

[...]

3.4 COEFFICIENTI PARZIALI

3.4.1 Coefficienti parziali γ_m per i materiali FRP

(1) Nei riguardi degli Stati Limite Ultimi al coefficiente parziale $\gamma_m = \gamma_f$ dei materiali FRP può essere attribuito il valore 1.10. Per il solo Stato Limite Ultimo di distacco dal supporto sono invece suggeriti valori di $\gamma_m = \gamma_{f,d}$ variabili, a giudizio del progettista, da 1.20 a 1.50 in funzione della maggiore o minore possibilità di prevedere, per la specifica applicazione, l'effettivo comportamento del composito nei riguardi del distacco dal supporto. A tal riguardo possono contribuire i risultati di indagini sperimentali condotte dal Produttore e/o dal Fornitore, ovvero appositamente e preventivamente eseguite nell'ambito della specifica applicazione.

(2) Nei riguardi degli Stati Limite di Esercizio, al coefficiente parziale $\gamma_m = \gamma_f$ dei materiali FRP può essere attribuito il valore unitario.

3.4.2 Coefficienti parziali γ_{Rd} per i modelli di resistenza

(1) I valori suggeriti per i coefficienti parziali γ_{Rd} dei diversi modelli di resistenza nei riguardi degli Stati Limite Ultimi sono esposti nella seguente Tabella 3-1.

Tabella 3-1 – Coefficienti parziali γ_{Rd} .

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

3.5 PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO E RELATIVI FATTORI DI CONVERSIONE

(1) Sono di seguito riportati alcuni valori di riferimento da attribuire al fattore di conversione η (§ 3.3.3(5)) in relazione ad aspetti che possono influenzare la durabilità ed il comportamento degli FRP in particolari condizioni.

3.5.1 Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale

(1) Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) di alcuni materiali FRP degradano in determinate situazioni quali: ambiente alcalino, umidità elevata (acqua e soluzioni saline), temperature estreme, cicli termici, cicli di gelo e disgelo, radiazioni ultraviolette (UV).

(2) Effetti da ambiente alcalino. La soluzione acquosa alcalina contenuta nei pori del calcestruzzo può, in alcuni casi, provocare un degrado della resina e/o delle zone di interfaccia. Le resine epossidiche presentano, generalmente, un'eccellente resistenza all'ambiente alcalino, a differenza di quelle di poliestere utilizzate in alcuni casi per le barre di rinforzo. Rispetto a queste

ultime sono pertanto da preferire resine più resistenti, come ad esempio quelle di vinilestere. Nel caso di impiego di fibre di vetro con elevato contenuto di zirconia, resistenti all'ambiente alcalino (vetro AR), il composito potrebbe esibire una resistenza inferiore a quella dei GFRP tradizionalmente utilizzati per le applicazioni strutturali. I danneggiamenti di resina e fibre dovuti all'attacco di alcali possono essere, in alcuni casi, molto più severi di quelli dovuti al solo effetto dell'umidità e devono essere sempre tenuti in conto. È comunque opportuno che il processo di reticolazione della resina sia completato prima dell'esposizione ad ambienti alcalini.

(3) Effetti dell'umidità (acqua e soluzioni saline). I principali effetti dell'assorbimento di umidità riguardano la resina e sono: plasticizzazione, riduzione della temperatura di transizione vetrosa, riduzione della resistenza e della rigidità. L'assorbimento di umidità dipende dal tipo di resina, dalla composizione e qualità del sistema di rinforzo, dallo spessore, dalle condizioni di maturazione, dall'interfaccia resina-fibra e dalle condizioni di lavorazione.

(4) Effetti di temperature estreme e di cicli termici. Gli effetti primari della temperatura riguardano la risposta viscosa della resina e quindi del composito. Al crescere della temperatura si manifesta una diminuzione del modulo di elasticità normale della resina. Se la temperatura supera quella di transizione vetrosa, il livello di prestazione del composito si riduce in maniera significativa. I cicli termici, in generale, non sortiscono effetti deleteri, anche se possono favorire la formazione di microfratture nei sistemi che utilizzano resina ad alto modulo. Per gli intervalli di temperatura tipici delle infrastrutture civili è possibile evitare indesiderati decadimenti delle prestazioni scegliendo il sistema di rinforzo in modo che la temperatura di transizione vetrosa sia sempre più elevata della massima temperatura di esercizio. Si sconsiglia l'impiego di materiali FRP in presenza di temperature di esercizio superiori a quella di transizione vetrosa ridotta di 15° C. Se del caso, devono essere previsti protettivi con funzione di isolanti termici.

(5) Effetti di cicli di gelo e disgelo. In generale, l'esposizione a cicli di gelo e disgelo non influisce sulla prestazione delle fibre; riduce invece quella della resina e dell'interfaccia tra fibre e resina a causa del verificarsi di reciproci distacchi. Per temperature al di sotto di 0 °C, i sistemi a base di resine polimeriche possono migliorare le proprie prestazioni sviluppando valori più elevati di resistenza e rigidità. Gli effetti del degrado prodotto da cicli termici possono essere amplificati dalla presenza di umidità: la ciclicità favorisce infatti la crescita e la propagazione delle microfratture provocate dalla presenza di soluzioni saline in ambiente umido.

(6) Effetti di radiazioni ultraviolette (UV). 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.

(7) La Tabella 3-2 suggerisce, per alcuni tipi di materiale, i valori da attribuire al fattore di conversione ambientale η_a . Essi rappresentano delle stime sufficientemente cautelative alle quali il Progettista può riferirsi in mancanza di valutazioni più precise, basate su specifiche sperimentazioni condotte sul particolare materiale utilizzato e nelle condizioni ambientali attese. I valori in tabella possono essere aumentati del 10% (in ogni caso deve sempre risultare $\eta_a \leq 1$) qualora si impieghino rivestimenti protettivi le cui proprietà di mitigazione degli effetti

dell'esposizione ambientale risultino sperimentalmente comprovate e sempre che tali rivestimenti siano mantenuti per tutta la durata del periodo di utilizzo del sistema a base di FRP.

Tabella 3-2– Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e vari sistemi di FRP.

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_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

3.5.2 Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata

(1) 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.

(2) Effetti di carichi e deformazioni a lungo termine (viscosità e rilassamento). 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; i materiali AFRP lo sono moderatamente; quelli GFRP sono i più esposti a tale tipo di rottura.

(3) Effetti di 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.

(4) Per evitare la rottura dei materiali FRP sotto carichi di lungo termine o ciclici è possibile contenerne opportunamente lo stato di tensione in condizioni di esercizio, riducendo il valore di progetto mediante un fattore di conversione, η_1 , i cui valori sono suggeriti nella Tabella 3-3.

Tabella 3-3 – Fattore di conversione per effetti di lunga durata η_1 per vari sistemi di FRP (carichi di esercizio).

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	η_1
Carico di lungo termine	Vetro / Epossidica	0.30
	Arammidica / Epossidica	0.50
	Carbonio / Epossidica	0.80
Ciclico	Tutte	0.50

3.5.3 Resistenza alle azioni causate da impatto ed esplosione

(1) Prove sperimentali, condotte sia in laboratorio che su porzioni di strutture *in situ* soggette all'azione di esplosioni, hanno dimostrato la maggiore efficacia dei compositi AFRP rispetto a quelli CFRP e GFRP. Prove su edifici in scala reale hanno anche evidenziato come la tecnica di alternare strati di AFRP a diverso modulo elastico, impregnati con matrici epossidiche, con strati di resine elastomeriche (poliuria) ad elevatissima deformazione e tenacità consenta di dissipare l'energia sviluppata da un impatto o esplosione, contenendo l'effetto devastante della deflagrazione ed ostacolando la penetrazione di detriti all'interno delle strutture.

3.5.4 Resistenza alle azioni causate da atti vandalici

(1) I materiali FRP sono particolarmente sensibili all'incisione ed alla lacerazione prodotte da strumenti da taglio.

(2) Nel caso di applicazioni di materiali FRP su elementi strutturali ubicati in ambienti aperti al pubblico, si suggerisce l'adozione di adeguate misure di protezione nei riguardi degli atti vandalici. Va comunque verificata la sicurezza degli elementi strutturali nella situazione successiva all'evento vandalico, in assenza di rinforzo. La verifica va eseguita allo SLU adottando la *combinazione di azioni quasi permanente* con i valori dei coefficienti parziali dei materiali per *situazioni eccezionali*.