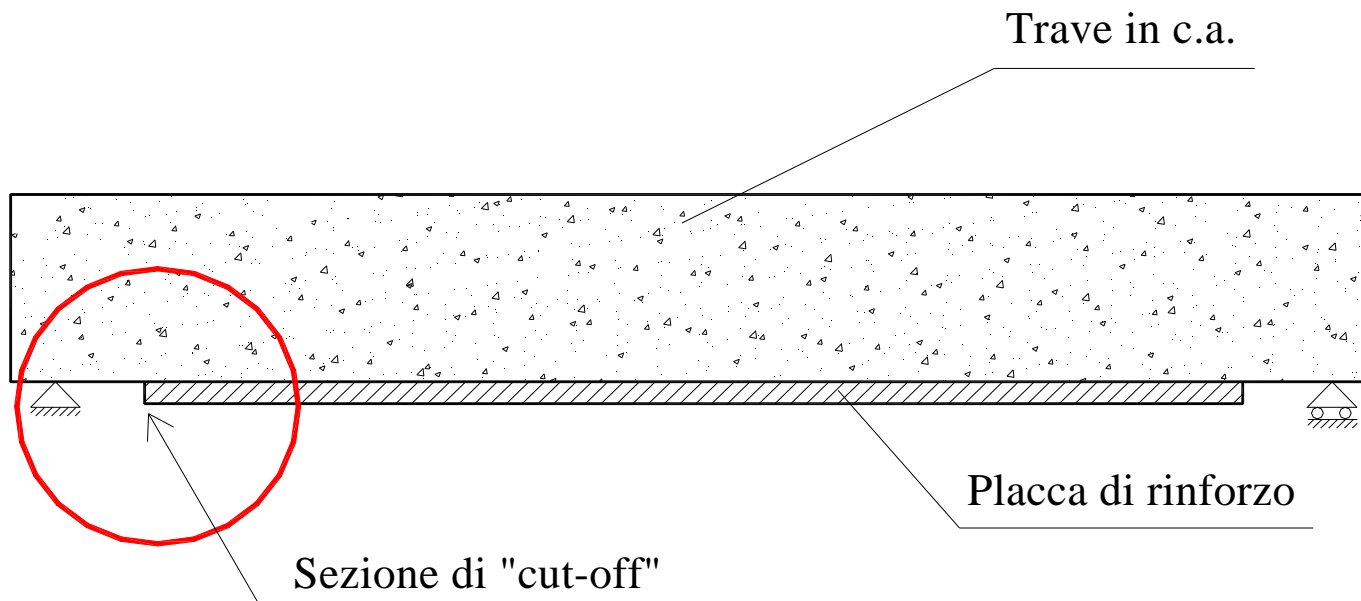
MECCANISMI DI COLLASSO PREMATURO



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



MECCANISMI DI COLLASSO PREMATURO



Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



RICERCA SCIENTIFICA SUL RINFORZO STRUTTURALE



Progetti di ricerca coordinati CNR

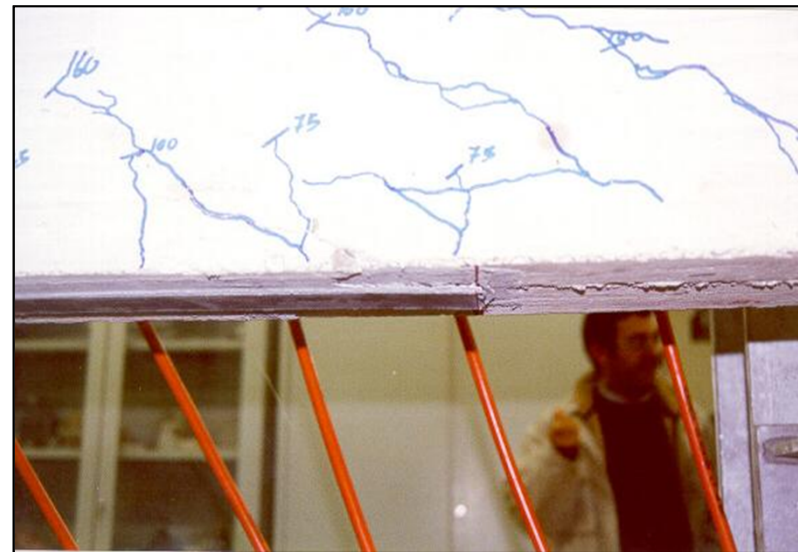
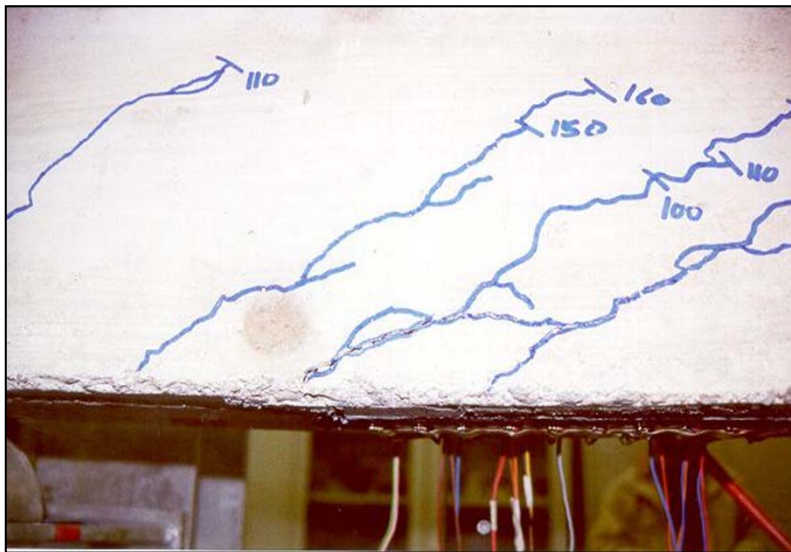
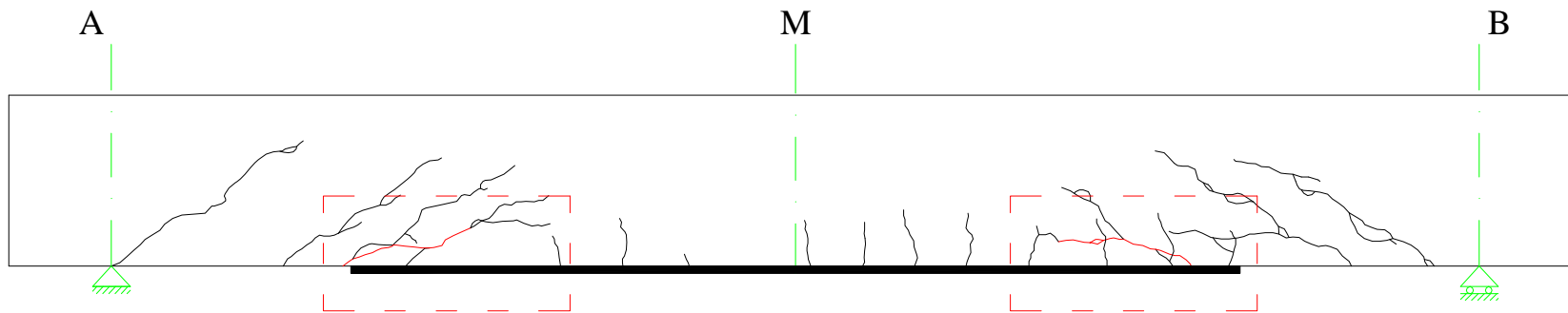


Progetti di ricerca cofinanziati dal MIUR

TRAVE SB4/04/1-H 514/0.65

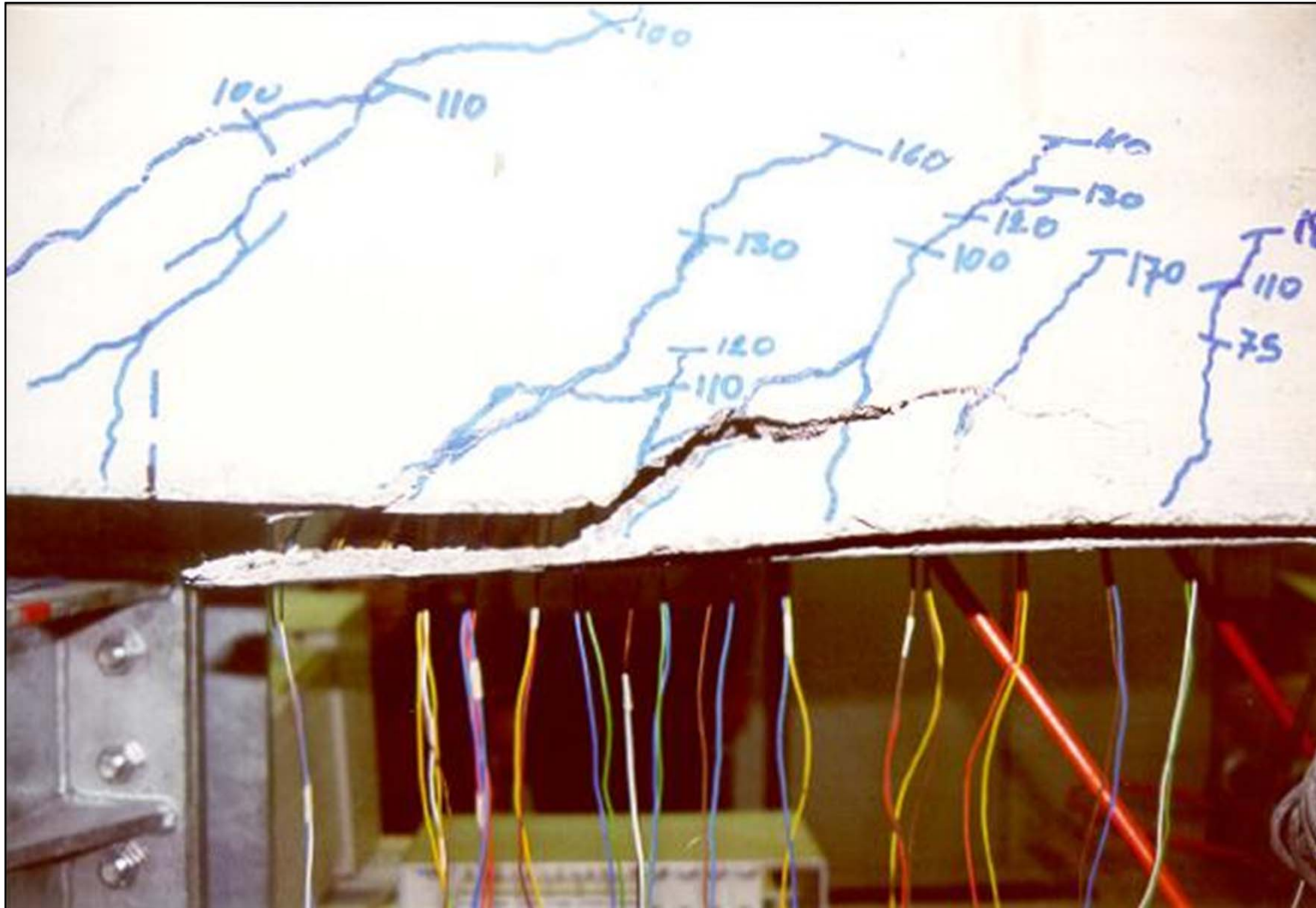
(Evoluzione Stato Fessurativo/Andamento Tensioni Sperimentali)

$$q = 73.86 \text{ kN/m}$$



TRAVE SB4/03/1-H 514/0.75

(foto: "Concrete-ripping")



Legami costitutivi: Materiali elastici lineari isotropi

Nei corsi di base di Scienza delle Costruzioni si ha modo solitamente di approfondire lo studio dei materiali elastici lineari isotropi, obbedienti alla legge di Hooke e caratterizzati dalle stesse proprietà elastiche in tutte le direzioni.

Nonostante le assunzioni piuttosto forti, rientrano in questa classe molti dei materiali da costruzione comunemente utilizzati, come l'**acciaio**, l'**alluminio** e, con qualche cautela aggiuntiva, il **conglomerato cementizio**.

Il legame costitutivo dei materiali elastici lineari isotropi risulta completamente caratterizzato da due soli parametri, tipicamente il **modulo di Young** ed il **coefficiente di Poisson**.

Legami costitutivi: Materiali elastici lineari ortotropi

Non tutti i materiali ammettono un legame costitutivo altrettanto semplice.

E' questo ad esempio il caso dei **materiali compositi fibrorinforzati**: infatti, essi non soddisfano banalmente il requisito di isotropia proprio perché le fibre sono disposte in certe direzioni della matrice.

Tali materiali non sono però completamente anisotropi, cioè privi di qualsivoglia proprietà di simmetria.

In particolare, essi possono essere inquadrati nella classe dei **materiali elastici lineari ortotropi.**

Legami costitutivi: Legge di Hooke generalizzata

Legge di Hooke generalizzata:

$$\mathbf{T}_{ij} = C_{ijhk} \boldsymbol{\varepsilon}_{hk}$$

Le quantità C_{ijhk} , in numero di 81, sono dette **moduli elastici del materiale** (materiale eterogeneo) o **costanti elastiche** (materiale omogeneo).

Non tutte le costanti elastiche sono indipendenti: infatti, per le proprietà di simmetria minore esse si riducono a 36. Inoltre, se il materiale è anche iperelastico il numero delle costanti elastiche indipendenti è pari a 21 (proprietà di simmetria maggiore).

Legami costitutivi: Legge di Hooke generalizzata

Sul piano tecnico riesce spesso più conveniente rifarsi ad una diversa rappresentazione della legge di Hooke, nella quale le componenti di tensione e di deformazione sono ordinati in due vettori colonna di ordine 6, detti rispettivamente **vettore delle tensioni** e **vettore delle deformazioni**.

$$\underline{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}]^T$$

$$\underline{e} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}]^T$$

Legame costitutivo diretto: Matrice delle rigidzze elastiche Q

La **legge di Hooke generalizzata** (o legame costitutivo elastico lineare) può conseguentemente esprimersi nella seguente forma contratta:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{14} & Q_{24} & Q_{34} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{15} & Q_{25} & Q_{35} & Q_{45} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{36} & Q_{46} & Q_{56} & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix}$$

La matrice quadrata di ordine 6, $Q = [Q_{ij}]$ prende il nome di **matrice delle rigidzze elastiche**.

Legame costitutivo inverso: Matrice di deformabilità S

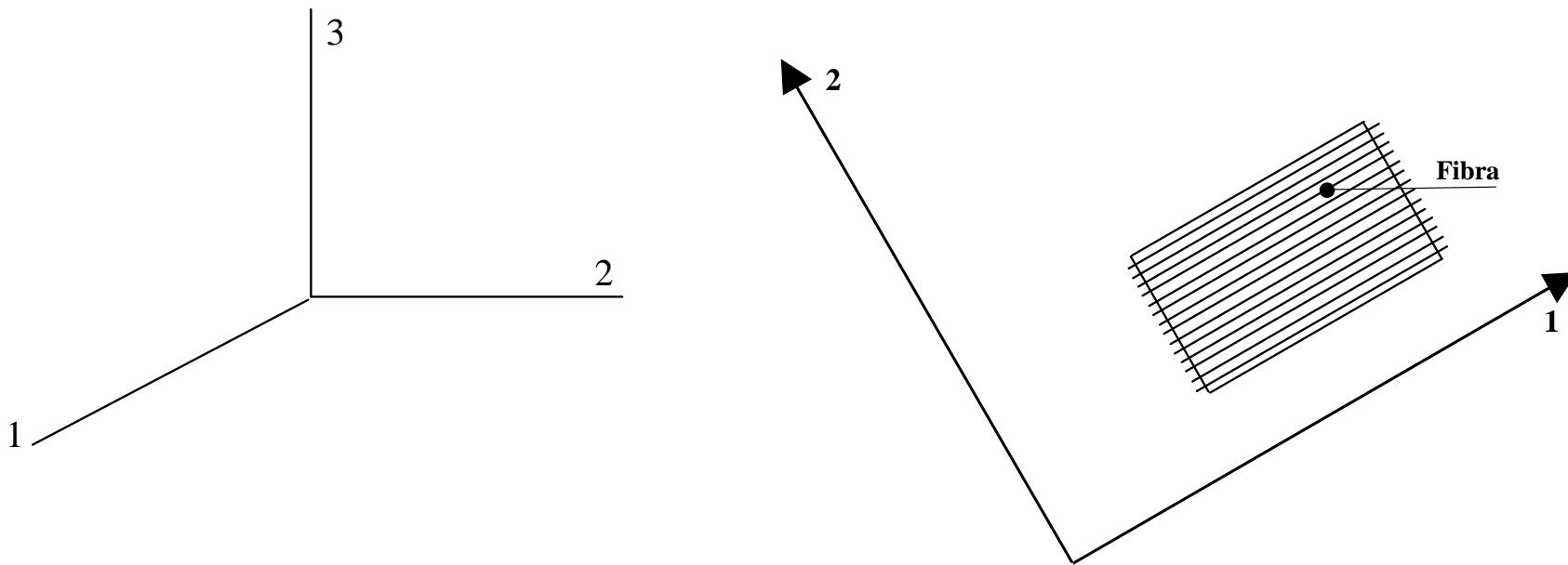
Le relazioni precedenti possono essere invertite ed espresse nella forma (legame costitutivo inverso):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix}$$

La matrice quadrata di ordine 6, $S = [S_{ij}]$ prende il nome di **matrice delle deformabilità elastiche**.

Assi naturali di un materiale ortotropo

Un materiale **ortotropo** è un materiale che possiede tre piani di **simmetria mutuamente ortogonali**.



Gli assi 1, 2 e 3 di intersezione dei tre piani di simmetria ortogonale di un materiale ortotropo prendono il nome di **assi naturali**.

Legame elastico lineare ortotropo

Il legame costitutivo di un materiale elastico lineare ortotropo, rispetto al sistema di assi naturali, può scriversi nella forma:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix},$$

da cui si evince che esso (invocando anche l'ipotesi di iperelasticità) è caratterizzato da **9 costanti elastiche indipendenti**.

Legame elastico lineare ortotropo inverso

Sul piano tecnico viene spesso utilizzato il legame costitutivo inverso, che chiama in causa la **matrice delle deformabilità elastiche**. Quest'ultima può essere esplicitata nella seguente forma, nella quale le componenti sono espresse in funzione di alcune costanti tecniche:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix}.$$

Osservazione: da tale struttura consegue che non vi è alcuna interazione tra deformazioni assiali e tensioni tangenziali, così come tra scorrimenti angolari e tensioni normali.

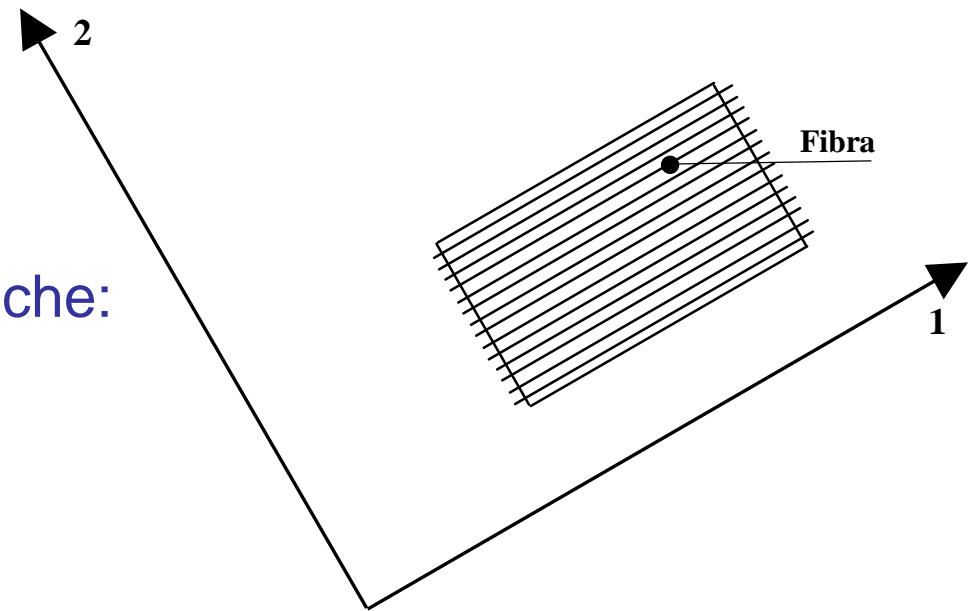
Legami costitutivi: materiali ortotropi

Si rileva che nelle applicazioni correnti, attesa la sottigliezza delle lamine, è lecito assumere.

$$\sigma_3 \cong 0$$

Sovente, si può anche supporre che:

$$\tau_{13} = \tau_{23} \cong 0$$



cioè che lo stato tensionale nella singola lamina sia ovunque piano e che il piano delle tensioni coincida con quello della lamina stessa.

Risposta ortotropa di una lamina in materiale composito

Risposta nel piano rispetto agli **assi naturali 1 – 2**.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \cdot$$

Sistema di riferimento “naturale” e “globale” di una lamina

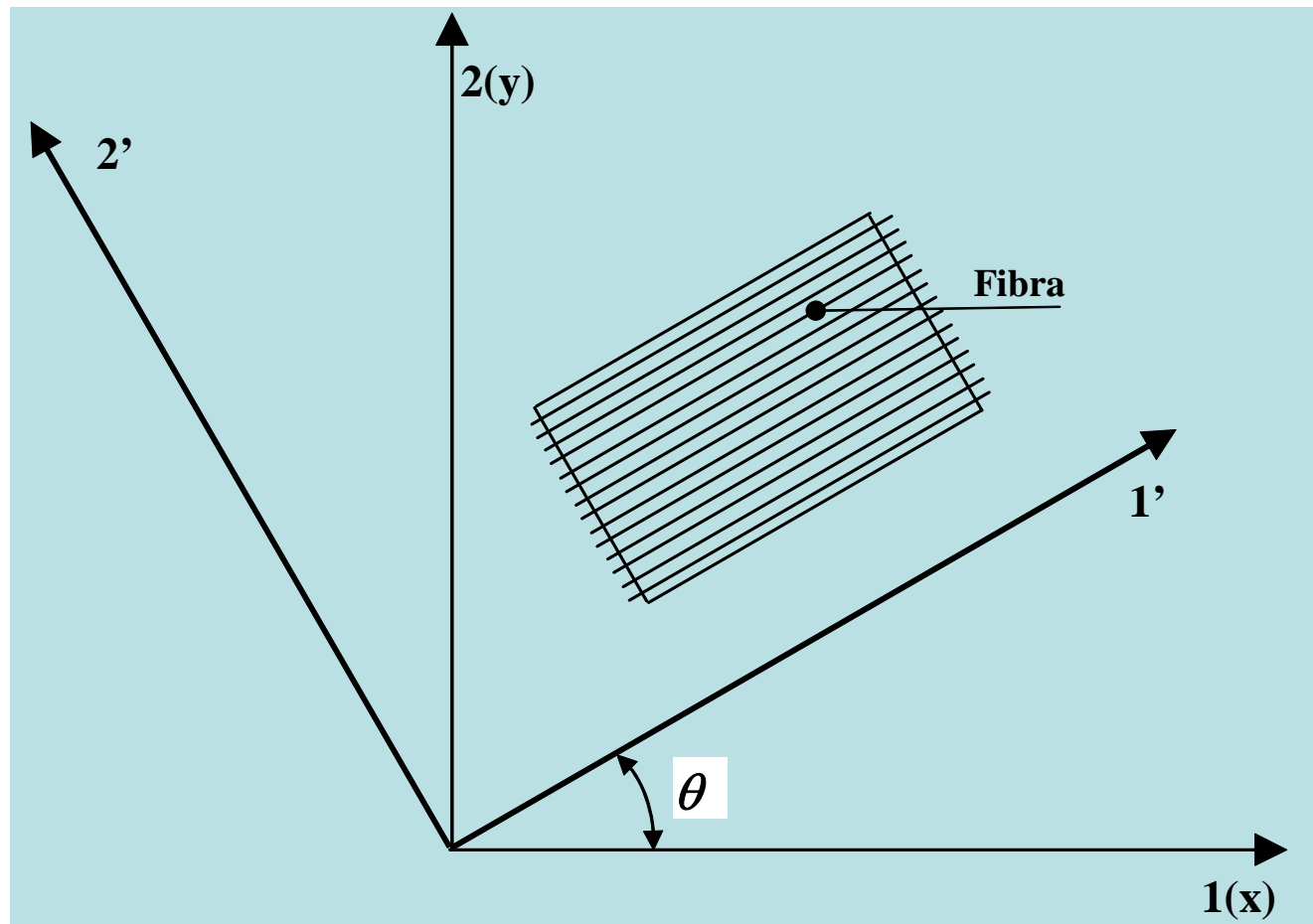
Nel caso di un materiale composito fibrorinforzato ideale, ottenuto disponendo le fibre di rinforzo secondo tre direzioni mutuamente ortogonali dello spazio, gli assi naturali hanno proprio la direzione delle fibre (sistema di riferimento “naturale”).

Nelle applicazioni strutturali accade generalmente di doversi riferire ad un sistema di assi cartesiani ortogonali che non coincidono con quelli naturali (sistema di riferimento “globale”).

Nasce così il problema di vedere in che modo si trasformano la matrice di rigidità e la matrice di deformabilità di un materiale elastico lineare ortotropo allorché ci si riferisca ad un sistema arbitrario di assi cartesiani ortogonali.

Sistema di riferimento “naturale” e “globale” di una lamina

Nel prosieguo si supporrà che il piano della lamina coincida con quello individuato dai corrispondenti assi naturali 1' e 2'; il terzo asse naturale, cioè l'asse 3', sarà invece ortogonale alla lamina.



Matrice di passaggio

Com'è ben noto dall'Algebra Lineare, le formule di trasformazione delle componenti di un tensore chiamano in causa la matrice di passaggio, dal 'nuovo' sistema di riferimento rispetto al 'vecchio' sistema.

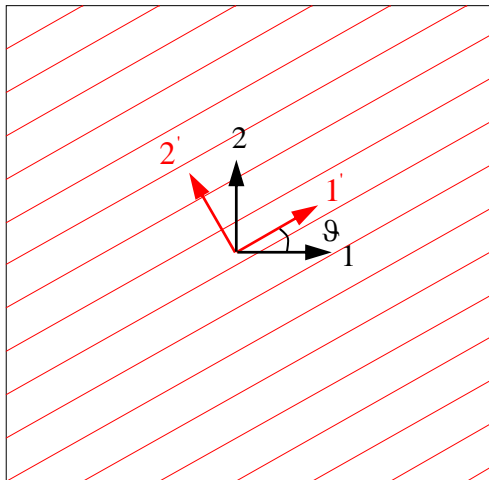
Nel caso in esame, tale matrice è ortogonale (la sua inversa coincide cioè con la sua trasposta) e risulta:

$$[P_{ij}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & -n & 0 \\ n & m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(m = \cos \theta, n = \sin \theta)$$

Risposta ortotropa di una lamina in materiale composito

Risposta nel piano rispetto agli **assi naturali** 1'-2'



$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1' \\ \varepsilon_2' \\ \gamma_{12}' \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1'} & -\frac{\nu_{21}'}{E_2'} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}'}{E_1'} & \frac{1}{E_2'} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}'} \end{bmatrix}}_{\text{Matrice di deformabilità } \underline{S}'} \begin{bmatrix} \sigma_1' \\ \sigma_2' \\ \tau_{12}' \end{bmatrix}$$

Matrice di deformabilità \underline{S}'

Risposta nel piano rispetto ad **assi arbitrari** 1-2 ruotati di θ rispetto a 1'-2'

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -mn \\ n^2 & m^2 & mn \\ 2mn & -2mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1'} & -\frac{\nu_{21}'}{E_2'} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}'}{E_1'} & \frac{1}{E_2'} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

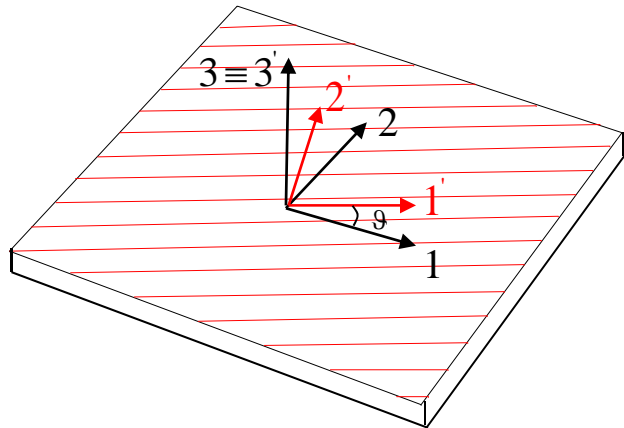
Matrice di deformabilità \underline{S}

Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



Risposta trasversale a taglio rispetto agli **assi naturali** 1'-2'-3'

$$\begin{bmatrix} \gamma'_{23} \\ \gamma'_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{G'_{23}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{G'_{13}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau'_{23} \\ \tau'_{13} \end{bmatrix}$$



Risposta trasversale a taglio rispetto ad **assi arbitrari** 1-2-3 ruotati di θ intorno a 3 rispetto a 1'-2'-3'

$$\begin{bmatrix} \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} m & -n \\ n & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{G'_{23}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{G'_{13}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m & n \\ -n & m \end{bmatrix} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix}$$

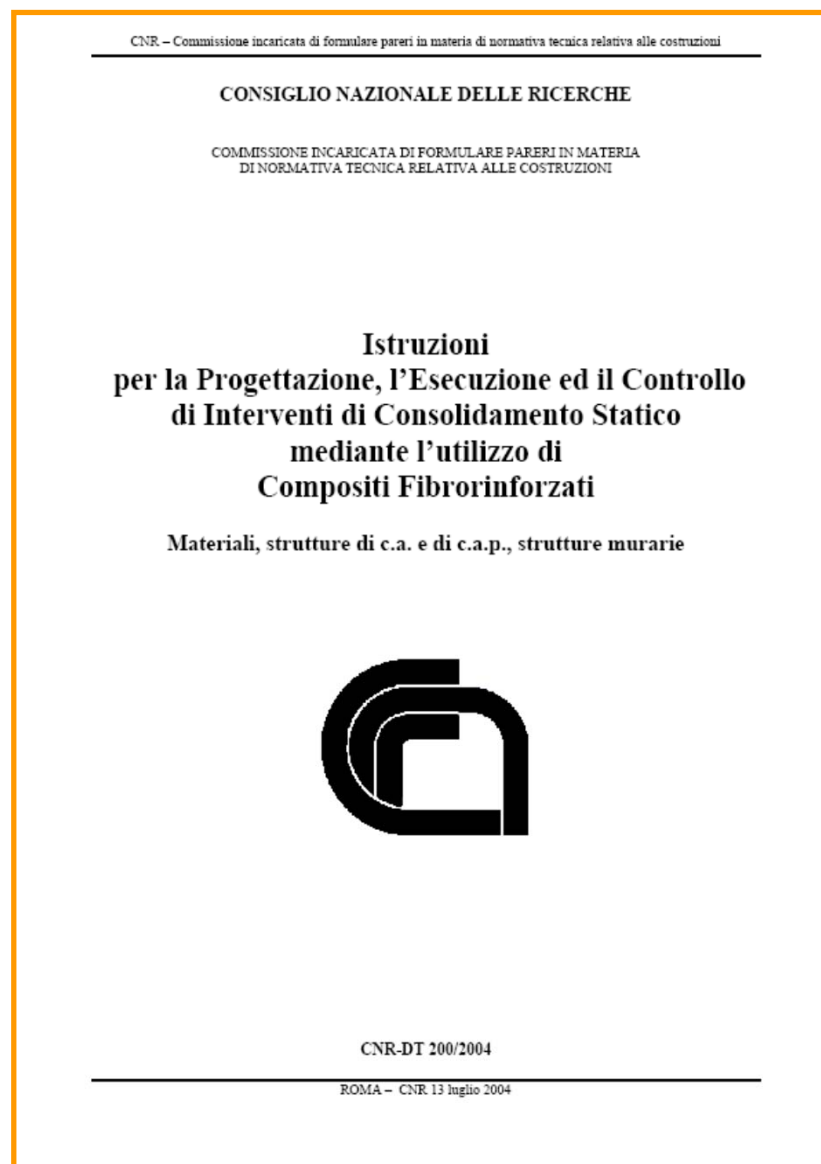
Materiali compositi FRP nel ripristino strutturale di strutture esistenti: teoria e normativa



IL DOCUMENTO TECNICO

CNR-DT 200/2004

www.cnr.it

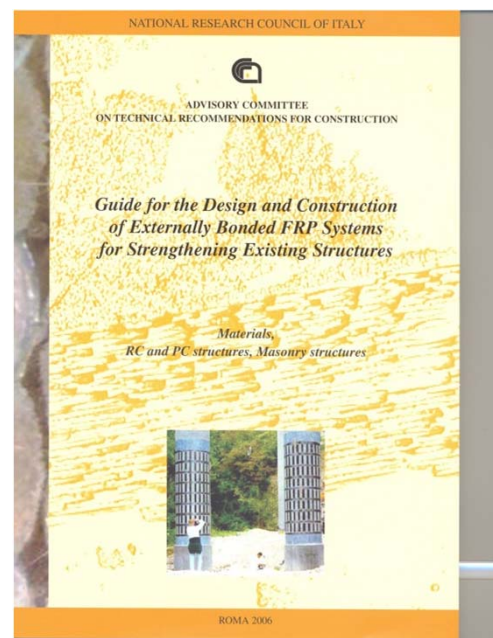


Il Documento CNR-DT 200/2004

Il **DT 200/2004** contenente “**Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati. Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie**”, fa parte della Collana dei Documenti Tecnici editi dal CNR sull'uso strutturale dei materiali compositi fibrorinforzati (FRP).

Esso rappresenta il primo Documento che, rispetto alle altre Istruzioni e/o Linee Guide attualmente disponibili in campo internazionale, affronta **il problema del consolidamento di strutture murarie e di strutture in zona sismica**.

Esso è disponibile sia in lingua italiana che in lingua inglese.



Collana dei Documenti Tecnici del CNR (1/2)



La Collana dei Documenti Tecnici licenziati dal CNR sull'uso dei materiali compositi in ambito strutturale si compone di ulteriori quattro Documenti:

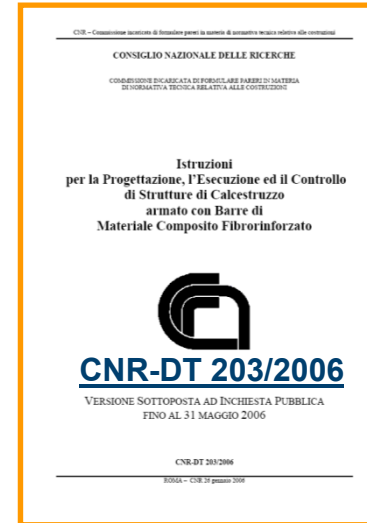
- **DT 201/2005** “Studi preliminari finalizzati alla redazione di istruzioni relative a interventi di consolidamento statico di strutture lignee mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati”;
- **DT 202/2005** “Studi preliminari finalizzati alla redazione di istruzioni per interventi di consolidamento statico di strutture metalliche mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati”;



Collana dei Documenti Tecnici del CNR (2/2)



- **DT 203/2006** “Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato”;
- **DT 204/2006** “Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato”;
- **DT 205/2007** “Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture realizzate con profili sottili pultrusi di materiale composito fibrorinforzato (FRP)”.
I Documenti possono essere consultati sul sito del CNR (www.cnr.it), selezionando l'opzione “attività→certificazione e normazione”.



Un'iniziativa spontanea



L'idea di pubblicare Linee guida per l'utilizzo strutturale dei materiali compositi fibrorinforzati (FRP) nasce alla fine del 2003 da una iniziativa spontanea di un gruppo di docenti impegnati in studi e ricerche sull'argomento.

- **Luigi Ascione**
- **Andrea Benedetti**
- **Edoardo Cosenza**
- **Angelo Di Tommaso**
- **Ciro Faella**
- **Luciano Feo**
- **Antonio Grimaldi**
- **Antonio La Tegola**
- **Raimondo Luciano**

- **Franco Maceri**
- **Gaetano Manfredi**
- **Giorgio Monti**
- **Antonio Nanni**
- **Renato Sante Olivito**
- **Luciano Rosati**
- **Elio Sacco**
- **Marco Savoia**
- **Enrico Spacone**

Il successo dell'iniziativa ed il patrocinio del CNR

All'iniziativa aderirono quasi tutti i docenti e ricercatori italiani impegnati in questo settore emergente e promettente delle costruzioni, i responsabili tecnici delle maggiori ditte produttrici e installatrici di rinforzi in materiale composito, nonché rappresentanti di enti e di società che utilizzano i materiali fibrorinforzati per il consolidamento di manufatti e opere d'arte.

L'iniziativa viene patrocinata dal CNR ed in particolare dalla Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni.



Autori del Documento CNR-DT 200/2004

- AIELLO prof. Maria Antonietta - Università di Lecce
- ASCIONE prof. Luigi - Università di Salerno
- BARATTA prof. Alessandro - Università di Napoli "Federico II"
- BASTIANINI ing. Filippo - Università di Bologna
- BENEDETTI prof. Andrea - Università di Bologna
- BERARDI ing. Valentino Paolo - Università di Salerno
- BORRI prof. Antonio - Università di Perugia
- BRICCOLI BATI prof. Silvia - Università di Firenze
- CERONI ing. Francesca - Università del Sannio
- CERSOSIMO ing. Giuseppe - Interbau S.r.l.- Milano
- COSENZA prof. Edoardo - Università di Napoli "Federico II"
- CREDALI dott. Lino - Ardea S.r.l. - Casalecchio (BO)
- DE LORENZIS ing. Laura - Università di Lecce
- FAELLA prof. Ciro - Università di Salerno
- FANESI ing. Elisabetta - Politecnico di Milano
- FEO prof. Luciano - Università di Salerno
- FORABOSCHI prof. Paolo - IUAV
- FRASSINE prof. Roberto - Politecnico di Milano
- GIACOMIN ing. Giorgio - Maxfor - Quarto d'Altino (VE)
- GRANDI ing. Alberto - Sika Italia S.p.a. - Milano
- IMBIMBO prof. Maura - Università di Cassino
- LA TEGOLA prof. Antonio - Università di Lecce

Autori del Documento CNR-DT 200/2004

- LAGOMARSINO prof. Sergio - Università di Genova
- LUCIANO prof. Raimondo - Università di Cassino
- MACERI prof. Franco - Università di Roma "Tor Vergata"
- MAGENES prof. Guido - Università di Pavia
- MANFREDI prof. Gaetano - Università di Napoli "Federico II"
- MANTEGAZZA dott. Giovanni - Ruredil S.p.a. - Milano
- MARTINELLI ing. Enzo - Università di Salerno
- MODENA prof. Claudio - Università di Padova
- MONTI prof. Giorgio - Università di Roma "La Sapienza"
- MORANDINI ing. Giulio - Mapei S.p.a. - Milano
- NANNI prof. Antonio - Università di Napoli "Federico II"
- NIGRO prof. Emidio - Università di Napoli "Federico II"
- OLIVITO prof. Renato Sante - Università della Calabria
- PASCALE prof. Giovanni - Università di Bologna
- PECCE prof. Maria Rosaria - Università del Sannio
- PISANI prof. Marco Andrea - Politecnico di Milano
- POGGI prof. Carlo - Politecnico di Milano
- PROTA ing. Andrea - Università di Napoli "Federico II"
- REALFONZO prof. Roberto - Università di Salerno
- ROSATI prof. Luciano - Università di Napoli "Federico II"
- SACCO prof. Elio - Università di Cassino
- SAVOIA prof. Marco - Università di Bologna
- SPACONE prof. Enrico - Università di Chieti

Argomenti del CNR-DT 200/2004

Il Documento si compone di cinque Capitoli e cinque Appendici:

- **MATERIALI**
- **CONCETTI BASILARI DEL RINFORZO CON FRP E PROBLEMATICHE SPECIALI**
- **RINFORZO DI STRUTTURE DI C.A. E DI C.A.P.**
- **RINFORZO DI STRUTTURE MURARIE**

APPENDICE A: Sulle tecniche di produzione dei compositi e sui legami costitutivi dei materiali elastici lineari ortotropi

APPENDICE B: Sulla delaminazione

APPENDICE C: Sul rinforzo a pressoflessione di elementi di c.a.

APPENDICE E: Sul legame costitutivo del calcestruzzo confinato

APPENDICE F: Su esempi di progettazione di rinforzi con FRP

Coordinatori e Segreteria

Coordinatori

- Per il capitolo sui “Materiali”:

Prof. Roberto FRASSINE, Prof. Carlo POGGI.

- Per il capitolo sui “Concetti basilari del progetto di rinforzo e problematiche speciali”:

Prof. Giorgio MONTI, Prof. Antonio NANNI.

- Per il capitolo sulle “Strutture di c.a. e di c.a.p.”:

Prof. Luigi ASCIONE, Prof. Gaetano MANFREDI, Prof. Giorgio MONTI.

- Per il capitolo sulle “Strutture murarie”:

Prof. Andrea BENEDETTI, Prof. Elio SACCO.

Coordinatore generale: Prof. Luigi ASCIONE.

Segreteria: Prof. Luciano FEO, Prof. Luciano ROSATI.