

**CNR-DT 200/2004**

**Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo  
di Interventi di Consolidamento Statico  
mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati**

**Capitolo 3: CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO  
DI RINFORZO E PROBLEMATICHE SPECIALI**



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

**Giorgio Monti**

**Università di Roma La Sapienza**

# Contenuti

- 3.1 Requisiti fondamentali
- 3.2 Requisiti di durabilità
- 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo
- 3.4 Coefficienti parziali
- 3.5 Problemi speciali di progetto e relativi fattori di conversione
- 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

## Oggetto del capitolo 3

- Sono:
  - Le strutture *esistenti* in **c.a. e c.a.p.**
  - Le strutture *esistenti* in **muratura**  
dove si vogliono impiegare **compositi  
fibrorinforzati** per il consolidamento di elementi  
strutturali insufficienti
  - Concetti validi anche per le strutture *esistenti* in  
metallo ed in legno, non comprese nelle Istruzioni.

# Ipotesi di base

- Si assume che:
  - Il progetto del sistema di rinforzo sia eseguito da **tecnici qualificati ed esperti**
  - L'esecuzione dell'intervento sia effettuata da **maestranze adeguatamente capaci ed esperte**
  - Siano garantite: **adeguata supervisione e controllo di qualità.**

# Requisiti da soddisfare

- Il progetto del sistema di rinforzo deve soddisfare **requisiti** di:
  - Resistenza
  - Esercizio
  - Durabilità
- In caso di **incendio** la **resistenza del rinforzo** deve essere **adeguata al tempo di esposizione** che si vuole garantire.

# Posizionamento del rinforzo

- Il sistema di rinforzo deve essere posizionato nelle zone in cui è necessario resistere a tensioni di **trazione**.
- **Non** si devono affidare tensioni di **compressione** al composito fibrorinforzato.

# Contenuti

- 3.1 Requisiti fondamentali
- 3.2 Requisiti di durabilità
- 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo
- 3.4 Coefficienti parziali
- 3.5 Problemi speciali di progetto e relativi fattori di conversione
- 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

## 3.1 Requisiti fondamentali

- I **rischi** ai quali la struttura potrebbe essere soggetta vanno accuratamente individuati, eliminati o attenuati
- La **configurazione** del rinforzo deve:
  - Essere **poco sensibile** ai suddetti rischi
  - Sopportare l'occorrenza di **danneggiamenti localizzati**
- Sistemi di rinforzo che collassino **senza segnali di preavviso** vanno opportunamente evitati.



## 3.1 Requisiti fondamentali

- Soddisfatti se si garantisce:
  - La scelta di **materiali** opportuni
  - Un progetto adeguato con un'accorta cura dei **particolari costruttivi**
  - La definizione di **procedure di controllo** per:
    - la progettazione
    - la produzione
    - l'esecuzione
    - l'uso.

## 3.1 Requisiti fondamentali

- Per costruzioni di interesse **storico e monumentale**, si richiede una valutazione critica dell'intervento rispetto ai canoni della conservazione e del restauro.
- Va **dimostrata**, in termini oggettivi, la reale efficacia dell'intervento, che deve prevedere soluzioni in grado di assicurare la **compatibilità**, la **durabilità** e la **reversibilità**.

# Contenuti

- 3.1 Requisiti fondamentali
- 3.2 Requisiti di durabilità
- 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo
- 3.4 Coefficienti parziali
- 3.5 Problemi speciali di progetto e relativi fattori di conversione
- 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

## 3.2 Requisiti di durabilità

- Il rinforzo deve essere progettato in modo che:
  - Il **degrado atteso** nel corso della vita utile della struttura rinforzata **non ne riduca le prestazioni al di sotto di quelle previste** tenendo conto:
    - delle condizioni ambientali
    - del programma di manutenzione.

## 3.2 Requisiti di durabilità

- Vanno tenuti in debito conto:
  - L'uso previsto della struttura rinforzata
  - Le condizioni ambientali attese
  - La composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali preesistenti e di quelli nuovi
  - La configurazione di rinforzo ed i particolari costruttivi
  - La qualità delle maestranze ed il livello di controllo
  - Particolari misure protettive (fuoco o impatto)
  - La manutenzione attesa durante la vita utile.

# Contenuti

- 3.1 Requisiti fondamentali
- 3.2 Requisiti di durabilità
- 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo
- 3.4 Coefficienti parziali
- 3.5 Problemi speciali di progetto e relativi fattori di conversione
- 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

- *3.3.1 Generalità*
- *3.3.2 Coefficienti parziali ed azioni di calcolo*
- *3.3.3 Proprietà dei materiali*
- *3.3.4 Capacità di calcolo*

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.1 Generalità

- Le verifiche degli elementi rinforzati devono essere condotte per:
  - Stati Limite di Esercizio (**SLE**)
  - Stati Limite Ultimi (**SLU**)definiti nella Normativa vigente.



## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.1 Generalità

- Si verifica, con il metodo dei coefficienti parziali:

$$E_d \leq R_d$$

- $E_d$  è il valore di calcolo della domanda (effetto dell'azione) nell'ambito dello stato limite considerato
- $R_d$  è il valore di calcolo della corrispondente capacità (resistenza) nell'ambito del medesimo stato limite
- I valori di calcolo si ricavano dai valori caratteristici tramite opportuni coefficienti parziali, definiti qui e nella Normativa vigente.

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.1 Generalità

- Per gli interventi di **miglioramento** si deve calcolare il grado di sicurezza per ciascuno SL, nella situazione **precedente** ed in quella **successiva** all'intervento.

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.2 CP e azioni di calcolo

- Si fa riferimento alla **vita utile** che la struttura esistente dovrebbe avere se fosse di **nuova** realizzazione
- Cioè si adottano gli **stessi coefficienti** parziali per i materiali preesistenti e le **stesse azioni** di calcolo previste dalle Normative vigenti per le nuove costruzioni.

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.3 Proprietà dei materiali

- Nel rinforzo
  - devono essere stati determinati mediante **prove normalizzate di laboratorio**, come riportato nella sezione relativa ai materiali
- Nella struttura da rinforzare
  - devono essere desunti da:
    - **prove normalizzate**, in sito o in laboratorio
    - dalla **documentazione** del progetto originale.

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.3 Proprietà dei materiali

- Tutte le proprietà meccaniche sono descritte dai corrispondenti **valori caratteristici**
- La derivazione di questi deve tenere in conto:
  - la **dispersione** dei risultati delle prove
  - **l'incertezza statistica** associata al numero di prove eseguite
  - l'eventuale **conoscenza statistica precedente**
- **I moduli elastici** sono invece descritti dai **valori medi**.

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.3 Proprietà dei materiali

- Nel caso di sistemi impregnati in situ, poiché lo spessore della resina è incerto, **le resistenze ed i moduli elastici** da utilizzare nel calcolo sono quelli delle sole fibre, **ridotti dei coefficienti  $\alpha_{ff}$  ed  $\alpha_{fE}$**  per tener conto di possibili effetti di disallineamento di queste.

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.3 Proprietà dei materiali

- Il **valore di calcolo** delle proprietà di un materiale o di un prodotto usati nel **rinforzo** è dato da:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m}$$

- $X_k$  è il valore caratteristico della proprietà
- $\eta$  è un fattore di conversione che tiene conto di problemi speciali di progetto
- $\gamma_m$  è il coefficiente parziale, che tiene conto delle condizioni di applicazione.

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.3 Proprietà dei materiali

- Il **valore di calcolo** della proprietà di un materiale **preesistente** nella struttura da rinforzare è dato da:

$$X_d = \eta \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m}, \quad \text{dove: } X_{k(n)} = m_X (1 - k_n V_X)$$

- $m_X$  è il valore medio della proprietà  $X$  risultante dal numero  $n$  di prove eseguite
- $k_n$  è fornito in Tabella 3-1 in funzione di  $n$
- $V_X$  (coefficiente di variazione) è pari a:
  - 0.10 per l'acciaio
  - 0.20 per il calcestruzzo
  - 0.30 per la muratura e per il legno.



### 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

## 3.3.3 Proprietà dei materiali

- Tabella 3.1 - Valori di  $k_n$  per determinare il valore caratteristico

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$k_n$	2.31	2.01	1.89	1.83	1.80	1.77	1.74	1.72	1.68	1.67	1.64

## 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

### 3.3.4 Capacità di calcolo

- La capacità di calcolo  $R_d$  è:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R \{ X_{d,i}; a_{d,i} \}$$

- $R\{\}$  è la funzione che descrive il **modello meccanico** considerato (flessione, taglio, ecc.)
- $\gamma_{Rd}$  è un **coefficiente parziale** che tiene conto delle incertezze del modello di resistenza.

### 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo

## 3.3.4 Capacità di calcolo

- Non può essere considerato per l'elemento rinforzato un incremento della capacità resistente superiore al 60% di quella dell'elemento non rinforzato
- Tale limitazione non si applica per azioni eccezionali e sismiche.

# Contenuti

- 3.1 Requisiti fondamentali
- 3.2 Requisiti di durabilità
- 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo
- 3.4 Coefficienti parziali
- 3.5 Problemi speciali di progetto e relativi fattori di conversione
- 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

# 3.4 Coefficienti parziali

## 3.4.1 Coefficienti parziali $\gamma_m$ per i materiali ed i prodotti

- Per gli **SLU** → Tabella 3-2

Modalità di collasso	Applicazione tipo A <sup>(1)</sup>	Applicazione tipo B <sup>(2)</sup>
Rottura $\gamma_f$	1.10	1.25
Delaminazione $\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

<sup>(1)</sup> Sistemi di rinforzo certificati in accordo a quanto indicato al Capitolo 2 di queste Istruzioni.  
<sup>(2)</sup> Sistemi di rinforzo non certificati in accordo a quanto indicato al Capitolo 2 di queste Istruzioni.

- Per gli **SLE** tutti i coefficienti parziali dei materiali e dei prodotti in FRP sono = 1.

# 3.4 Coefficienti parziali

## 3.4.2 Coefficienti parziali $\gamma_{Rd}$ per i modelli di resistenza

- Per gli **SLU** → Tabella 3-3.

<b>Modello di resistenza</b>	$\gamma_{Rd}$
Flessione	1.00
Taglio	1.20
Confinamento	1.10

# Contenuti

- 3.1 Requisiti fondamentali
- 3.2 Requisiti di durabilità
- 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo
- 3.4 Coefficienti parziali
- 3.5 Problemi speciali di progetto e relativi fattori di conversione
- 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

## 3.5 Problemi speciali di progetto e relativi fattori di conversione

- Il fattore di conversione  $\eta$  dipende da particolari condizioni:
  - Azioni ambientali  $\eta_a$
  - Modalità di carico  $\eta_1$
  - Impatto ed esplosione
  - Atti vandalici
- che possono influenzare:
  - Durabilità
  - Comportamento.



## 3.5 Problemi speciali di progetto

### 3.5.1 Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale $\eta_a$

- Le proprietà meccaniche degradano per:
  - Effetti da ambiente **alcalino**
  - Effetti dell'**umidità** (acqua e soluzioni saline)
  - Effetti di **temperature estreme** e di cicli termici
  - Effetti di cicli di **gelo e disgelo**
  - Effetti di **radiazioni ultraviolette** (UV).

## 3.5 Problemi speciali di progetto

### 3.5.1 Azioni ambientali e fattore

### di conversione ambientale $\eta_a$

Tabella 3-4 – Fattore di conversione ambientale  $\eta_a$  per varie condizioni di esposizione e vari sistemi in FRP.

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	$\eta_a$
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

## 3.5 Problemi speciali di progetto

### 3.5.2 Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_1$

- Le proprietà meccaniche:
  - Resistenza a trazione
  - Deformazione ultima
  - Modulo di elasticità normale
- degradano per effetti di:
  - Viscosità
  - Rilassamento
  - Fatica.

## 3.5 Problemi speciali di progetto

### 3.5.2 Modalità di carico e fattore di

### conversione per effetti di lunga durata $\eta_1$

- **Tabella 3-5** – Fattore di conversione per effetti di lunga durata  $\eta_1$  per vari sistemi in FRP (carichi di esercizio).

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	$\eta_1$
Persistente (viscosità e rilassamento)	Vetro / Epossidica	0.30
	Arammidica / Epossidica	0.50
	Carbonio / Epossidica	0.80
Ciclico (fatica)	Tutte	0.50

## 3.5 Problemi speciali di progetto

### 3.5.3 Resistenza alle azioni causate da impatto ed esplosione

- Tuttora **oggetto di studio**
- Orientare la scelta verso sistemi a base di:
  - fibre **arammidiche** (più resistenti all'impatto)
  - fibre di vetro
  - **non** di carbonio.

## 3.5 Problemi speciali di progetto

### 3.5.3 Resistenza alle azioni causate da atti vandalici

- In ambienti aperti al pubblico si suggerisce di predisporre adeguate **misure di protezione** del sistema di rinforzo.
- Va comunque verificata la sicurezza dell'elemento strutturale facendo riferimento alla **situazione successiva ad un eventuale atto vandalico**, in assenza di rinforzo.
  - A tal fine, nei confronti dello SLU, si adotta la combinazione di azioni per **situazioni quasi permanenti** con i valori dei coefficienti parziali dei materiali per **situazioni eccezionali**.

# Contenuti

- 3.1 Requisiti fondamentali
- 3.2 Requisiti di durabilità
- 3.3 Principi generali del progetto di rinforzo
- 3.4 Coefficienti parziali
- 3.5 Problemi speciali di progetto e relativi fattori di conversione
- 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

## 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

- I materiali compositi in FRP sono particolarmente **sensibili al fuoco**
- Quando la temperatura ambientale supera quella di **transizione vetrosa della resina**, la resistenza e la rigidezza del sistema di FRP diminuiscono drasticamente.



## 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

- Le proprietà meccaniche di sistemi in FRP migliorano incrementando lo spessore del **rivestimento protettivo**
- E' comunque consigliato l'impiego di **sistemi di isolamento certificati**
- **Ulteriori specifiche** sull'applicazione di sistemi protettivi sono contenute nei §§ 4.8.2.3 (c.a.) e 5.8.2.3. (murature)

## 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

- La combinazione di azioni per situazioni eccezionali (fuoco  $E_d$ ) fa riferimento a:
  - Situazione eccezionale, con  $E_d$  ,
  - Situazione successiva all'evento eccezionale, senza  $E_d$ .

# 3.6 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

- Situazioni (con  $E_d$  / senza  $E_d$ )
  - Presenza/Assenza del rinforzo
  - Azioni di esercizio per la combinazione frequente/quasi permanente
  - Capacità degli elementi:
    - Ridotte per tener conto dell'esposizione al fuoco
    - Calcolate con i coefficienti parziali relativi alle situazioni eccezionali (per FRP  $\gamma_f = 1$ ).