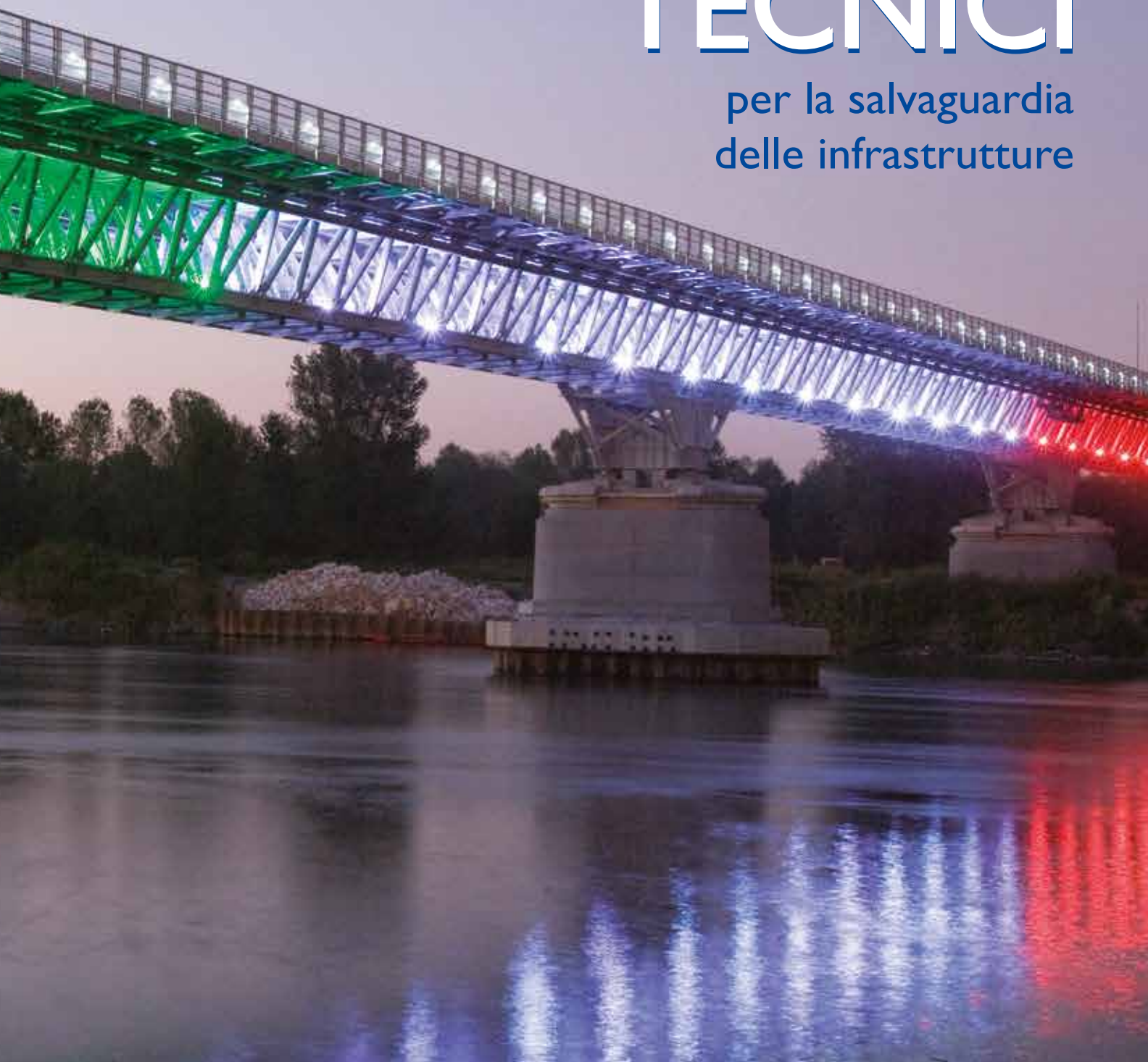


I QUADERNI TECNICI

per la salvaguardia
delle infrastrutture



Volume III



I QUADERNI TECNICI

per la salvaguardia
delle infrastrutture

Volume III

PREFAZIONE

Il terzo volume dei quaderni tecnici conferma la forte determinazione di Anas a proseguire con sempre maggiore impegno nell'attività di recupero delle opere d'arte in gestione, anche mediante l'impiego dei materiali di ultima generazione, sempre più spesso utilizzati al fine di estenderne la vita utile ed incrementarne i livelli di sicurezza.

Il presente volume raccoglie quattro quaderni tecnici, dal n. 9 al n. 12, che esaminano dettagliatamente i materiali di nuova generazione utilizzati per gli interventi locali di manutenzione.

In particolare, nei quaderni n. 9 e n. 10 si esaminano le malte e i calcestruzzi da ripristino, nello specifico sono esposte le diverse tipologie esistenti e le modalità di classificazione secondo normativa. Sono, inoltre, riportati i principali campi di applicazione di tali materiali nell'ambito degli interventi di ripristino e/o rinforzo e le metodologie per la loro posa in opera.

Nel quaderno n. 11 sono trattati i tessuti in polimero fibro-rinforzato (FRP), in particolare si esamina la classificazione di tali sistemi, il loro campo di impiego nel rinforzo strutturale, le modalità di applicazione ed, infine, le principali criticità cui questi materiali sono soggetti.

Nel quaderno n. 12 si concentra l'attenzione sulle lamine in polimero fibro-rinforzato (FRP), affrontando gli stessi temi esposti nel quaderno n. 11 dedicato ai tessuti. In aggiunta, si trova una sezione dedicata alla trattazione delle barre realizzate in materiale composito fibro-rinforzato, impiegate come armature nei getti di calcestruzzo armato.

Particolare attenzione in ciascun quaderno tecnico è attribuita alle sezioni dedicate ai compiti del Direttore Lavori e del Progettista.

Per la realizzazione e la pubblicazione dei quaderni tecnici raccolti nel presente volume, si ringrazia l'Ing. Paolo Mannella, Responsabile Ponti Viadotti e Gallerie Area Centro-Sud della Direzione Operation e Coordinamento Territoriale, l'Ing. Massimo Simonini, Dirigente dell'Ufficio Ponti Viadotti e Gallerie della medesima Direzione, i Coordinatori territoriali ed i Responsabili delle Aree Compartimentali.

Come per le precedenti edizioni, si auspica che il presente manuale possa risultare utile ai tecnici impegnati nella progettazione, esecuzione e collaudo dei lavori cui esso si riferisce, tenendo presente che nella sua redazione si è cercato di fornire indicazioni il più possibile operative.

Saranno, inoltre, ben accetti i contributi da parte di tutti per l'aggiornamento e per le nuove tematiche da affrontare in futuro, nei prossimi volumi.

Il Direttore

Ing. Ugo Dibennardo

QUADERNO TECNICO N.9

MALTE DA RIPRISTINO

DECRETO LEGGE 21 GIUGNO 2013 N. 69

(DISPOSIZIONI URGENTI PER IL RILANCIO DELL'ECONOMIA)

“PROGRAMMA DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA DI PONTI, VIADOTTI

E GALLERIE DELLA RETE STRADALE NAZIONALE

IN GESTIONE AD ANAS SPA”

Ottobre 2017

Indice Quaderno Tecnico n.9

1. Introduzione.....	15
2. Principali tipologie di malte da ripristino.....	18
3. Principi per la protezione e la riparazione.....	20
4. Classificazione secondo UNI EN 1504	25
5. Classificazione secondo Decreto Ministeriale 14.01.2008	32
6. Marcatura CE.....	33
7. Preparazione del supporto	35
8. Applicazioni in opera di prodotti e sistemi.....	38
9. Compiti del Direttore Lavori.....	41
10. Compiti del Progettista ed indicazioni progettuali.....	44
11. Malte fibrorinforzate	45
Bibliografia.....	46

QUADERNO TECNICO N.10

CALCESTRUZZI DA RIPRISTINO

DECRETO LEGGE 21 GIUGNO 2013 N. 69

(DISPOSIZIONI URGENTI PER IL RILANCIO DELL'ECONOMIA)

“PROGRAMMA DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA DI PONTI, VIADOTTI

E GALLERIE DELLA RETE STRADALE NAZIONALE

IN GESTIONE AD ANAS SPA”

Ottobre 2017

Indice Quaderno Tecnico n.10

1. Introduzione.....	49
2. Principali tipologie di calcestruzzi da ripristino	51
3. Principi per la protezione e la riparazione.....	53
4. Tipologie di calcestruzzo da ripristino	60
5. Classificazione secondo Decreto Ministeriale 14.01.2008	62
6. Preparazione del supporto	66
7. Applicazioni in opera di prodotti e sistemi.....	68
8. Compiti del Direttore Lavori.....	71
9. Compiti del Progettista ed indicazioni progettuali.....	74
10. Calcestruzzi fibrorinforzati.....	75
Bibliografia.....	77

QUADERNO TECNICO N.11

TESSUTI IN FRP

DECRETO LEGGE 21 GIUGNO 2013 N. 69

(DISPOSIZIONI URGENTI PER IL RILANCIO DELL'ECONOMIA)

***“PROGRAMMA DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA DI PONTI, VIADOTTI
E GALLERIE DELLA RETE STRADALE NAZIONALE
IN GESTIONE AD ANAS SPA”***

Dicembre 2017

Indice Quaderno Tecnico n.11

1. Introduzione.....	80
2. Classificazione dei sistemi di rinforzo in FRP.....	81
3. Proprietà meccaniche dei sistemi di rinforzo in FRP impregnati in situ	84
4. Qualificazione dei sistemi di rinforzo in FRP.....	86
5. Compiti del progettista	88
6. Problemi speciali di progetto	91
6.1. Ambiente alcalino	92
6.2. Umidità	92
6.3. Temperatura estrema e cicli termici	93
6.4. Cicli di gelo e disgelo.....	93
6.5. Radiazioni ultraviolette (UV).....	94
6.6. Viscosità e rilassamento	94
6.7. Fatica.....	95
6.8. Fattori di conversione ambientale e per effetti di lunga durata.....	95
6.9. Atti vandalici	96
7. Applicazione in opera del sistema di rinforzo.....	97
8. Controlli di accettazione in cantiere	100
9. Prove non distruttive e semi-distruttive.....	103
9.1. Prove non distruttive	103
9.2. Prove semi-distruttive	104
Appendice A: Esempio di Scheda Tecnica.....	107
Appendice B: Esempio di calcolo di rinforzo a flessione di una soletta in c.a.....	109
Bibliografia.....	114

QUADERNO TECNICO N.12

LAMINE IN FRP E BARRE DI MATERIALE COMPOSITO FIBRORINFORZATO

***DECRETO LEGGE 21 GIUGNO 2013 N. 69
(DISPOSIZIONI URGENTI PER IL RILANCIO DELL'ECONOMIA)
"PROGRAMMA DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA DI PONTI, VIADOTTI
E GALLERIE DELLA RETE STRADALE NAZIONALE
IN GESTIONE AD ANAS SPA"***

Dicembre 2017

Indice Quaderno Tecnico n.12

1. Introduzione.....	116
2. Classificazione dei sistemi di rinforzo in FRP.....	117
3. Proprietà meccaniche dei sistemi di rinforzo in FRP preformati.....	120
4. Qualificazione dei sistemi di rinforzo in FRP.....	122
5. Compiti del progettista	126
6. Problemi speciali di progetto	128
6.1. Ambiente alcalino	129
6.2. Umidità	129
6.3. Temperatura estrema e cicli termici	130
6.4. Cicli di gelo e disgelo.....	131
6.5. Radiazioni ultraviolette (UV).....	131
6.6. Viscosità e rilassamento	131
6.7. Fatica.....	132
6.8. Fattori di conversione ambientale e per effetti di lunga durata.....	132
6.9. Atti vandalici	133
7. Applicazione in opera del sistema di rinforzo.....	133
8. Controlli di accettazione in cantiere	137
9. Prove non distruttive e semi-distruttive.....	141
9.1. Prove non distruttive	141
9.2. Prove semi-distruttive	142
10.Barre di materiale composito fibrorinforzato	143
10.1. Caratteristiche geometriche e proprietà meccaniche	144
10.2. Problemi speciali di progetto	146
10.3. Compiti degli operatori coinvolti.....	147
10.3.1. Compiti del Produttore	147
10.3.2. Compiti del Progettista	147

10.3.3. Compiti del Direttore dei Lavori e del Collaudatore	148
Appendice A: Esempio di Scheda Tecnica per sistemi di rinforzo preformati.....	150
Appendice B: Esempio di Scheda Tecnica per barre di materiale composito fibrorinforzato.....	152
Appendice C: Esempio di calcolo di rinforzo a flessione di una soletta in c.a.	154
Bibliografia	159



QUADERNO TECNICO N.9

MALTE DA RIPRISTINO

1. Introduzione

Negli interventi di ripristino e rinforzo di strutture in c.a. possono essere utilizzate malte cementizie, definite malte da ripristino.

Le principali tipologie di intervento possibile possono essere così classificate:

- Interventi di ripristino dello strato corticale del calcestruzzo ammalorato;
- Interventi di ripristino di strati corticali di calcestruzzo ammalorato e dell'armatura esistente;
- Interventi di rinforzo di sezioni in calcestruzzo, quali incrementi di sezioni, ringrossi di sezioni di pile o pulvini.

A titolo di esempio, per gli aspetti inerenti gli interventi di ripristino dello stato corticale, si rimanda al Quaderno Tecnico n. 6 *“Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati”*.

Gli interventi descritti possono essere eseguiti utilizzando malte da ripristino o calcestruzzi da ripristino. La norma UNI EN 206-1:2016 “Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità” definisce al Paragrafo 1 il requisito di classificazione di una malta rispetto al calcestruzzo, stabilito nel diametro massimo dell'aggregato pari a 4 mm. Di conseguenza, conglomerati cementizi con aggregato avente diametro massimo minore di 4 mm sono da considerarsi malte.

L'utilizzo di calcestruzzi da ripristino è trattato separatamente nel Quaderno Tecnico n. 10 *“Calcestruzzi da ripristino”*, in virtù di loro specifiche caratteristiche, regole di progettazione e cantierizzazione.

Occorre considerare che molti degli interventi descritti, in cui vengono utilizzate malte da ripristino, possono essere considerati, nell'ambito delle normative tecniche, come interventi di tipo locale, escludendo conseguentemente la necessità di effettuare un collaudo statico. Inoltre, considerata la natura degli importi a base di gara, in molti casi non si rende necessario nemmeno un collaudo di tipo amministrativo. Si evidenzia pertanto come la figura del Direttore Lavori rivesta un ruolo di estrema importanza, a garanzia del controllo della corretta esecuzione dell'opera in termini di applicazione delle procedure di accettazione in cantiere dei materiali, di controllo delle prestazioni richieste dal progetto e di applicazione in opera.

È importante sottolineare che il Progettista dell'intervento di ripristino o rinforzo deve provvedere ad indicare correttamente le caratteristiche e le prestazioni richieste della malta da ripristino che possono differire da intervento ad intervento.

Nello specifico, l'utilizzo di malte come materiali strutturali richiede procedure dedicate in termini sia di prescrizione sia di controllo delle proprietà fisico-meccaniche. Nel presente Quaderno Tecnico si farà riferimento alla norma UNI EN 1504 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità", che definisce le procedure e le caratteristiche dei prodotti e sistemi da utilizzare per la riparazione, la manutenzione e la protezione, il restauro e il consolidamento delle strutture in calcestruzzo.

Si precisa che nel caso l'utilizzo di una malta da ripristino abbia implicazioni di tipo strutturale, quali a titolo di esempio interventi di ricostruzione degli strati di copriferro o di rinforzo strutturale, trova applicazione il Decreto Ministeriale 14.01.2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni", Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 e relativa Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 "Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008", Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009.

Nel seguito si indicherà con il termine "prodotto" un costituente formulato per la riparazione o la protezione di strutture in calcestruzzo, mentre con il termine "sistema" due o più prodotti utilizzati insieme oppure consecutivamente. La modalità di applicazione di un prodotto o sistema per mezzo di un'attrezzatura o di un metodo specifico è la "tecnologia".

In particolare, nella UNI EN 1504 Parte 1 vengono definiti i termini significativi e le principali categorie di prodotti e sistemi. La parte 3 della UNI EN 1504 specifica i requisiti per l'identificazione, le prestazioni inclusa la durabilità e la sicurezza di prodotti e sistemi da utilizzare per la riparazione strutturale e non strutturale delle opere di calcestruzzo. Nella UNI EN 1504 Parte 9 vengono definiti i principi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo che hanno subito o potrebbero subire danni o deterioramenti e viene fornita una guida alla scelta di prodotti e sistemi che siano appropriati per l'uso previsto. La Parte 10 della UNI EN 1504 fornisce i requisiti per le condizioni del substrato

prima e durante l'applicazione, compresi la stabilità strutturale, lo stoccaggio, la preparazione e l'applicazione dei prodotti e dei sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo, compresi il controllo di qualità, la manutenzione, la salute e la sicurezza e l'ambiente.

SCHEMA NORMATIVO UNI EN 1504		
Parte		Oggetto
1	UNI EN 1504-1:2005	Definizioni
2	UNI EN 1504-2:2005	Sistemi di protezione della superficie di calcestruzzo
3	UNI EN 1504-3:2006	Riparazione strutturale e non strutturale
4	UNI EN 1504-4:2005	Incollaggio strutturale
5	UNI EN 1504-5:2005	Iniezione del calcestruzzo
6	UNI EN 1504-6:2007	Ancoraggio dell'armatura di acciaio
7	UNI EN 1504-7:2007	Protezione contro la corrosione delle armature
8	UNI EN 1504-8:2005	Controllo di qualità e valutazione delle conformità
9	UNI EN 1504-9:2008	Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi
10	UNI EN 1504-10:2005	Applicazioni in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori

2. Principali tipologie di malte da ripristino

Le principali categorie di prodotti e sistemi sono definite all'interno della UNI EN 1504 Parte 1 "Definizioni". Tra questi possono essere annoverati:

- 1) **prodotti e sistemi di ancoraggio**, utilizzati per il fissaggio dell'armatura nel calcestruzzo per il conferimento di un adeguato comportamento strutturale oppure per il riempimento di cavità allo scopo di assicurare una continuità tra elementi di acciaio e calcestruzzo;
- 2) **prodotti e sistemi per iniezione**, impiegati per il ripristino dell'integrità e/o della durabilità della struttura;
- 3) **prodotti e sistemi di riparazione non strutturali**, applicati su una superficie di calcestruzzo per il ripristino dell'aspetto geometrico o estetico della struttura;
- 4) **prodotti e sistemi di protezione dell'armatura**, applicati ad armature non protette per aumentare la protezione dalla corrosione;
- 5) **prodotti e sistemi aggrappanti strutturali**, applicati al calcestruzzo per garantire un legame strutturale duraturo ad altri materiali applicati;
- 6) **prodotti e sistemi di riparazione strutturali**, applicati a una struttura di calcestruzzo per la sostituzione del calcestruzzo danneggiato ed il ripristino dell'integrità e della durabilità strutturale;
- 7) **prodotti e sistemi di protezione della superficie**, applicati per aumentare la durabilità delle strutture di calcestruzzo e calcestruzzo armato.

Con riferimento ai prodotti e sistemi di ripristino di elementi ammalorati in calcestruzzo, le principali tipologie di malte da ripristino attualmente disponibili in commercio sono rappresentate da:

- 1) **malte idrauliche (CC)**: malte a base di leganti idraulici miscelati con aggregati di idonea granulometria. Possono contenere additivi e aggiunte che, quando miscelati con malta, fanno presa mediante una reazione di idratazione.
- 2) **malte cementizie polimeriche idrauliche (PCC)**: malte idrauliche modificate tramite l'aggiunta di additivi polimerici, in quantità sufficiente ad ottenere proprietà specifiche. I polimeri generalmente utilizzati sono: acrilici, metacrilati o resine acriliche modificate in forma di polveri

ridisperdibili o di dispersioni acquose; mono-, co- e ter-polimeri vinilici in forma di polveri ridisperdibili o di dispersioni acquose; copolimeri stirene-butadiene, generalmente in forma di dispersioni acquose; lattici di gomma naturale; resine epossidiche.

- 3) **malte polimeriche (PC)**: miscele di leganti polimerici e aggregati calibrati che fanno presa mediante una reazione di polimerizzazione. Quest'ultime vengono solitamente usate per gli inghisaggi o per le iniezioni, non per ripristini di calcestruzzo.

Con il termine **aggiunte** si indicano materiali inorganici finemente suddivisi che possono essere aggiunti ai prodotti per la riparazione, allo scopo di migliorare determinate proprietà o conferirne di speciali. Possono a loro volta essere classificate in aggiunte praticamente inerti (tipo I) ed aggiunte pozzolaniche o ad idraulicità latente (tipo II). Il termine **additivi** invece si riferisce a materiali aggiunti durante il procedimento di miscelazione del calcestruzzo, allo scopo di modificare le proprietà della miscela allo stato fresco e/o indurito.

I **leganti** possono essere classificati in **leganti idraulici** e **leganti polimerici reattivi**. I leganti idraulici sono rappresentati da materiali inorganici che reagiscono con l'acqua, subendo un processo di idratazione per produrre un materiale solido. Si tratta generalmente di cementi conformi alla EN 197-1 o alla EN 413-1, calci da costruzione conformi alla EN 459-1 o combinati con altri cementi. Eventuali prodotti addizionati ai leganti idraulici allo scopo di conferire specifiche proprietà, ma che non sono compresi negli additivi e nelle aggiunte, sono classificati con il termine **additivi per leganti idraulici**. I leganti polimerici reattivi sono invece leganti costituiti generalmente da due componenti, un polimero base reattivo e un induritore o catalizzatore, e che polimerizzano a temperatura ambiente. In alcuni sistemi, il vapore acqueo a temperatura ambiente può reagire come induritore/catalizzatore. I leganti tipici utilizzati sono, per esempio, resine epossidiche, poliesteri insaturi, acrilici reticolanti, poliuretani mono o bicomponenti. Eventualmente possono essere aggiunti anche degli **additivi per polimeri reattivi**, prodotti diversi dagli additivi e dalle aggiunte, che conferiscono al prodotto per riparazione proprietà specifiche. Additivi tipici sono, per esempio, plastificanti, esaltatori di flessibilità, acceleranti o ritardanti, materiali che regolano la reologia, pigmenti e filler.

3. Principi per la protezione e la riparazione

La scelta di un prodotto o sistema appropriato per la protezione, la riparazione o il rinforzo delle strutture di calcestruzzo che hanno subito o potrebbero subire danni o deterioramenti deve essere il risultato di un attento e complesso lavoro di progettazione. Il processo di riparazione può articolarsi nelle seguenti fasi principali:

- valutazione delle condizioni della struttura;
- identificazione delle cause di deterioramento;
- decisione degli obiettivi della protezione e della riparazione;
- scelta del/dei principio/i di protezione e riparazione appropriato/i;
- scelta dei metodi;
- definizione delle proprietà dei prodotti e dei sistemi;
- specifica dei requisiti di manutenzione in seguito alla protezione ed alla riparazione.

Punti chiave della UNI EN 1504 sono la definizione dei requisiti minimi per la protezione e riparazione, l'identificazione degli obiettivi dell'intervento di protezione e riparazione e l'indicazione delle basi per la scelta dei prodotti e sistemi. In particolare, tali tematiche sono trattate nella Parte 9 "Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi".

Ai fini di una corretta progettazione dell'intervento di protezione e riparazione è essenziale la fase di valutazione delle condizioni della struttura di calcestruzzo, dei difetti, compresi quelli non a vista e quelli potenziali, e delle cause di tali difetti. È altresì importante tenere conto dell'approccio progettuale originario, delle caratteristiche ambientali, delle condizioni durante la costruzione e della storia della struttura, delle condizioni d'uso ed infine dei futuri requisiti per l'uso richiesti.

I difetti più comuni riscontrabili in strutture di calcestruzzo riguardano i materiali che lo compongono, calcestruzzo ed armature. Queste ultime possono essere interessate da fenomeni di corrosione, a causa di difetti di progettazione oppure per raggiungimento della vita utile della struttura.

Per quanto concerne i difetti del calcestruzzo, una classificazione può essere effettuata a seconda della natura del difetto che può essere di origine meccanica, chimica o fisica. Le cause più comuni di difetti di tipo meccanico possono essere

individuare in impatti, sovraccarichi, eventuali movimenti della struttura quali ad esempio assestamenti, esplosioni o vibrazioni. Difetti di natura chimica possono essere generalmente riconducibili a reazioni alcali-aggregato, ad attività biologiche o alla presenza di agenti aggressivi quali ad esempio solfati, acqua dolce o sali. Infine per quanto riguarda i difetti del calcestruzzo di natura fisica, le cause principali risiedono in cicli gelo/disgelo e in fenomeni termici, di cristallizzazione dei sali, di ritiro, erosione o usura. In riferimento alla seconda tipologia di difetto precedentemente descritta ed interessante le armature, le cause più comuni possono essere individuate in fenomeni di carbonatazione, presenza di correnti vaganti o di contaminanti corrosivi. La presenza di questa ultima causa di degrado può provenire da prodotti presenti alla miscelazione, quali ad esempio cloruro di sodio o cloruro di calcio, oppure dall'ambiente esterno, con apporto ad esempio di cloruro di sodio o altri agenti contaminanti. Nelle tabelle successive sono riportate in modo schematico le sopracitate cause comuni dei difetti riscontrabili nelle strutture di calcestruzzo, separatamente per il calcestruzzo e per le barre di armatura.

La scelta di una malta è in relazione soprattutto alle modalità applicative. Più semplice è l'applicazione, migliore questa sarà e quindi migliore sarà il risultato dell'intervento in termini di durabilità dello stesso.

Materiale	Natura del difetto	Causa comune
Calcestruzzo	Meccanica	Impatti
		Sovraccarichi
		Movimenti della struttura
		Esplosioni
		Vibrazioni
	Chimica	reazioni alcali-aggregato
		attività biologiche
		presenza di agenti aggressivi quali ad esempio solfati, acqua dolce o sali.
	Fisica	cicli gelo/disgelo
		fenomeni termici, di cristallizzazione dei sali, di ritiro, erosione o usura
		fenomeni di cristallizzazione dei sali
		ritiro
		erosione
		usura

Materiale	Natura del difetto	Causa comune	
Barre di armatura	Corrosione	Carbonatazione	
		Correnti vaganti	
		Contaminanti corrosivi alla miscelazione	Cloruro di sodio
			Cloruro di calcio
		Contaminanti corrosivi dall'ambiente esterno	Cloruro di sodio
			Altri agenti contaminanti

Alcuni dei difetti descritti possono derivare anche da specifiche non adeguate, materiali non idonei e non corrette fasi di progettazione ed esecuzione.

Per tali motivi, le fasi di identificazione e registrazione della natura e delle cause dei difetti riscontrabili nella struttura di calcestruzzo rivestono un ruolo di fondamentale importanza nel processo di riparazione. Appositi ed idonei piani di

indagine devono essere definiti. È importante sottolineare che i risultati ottenuti a valle delle indagini effettuate devono essere validi in entrambe le fasi di progettazione ed esecuzione dei lavori di protezione o riparazione. In caso negativo, nuove valutazioni devono essere effettuate.

La scelta dell'intervento di protezione e riparazione deve essere appropriata alle cause ed all'entità dei difetti, prendendo in considerazione fattori generali, strutturali, ambientali e fattori legati alla salute e sicurezza. Nella tabella seguente sono indicati degli esempi per ciascuna delle categorie sopra indicate.

Fattore	Descrizione
Generale	Uso previsto
	Vita di progetto e di servizio
	Requisiti prestazionali
	Prestazioni a lungo termine
	Opportunità di protezione, riparazione e monitoraggio aggiuntivi
	Numero e costo dei cicli di riparazione
	Costo e finanziamento delle opzioni alternative di protezione o riparazione
	Proprietà e preparazione del substrato esistente
	Aspetto della struttura di calcestruzzo protetta o riparata.
Strutturale	Cambiamento aspetti dinamici o altre azioni dirette
	Mezzi mediante i quali verranno trasportati i carichi durante o dopo la protezione o la riparazione;
	Future necessità di ispezione e manutenzione
Ambientale	Ambiente futuro della struttura di calcestruzzo
	Protezione da intemperie, inquinamento, spruzzi salini, ecc.
	Protezione del substrato durante il lavoro di riparazione
Salute e sicurezza	Conseguenze del cedimento strutturale della struttura di calcestruzzo
	Requisiti sanitari e di sicurezza
	Impatto delle operazioni di riparazione sugli occupanti o utenti della struttura di calcestruzzo e sul pubblico

La scelta di un prodotto o di un sistema idoneo per la protezione o riparazione di una struttura in calcestruzzo si deve basare sull'applicazione di metodi conformi ad una serie di principi di base, che possono essere utilizzati separatamente o combinati fra di loro, definiti al Paragrafo 6 della UNI EN 1504

- Parte 9 “Principi generali per l’uso dei prodotti e dei sistemi”. In particolare sono identificati due gruppi di principi e di metodi, a seconda che questi siano correlati ai difetti del calcestruzzo (Principi da 1 a 6) oppure alla corrosione dell’armatura (Principi da 7 a 11). È ammesso l’impiego di metodi non descritti nella UNI EN 1504, previa dimostrazione di conformità al principio utilizzato.

Con riferimento ai soli interventi di riparazione strutturale e non strutturale delle strutture in calcestruzzo, oggetto del presente Quaderno Tecnico e descritti nella UNI EN 1504 – Parte 3 “Riparazione strutturale e non strutturale”, la scelta del prodotto o del sistema è basata sull’applicazione dei Principi 3, 4 e 7. Il Principio 3 (CR) – Ripristino del calcestruzzo prevede il ripristino del calcestruzzo originale di un elemento della struttura nella forma ed alla funzione specificate originariamente e può essere raggiunto con i metodi di applicazione a mano della malta (Metodo 3.1), di nuovo getto di calcestruzzo (Metodo 3.2) e di spruzzo di calcestruzzo o malta (Metodo 3.3). Il Principio 4 (SS) – Rafforzamento strutturale, consistente nell’aumento o ripristino della capacità di carico strutturale di un elemento della struttura di calcestruzzo, viene raggiunto con l’utilizzo del Metodo 4.4 di aggiunta di malta o calcestruzzo. Infine il Principio 7 (RP) – Conservazione e ripristino della passività prevede la creazione delle condizioni chimiche in cui la superficie dell’armatura viene mantenuta o riportata ad una condizione di passività. Tale principio può essere applicato attraverso i metodi di aumento del copriferro con aggiunta di malta di cemento o calcestruzzo (Metodo 7.1) e di sostituzione del calcestruzzo contaminato o carbonatato (Metodo 7.2).

Principio		Metodo	
N.	Definizione	N.	Definizione
3	Restauro del calcestruzzo	3.1	Applicazione a mano di malta
		3.2	Nuovo getto di calcestruzzo
		3.3	Malta o calcestruzzo proiettati
4	Consolidamento strutturale	4.4	Aggiunta di malta o di calcestruzzo
7	Conservazione o ripristino della passività	7.1	Aumento del copriferro con aggiunta di malta o calcestruzzo
		7.2	Sostituzione del calcestruzzo contaminato

4. Classificazione secondo UNI EN 1504

Una volta fissato il principio e scelto il metodo appropriato, i prodotti ed i sistemi da utilizzarsi per interventi di riparazione strutturale e non strutturale di strutture in calcestruzzo sono selezionati in base ai requisiti richiesti dalla UNI EN 1504 – Parte 3, riguardante l'impiego di malte e di calcestruzzi, potenzialmente utilizzati insieme ad altri prodotti e sistemi, per il restauro e/o la sostituzione di calcestruzzo deteriorato e per la protezione dell'armature, al fine di prolungare la vita di servizio di una struttura di calcestruzzo che mostri deterioramento.

Per i tre Principi di riparazione considerati e per i relativi metodi di riparazione, nella tabella sottostante sono elencate le caratteristiche prestazionali dei prodotti e dei sistemi di riparazione strutturali e non strutturali richieste per *“tutti gli impieghi previsti”* o per *“determinati impieghi previsti”*.

Caratteristiche prestazionali	Principio di riparazione			
	3	4	7	
	Metodo di riparazione			
	3.1 – 3.2	3.3 ^{a)}	4.4	7.1 – 7.2
Resistenza a compressione	■	■	■	■
Contenuto di cloruri ^{b)}	■	■	■	■
Legame di aderenza	■	■	■	■
Ritiro/espansione impediti ^{c)}	■	■	■	■
Durabilità a) Resistenza alla carbonatazione ^{b) d)}	■	■	■	■
Durabilità b) Compatibilità termica Parte 1 o Parte 2 o Parte 4 della EN 13687 ^{e)}	□	□	□	□
Modulo di elasticità	□	□	■	□
Resistenza allo slittamento ^{f)}	□		□	□
Coefficiente di espansione termica ^{c) g)}	□	□	□	□
Assorbimento capillare ^{e) h)}	□	□	□	□

Note:

■ Per tutti gli impieghi previsti

□ Per determinati impieghi previsti

a) La natura del metodo di applicazione può determinare il cambiamento di alcuni metodi di prova. Fare riferimento alla EN 14487-1.

b) Questo requisito non è pertinente alla riparazione di calcestruzzo non armato.

c) Se sottoposto a cicli termici, questa prova aggiuntiva non è richiesta.

d) Qualora il sistema di riparazione includa un sistema di protezione superficiale con comprovate caratteristiche di protezione contro la carbonatazione (vedere la EN 1504-2) o sia una malta PC, questa prova non è pertinente.

e) Secondo le condizioni di esposizione ambientale.

f) Pertinente solo per le aree trafficate.

g) Pertinente solo per PC.

h) La resistenza alla corrosione rientra nei requisiti del contenuto di cloruro e della permeabilità all'acqua del prodotto.

La norma definisce quattro classi di malte da ripristino, suddividendole in malte per riparazioni strutturali e non strutturali. In particolare le malte per uso non strutturale sono identificate dalle sigle R1 e R2, mentre le sigle R3 e R4 indicano malte per uso strutturale. Non è ammesso l'impiego di malte R1 e R2 per qualsiasi uso di tipo strutturale.

Requisito	Strutturale		Non strutturale	
Classe	R4	R3	R2	R1

La classe di appartenenza delle malte da ripristino dipende dalle loro caratteristiche prestazionali che risultano dalle diverse prove prestazionali che il produttore deve obbligatoriamente eseguire. Nelle tabelle seguenti si riportano le caratteristiche prestazionali delle diverse classi di malta da ripristino.

Non strutturale - Classe R1				
N.	Caratteristica prestazionale	Substrato di riferimento (EN 1766)	Metodo di prova	Requisito
1	Resistenza a compressione	Nessuno	EN 12190	≥ 10 MPa
2	Contenuto ioni cloruro	Nessuno	EN 1015-17	≤ 0.05 %
3	Legame di aderenza	MC(0,40)	EN 1542	≥ 0.8 MPa ^{a)}
4	Ritiro/espansione impediti ^{b) c)}	MC(0,40)	EN 12617-4	Nessun requisito
5	Resistenza alla carbonatazione ^{f)}	Nessuno	EN 13295	Nessun requisito ^{g)}
6	Modulo elastico	Nessuno	EN 13412	Nessun requisito
7	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 1, gelo-disgelo	MC(0,40)	EN 13687-1	Ispezione visiva dopo 50 cicli ^{e)}
8	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 2, temporali	MC(0,40)	EN 13687-2	Ispezione visiva dopo 30 cicli ^{e)}
9	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 4, Cicli a secco	MC(0,40)	EN 13687-4	Ispezione visiva dopo 30 cicli ^{e)}
10	Resistenza allo slittamento	Nessuno	EN 13036-4	Classe I: >40 unità con prova a umido Classe II: >40 unità con prova a secco Classe III: >55 unità con prova a umido
11	Coefficiente di espansione termica ^{c)}	Nessuno	EN 1770	Non richiesto se sono eseguite le prove 7, 8 o 9, altrimenti valore dichiarato
12	Assorbimento capillare	Nessuno	EN 13057	Nessun requisito

Note:

a) Il valore di 0,8 MPa non è richiesto ove si manifesti un difetto di coesione nel materiale di riparazione. Se si manifesta un difetto di coesione, è richiesto un carico di rottura minimo di 0,5 MPa.

b) Non richiesto per il metodo di riparazione 3.3.

c) Non richiesto se sottoposto a cicli termici.

e) Larghezza media massima consentita di una incrinatura $\leq 0,05$ mm senza alcuna incrinatura $\geq 0,1$ mm e senza delaminazione.

f) Per la durabilità.

g) Non idoneo per la protezione contro la carbonatazione, a meno che il sistema di riparazione non includa un sistema di protezione superficiale con comprovate caratteristiche di protezione contro la carbonatazione (vedere la EN 1504-2).

h) La scelta del metodo dipende dalle condizioni di esposizione. Se un prodotto soddisfa la Parte 1, si suppone che soddisfi anche le Parti 2 e 4.

Non strutturale - Classe R2				
N.	Caratteristica prestazionale	Substrato di riferimento (EN 1766)	Metodo di prova	Requisito
1	Resistenza a compressione	Nessuno	EN 12190	≥ 15 MPa
2	Contenuto ioni cloruro	Nessuno	EN 1015-17	≤ 0.05 %
3	Legame di aderenza	MC(0,40)	EN 1542	≥ 0.8 MPa ^{a)}
4	Ritiro/espansione impediti ^{b) c)}	MC(0,40)	EN 12617-4	Forza di legame dopo la prova ^{d) e)} ≥ 0.8 MPa ^{a)}
5	Resistenza alla carbonatazione ^{f)}	Nessuno	EN 13295	Nessun requisito ^{g)}
6	Modulo elastico	Nessuno	EN 13412	Nessun requisito
7	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 1, gelo-disgelo	MC(0,40)	EN 13687-1	Forza di legame dopo 50 cicli ^{d) e)} ≥ 0.8 MPa
8	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 2, temporali	MC(0,40)	EN 13687-2	Forza di legame dopo 30 cicli ^{d) e)} ≥ 0.8 MPa ^{a)}
9	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 4, Cicli a secco	MC(0,40)	EN 13687-4	Forza di legame dopo 30 cicli ^{d) e)} ≥ 0.8 MPa ^{a)}
10	Resistenza allo slittamento	Nessuno	EN 13036-4	Classe I: >40 unità con prova a umido Classe II: >40 unità con prova a secco Classe III: >55 unità con prova a umido
11	Coefficiente di espansione termica ^{c)}	Nessuno	EN 1770	Non richiesto se sono eseguite le prove 7, 8 o 9, altrimenti valore dichiarato
12	Assorbimento capillare	Nessuno	EN 13057	$\leq 0,5$ kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}

Note:

a) Il valore di 0,8 MPa non è richiesto ove si manifesti un difetto di coesione nel materiale di riparazione. Se si manifesta un difetto di coesione, è richiesto un carico di rottura minimo di 0,5 MPa.

b) Non richiesto per il metodo di riparazione 3.3.

c) Non richiesto se sottoposto a cicli termici.

d) Valore medio senza nessun valore singolo minore del 75% del requisito minimo.

e) Larghezza media massima consentita di una incrinatura $\leq 0,05$ mm senza alcuna incrinatura $\geq 0,1$ mm e senza delaminazione.

f) Per la durabilità.

g) Non idoneo per la protezione contro la carbonatazione, a meno che il sistema di riparazione non includa un sistema di protezione superficiale con comprovate caratteristiche di protezione contro la carbonatazione (vedere la EN 1504-2).

h) La scelta del metodo dipende dalle condizioni di esposizione. Se un prodotto soddisfa la Parte 1, si suppone che soddisfi anche le Parti 2 e 4.

Strutturale - Classe R3				
N.	Caratteristica prestazionale	Substrato di riferimento (EN 1766)	Metodo di prova	Requisito
1	Resistenza a compressione	Nessuno	EN 12190	≥ 25 MPa
2	Contenuto ioni cloruro	Nessuno	EN 1015-17	≤ 0.05 %
3	Legame di aderenza	MC(0,40)	EN 1542	≥ 1.5 MPa
4	Ritiro/espansione impediti ^{b) c)}	MC(0,40)	EN 12617-4	Forza di legame dopo la prova ^{d) e)} ≥ 1.5 MPa
5	Resistenza alla carbonatazione ^{f)}	Nessuno	EN 13295	dk $\leq$ calcestruzzo di controllo [MC(0,45)]
6	Modulo elastico	Nessuno	EN 13412	≥ 15 GPa
7	Compatibilità termica ^{f)} ^{h)} Parte 1, gelo-disgelo	MC(0,40)	EN 13687-1	Forza di legame dopo 50 cicli ^{d) e)} ≥ 1.5 MPa
8	Compatibilità termica ^{f)} ^{h)} Parte 2, temporali	MC(0,40)	EN 13687-2	Forza di legame dopo 30 cicli ^{d) e)} ≥ 1.5 MPa
9	Compatibilità termica ^{f)} ^{h)} Parte 4, Cicli a secco	MC(0,40)	EN 13687-4	Forza di legame dopo 30 cicli ^{d) e)} ≥ 1.5 MPa
10	Resistenza allo slittamento	Nessuno	EN 13036-4	Classe I: >40 unità con prova a umido Classe II: >40 unità con prova a secco Classe III: >55 unità con prova a umido
11	Coefficiente di espansione termica ^{c)}	Nessuno	EN 1770	Non richiesto se sono eseguite le prove 7, 8 o 9, altrimenti valore dichiarato
12	Assorbimento capillare	Nessuno	EN 13057	$\leq 0,5$ kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}

Note:

b) Non richiesto per il metodo di riparazione 3.3.

c) Non richiesto se sottoposto a cicli termici.

d) Valore medio senza nessun valore singolo minore del 75% del requisito minimo.

e) Larghezza media massima consentita di una incrinatura $\leq 0,05$ mm senza alcuna incrinatura $\geq 0,1$ mm e senza delaminazione.

f) Per la durabilità.

h) La scelta del metodo dipende dalle condizioni di esposizione. Se un prodotto soddisfa la Parte 1, si suppone che soddisfi anche le Parti 2 e 4.

Strutturale - Classe R4				
N.	Caratteristica prestazionale	Substrato di riferimento (EN 1766)	Metodo di prova	Requisito
1	Resistenza a compressione	Nessuno	EN 12190	≥ 45 MPa
2	Contenuto ioni cloruro	Nessuno	EN 1015-17	≤ 0.05 %
3	Legame di aderenza	MC(0,40)	EN 1542	≥ 2.0 MPa
4	Ritiro/espansione impediti ^{b) c)}	MC(0,40)	EN 12617-4	Forza di legame dopo la prova ^{d) e)} ≥ 2.0 MPa
5	Resistenza alla carbonatazione ^{f)}	Nessuno	EN 13295	dk $\leq$ calcestruzzo di controllo [MC(0,45)]
6	Modulo elastico	Nessuno	EN 13412	≥ 20 GPa
7	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 1, gelo-disgelo	MC(0,40)	EN 13687-1	Forza di legame dopo 50 cicli ^{d) e)} ≥ 2.0 MPa
8	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 2, temporali	MC(0,40)	EN 13687-2	Forza di legame dopo 30 cicli ^{d) e)} ≥ 2.0 MPa
9	Compatibilità termica ^{f) h)} Parte 4, Cicli a secco	MC(0,40)	EN 13687-4	Forza di legame dopo 30 cicli ^{d) e)} ≥ 2.0 MPa
10	Resistenza allo slittamento	Nessuno	EN 13036-4	Classe I: >40 unità con prova a umido Classe II: >40 unità con prova a secco Classe III: >55 unità con prova a umido
11	Coefficiente di espansione termica ^{c)}	Nessuno	EN 1770	Non richiesto se sono eseguite le prove 7, 8 o 9, altrimenti valore dichiarato
12	Assorbimento capillare	Nessuno	EN 13057	$\leq 0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$

Note:

b) Non richiesto per il metodo di riparazione 3.3.

c) Non richiesto se sottoposto a cicli termici.

d) Valore medio senza nessun valore singolo minore del 75% del requisito minimo.

e) Larghezza media massima consentita di una incrinatura $\leq 0,05$ mm senza alcuna incrinatura $\geq 0,1$ mm e senza delaminazione.

f) Per la durabilità.

h) La scelta del metodo dipende dalle condizioni di esposizione. Se un prodotto soddisfa la Parte 1, si suppone che soddisfi anche le Parti 2 e 4.

5. Classificazione secondo Decreto Ministeriale 14.01.2008

Come detto nel paragrafo introduttivo, nel caso di utilizzo di malte da ripristino con implicazioni di tipo strutturale, quali a titolo di esempio interventi di ricostruzione degli strati di copriferro o di rinforzo strutturale, trova applicazione il Decreto Ministeriale 14.01.2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”, Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 e relativa Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 “Istruzioni per l’applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008”, Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009.

La malta da ripristino deve quindi essere classificata secondo la stessa metodologia prevista per il calcestruzzo.

In particolare la prescrizione della malta da ripristino deve essere caratterizzata almeno mediante la classe di resistenza, la classe di consistenza, il diametro massimo dell’aggregato e la classe di esposizione.

Come specificato al Paragrafo 11.2.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008 *“la classe di resistenza è contraddistinta dai valori caratteristici delle resistenze cubica R_{ck} e cilindrica f_{ck} a compressione uniassiale, misurate su provini normalizzati e cioè rispettivamente su cilindri di diametro 150 mm e di altezza 300 mm e su cubi di spigolo 150 mm.”*

Ed ancora *“la resistenza caratteristica a compressione è definita come la resistenza per la quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori inferiori. Nelle presenti norme la resistenza caratteristica designa quella dedotta da prove su provini come sopra descritti, confezionati e stagionati come specificato al § 11.2.4, eseguite a 28 giorni di maturazione. Si dovrà tener conto degli effetti prodotti da eventuali processi accelerati di maturazione. In tal caso potranno essere indicati altri tempi di maturazione a cui riferire le misure di resistenza ed il corrispondente valore caratteristico. Il conglomerato per il getto delle strutture di un’opera o di parte di essa si considera omogeneo se confezionato con la stessa miscela e prodotto con medesime procedure”.*

6. Marcatura CE

L'impiego di malte di classe R1, R2, R3 e R4 è ammesso solo ed esclusivamente nel caso in cui siano dotate di Marcatura CE. In particolare per uso strutturale sono ammesse solo malte di classe R3 e R4.

L'utilizzo di malte come prodotto per uso strutturale, inteso come materiale o prodotto che consente ad un'opera ove questo è incorporato di soddisfare il requisito essenziale di resistenza meccanica e stabilità, non è infatti previsto dal Decreto Ministeriale 14.01.2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni" e dalla Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 "Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008".

In accordo al Paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, i materiali e prodotti per uso strutturale devono essere identificati univocamente a cura del produttore (secondo le procedure applicabili), qualificati sotto la responsabilità del produttore (secondo le procedure applicabili) ed accettati dal Direttore Lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione.

Per quanto attiene l'identificazione e la qualificazione di malte impiegate per la riparazione ed il rinforzo delle strutture in calcestruzzo, oggetto del presente Quaderno Tecnico, si configura il caso rappresentato alla lettera A del Paragrafo 11.1 del D.M. 14.01.2008, in quanto è disponibile una norma europea armonizzata. Per maggiore chiarezza si riporta un estratto della norma citata:

"... A) materiali e prodotti per uso strutturale per i quali sia disponibile una norma europea armonizzata il cui riferimento sia pubblicato su GUUE. Al termine del periodo di coesistenza il loro impiego nelle opere è possibile soltanto se in possesso della Marcatura CE, prevista dalla Direttiva 89/1069/CEE "Prodotti da costruzione" (CPD), recepita in Italia dal DPR 21/04/1993 n. 246, così come modificato dal DPR 10/12/1997, n. 499 ...".

È onere del Direttore Lavori, in fase di accettazione, accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere ad ogni fornitore, per ogni diverso prodotto, la Dichiarazione di Conformità alla parte armonizzata della specifica norma europea EN 1504, **procedendo ad esplicita accettazione per iscritto. Il**

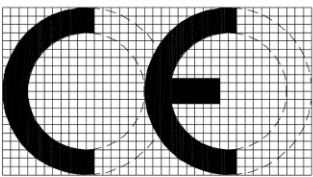
Direttore Lavori è tenuto inoltre alla verifica della corrispondenza dei prodotti alle tipologie, classi e/o famiglie previsti nella suddetta documentazione.

I progettisti e Direttori Lavori che non prescrivano ed accettino correttamente i materiali marcati CE sono sanzionabili secondo quanto previsto dal recente *Decreto Legislativo n.106 del 16 giugno 2017*, il fatto che i materiali marcati siano da usarsi per scopi strutturali costituisce un'aggravante.

Il produttore o il suo rappresentante autorizzato designato nel contesto dell'EEA è responsabile dell'applicazione della marcatura CE. Il simbolo di marcatura CE da applicare deve essere conforme alla Direttiva 93/68/CE e deve figurare sul prodotto di riparazione (o qualora ciò non sia possibile può trovarsi sull'etichetta, sull'imballaggio o sui documenti commerciali di accompagnamento, per esempio una bolla di consegna). Le informazioni seguenti devono accompagnare il simbolo di marcatura CE:

- numero di identificazione dell'ente di certificazione (solo per prodotti nell'ambito del sistema 1+, 1 e 2+);
- nome o marchio identificativo e indirizzo registrato del produttore;
- le ultime due cifre dell'anno di apposizione della marcatura;
- numero del certificato di conformità CE o certificato di controllo della produzione di fabbrica (se pertinente);
- riferimento della norma europea UNI EN 1504;
- descrizione del prodotto: nome generico, materiale, dimensioni... e uso previsto;
- informazioni sulle caratteristiche regolamentate.

Nella immagine seguente è rappresentato un esempio di una malta di riparazione di classe R3 per i principi di riparazione 3.1, 3.2, 4.4, 7.1 e 7.2, con l'indicazione delle informazioni che accompagnano la Marcatura CE (tratto da UNI EN 1504 – Parte 3).


01234
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 05 01234-CPD-00234
EN 1504-3 Prodotto di riparazione strutturale per calcestruzzo per mezzo di malte CC di riparazione (a base di cemento idraulico) Resistenza a compressione: classe R 3 Contenuto di ioni cloruro: $\leq 0,05\%$ Aderenza: $\geq 1,5$ MPa Resistenza alla carbonatazione: Passa Modulo elastico: 21 GPa Compatibilità termica parte 1: $\geq 1,5$ MPa Assorbimento capillare: $\leq 0,5 \text{ kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{h}^{-0,5}$ Sostanze pericolose: conforme al punto 5.4 Reazione al fuoco: Euroclasse E

Marcatura di conformità CE, consistente nel simbolo "CE" riportato nella Direttiva 93/68/CEE.

Numero identificativo dell'ente di certificazione (ove pertinente)

Nome o marchio identificativo e indirizzo registrato del produttore

Ultime due cifre dell'anno di apposizione della marcatura

Numero del certificato (ove pertinente)

N° della norma europea

Descrizione del prodotto

e

informazioni sulle caratteristiche regolamentate

Esempio di Marcatura CE

7. Preparazione del supporto

Al fine di garantire una adeguata applicazione dei prodotti e sistemi per la protezione e riparazione di una struttura in calcestruzzo, deve essere garantita una preparazione del supporto di calcestruzzo idonea alle condizioni richieste del supporto e allo stato strutturale degli elementi.

La norma UNI EN 1504 – Parte 10 “Applicazione in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori” stabilisce i requisiti per la preparazione del supporto in funzione del metodo di riparazione e di protezione scelto.

In particolare, con riferimento all’impiego di malte per la protezione e riparazione di strutture in calcestruzzo, il processo di preparazione del supporto si articola nelle fasi di pulitura, irruvidimento o martellinatura e di rimozione del calcestruzzo.

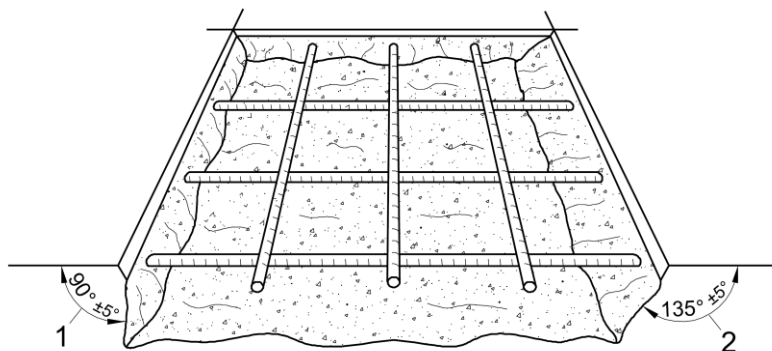
In accordo ai Principi ed ai metodi di protezione e riparazione di cui alla norma UNI EN 1504 – Parte 9, devono essere rimossi gli strati di calcestruzzo debole, danneggiato e deteriorato, o dove necessario il calcestruzzo sano. L’eventuale presenza di micro-fessure o delaminazioni contribuisce infatti alla riduzione di ancoraggio ed integrità strutturale. A tal fine è suggerito di ispezionare

visivamente e sottoporre a martellamento la superficie finita della struttura in calcestruzzo, per rilevare la presenza di materiale incoerente.

L'entità dell'intervento di rimozione del calcestruzzo, adeguato ai Principi e ai Metodi scelti, deve essere ridotta al minimo, non deve ridurre l'integrità strutturale oltre la capacità della struttura di svolgere la propria funzione e deve essere correlata ai valori di profondità di carbonatazione e ai profili di concentrazione dei cloruri. È altresì importante stabilire l'entità della rimozione del calcestruzzo in funzione di:

- resistenza del calcestruzzo alla penetrazione di gas e di fluidi;
- natura e concentrazione dei contaminanti prima e dopo la riparazione;
- profondità della contaminazione;
- profondità della carbonatazione;
- attività di corrosione dell'armatura;
- copriferro;
- necessità di compattazione del materiale di riparazione;
- necessità di aderenza al supporto;
- necessità di trattamento dell'armatura.

Come rappresentato nell'immagine sottostante, nel caso di interventi locali è suggerita un'inclinazione del taglio secondo un angolo minimo di 90° (1 in Figura), per evitare sottosquadri e massimo di 135° (2 in figura), per ridurre distacchi dalla superficie superiore del calcestruzzo sano adiacente. I bordi dovrebbero essere adeguatamente irruviditi al fine di garantire una sufficiente adesione tra materiale originario e prodotto di riparazione.



Dettagli del taglio del supporto

Nel caso in cui le barre di armatura siano interessate da fenomeni di corrosione, la profondità della rimozione deve essere correlata alle specifiche di riparazione. La stessa dovrebbe estendersi in modo tale da lasciare un giuoco tra l'armatura ed il supporto almeno uguale al maggiore tra 15 mm o la dimensione massima dell'aggregato del materiale di riparazione aumentato di 5 mm, al fine di consentire una compattazione adeguata.

Una efficace tecnica di rimozione del calcestruzzo è rappresentata dall'idrodemolizione. I suoi principali vantaggi consistono nell'assenza di sviluppo di microfessure e nella riduzione dello strato di calcestruzzo sano rimosso.

L'idrodemolizione deve essere effettuata con lance manuali o sistemi automatizzati capaci di garantire un getto d'acqua costante fino alla pressione massima di 1500 bar, in modo tale da rimuovere in maniera mirata solo le parti superficiali non solidali al resto del calcestruzzo. Come indicato dalla norma UNI 1504-10, la pressione di 600 bar è sufficiente a rimuovere il calcestruzzo disgregato e a pulire le barre di armatura senza rischiare di creare dannose lesioni nel calcestruzzo non disgregato. L'uso di una pressione superiore è indicata quando si voglia eliminare anche il calcestruzzo non disgregato e ben adeso al supporto ma ammalorato. La portata d'acqua ideale è compresa fra i 150-300 l/min. Tuttavia l'idroscarifica e le relative pressione e portata d'acqua di esecuzione devono essere conformi agli elaborati progettuali e tarate rispetto alla resistenza meccanica del calcestruzzo su cui si va ad operare.

La demolizione può essere completata con mezzi meccanici per piccole porzioni di materiale.

L'idrodemolizione deve portare alla luce lo strato di calcestruzzo di buona qualità ed omogeneità ed eliminare ogni altro elemento che possa alterare la coesione dei successivi trattamenti e deve essere spinta fino ai valori di rimozione non eccedenti quanto stabilito nei disegni progettuali (da intendersi come valor medio sulla superficie interessata dal trattamento, come di seguito meglio esposto).

In seguito alla scarifica o idroscarifica del calcestruzzo è fondamentale pulire le superfici da trattare, soprattutto se orizzontali, con l'idrolavaggio a 300-400 atm ed una portata d'acqua di almeno 150 l/min.

La superficie del calcestruzzo di supporto dovrà risultare macroscopicamente ruvida (asperità non inferiore a 5 mm di profondità) allo scopo di ottenere la massima aderenza tra il nuovo ed il vecchio materiale.

8. Applicazioni in opera di prodotti e sistemi

Aderenza

I requisiti di aderenza tra il vecchio calcestruzzo e la malta da ripristino devono essere specificati in accordo alla UNI EN 1504-3. Un profilo superficiale ruvido può essere ottenuto mediante idrodemolizione o con mezzi meccanici.

La tecnica dell'idrodemolizione garantisce usualmente una buona aderenza tra il supporto di calcestruzzo e il materiale di riparazione, evitando quindi la necessità di disporre collegamenti meccanici per il trasferimento delle sollecitazioni di trazione e di taglio minori di 0,4 MPa.

Nel caso di applicazione del prodotto per strati successivi, la superficie della malta di riparazione può essere irruvidita prima che vada in presa in modo da ottenere una chiave meccanica per uno strato successivo.

Qualora siano utilizzati prodotti e sistemi cementizi o polimerici di riparazione, si dovrebbe decidere se sia appropriato applicare un fondo ancorante. L'utilizzo di rivestimenti ancoranti può ridurre l'aderenza se lo stesso va in presa prima dell'applicazione dei prodotti successivi. Qualora invece non sia utilizzato un fondo ancorante, la superficie deve essere inumidita e non deve essere lasciata asciugare prima dell'applicazione dei prodotti e sistemi, allo scopo di impedire il trasferimento dell'acqua dal prodotto di riparazione al supporto, che influenzerebbe negativamente l'idratazione del prodotto di riparazione. **Tuttavia, la presenza di acqua all'interno delle cavità e porosità superficiali potrebbe ridurre l'aderenza. Un'indicazione è data dall'aspetto della superficie che dovrebbe essere scura e opaca, senza lucidità.**

Se le malte venissero applicate in assenza di contrasto (ruvidità del supporto, confinamento e armatura per spessori maggiori di 30 mm), sarebbero destinate inevitabilmente a perdere aderenza con il supporto durante l'asciugatura e l'espansione iniziale ed ad avere fessure da ritiro igrometrico. È necessario quindi prevedere un'armatura di contrasto per spessori maggiori di 30 mm.

Le malte polimeriche idrauliche possono andare in presa con uno strato superficiale liscio ad alto contenuto di polimeri che pregiudica l'aderenza del trattamento superficiale o degli strati successivi.

Malte da ripristino applicate a mano

Nel caso di utilizzo di prodotti o sistemi cementizi senza l'applicazione di un promotore di adesione, il supporto di calcestruzzo deve essere accuratamente preumidificato. Al momento dell'applicazione però non deve essere presente acqua sulla superficie. La superficie di applicazione deve essere satura a superficie asciutta. Qualora si utilizzi un promotore di adesione, le condizioni del supporto devono essere adeguatamente specificate.

L'applicazione della malta di riparazione al supporto deve essere eseguita tramite compattazione, evitando l'inclusione di bolle d'aria, in modo tale da ottenere la resistenza richiesta, nonché proteggere l'armatura dalla corrosione.

Al fine di evitare avvallamenti o abbassamenti, deve essere stabilito se l'applicazione della malta di riparazione deve essere effettuata a strati, specificando lo spessore degli strati, l'intervallo di tempo tra l'applicazione degli strati e altri requisiti. In caso di interruzioni delle lavorazioni, per cui non risulta possibile applicare i diversi strati umido su umido, deve essere effettuato il trattamento superficiale per l'ancoraggio precedentemente descritto.

Per impieghi particolari come ad esempio sott'acqua, casi in cui è necessaria una resistenza all'abrasione elevata, oppure in cui sono richiesti strati sottili o un rapido indurimento, o ancora dove è impossibile ottenere la stagionatura dei materiali cementizi, possono essere impiegate malte polimeriche.

Malte proiettate

Nel caso di utilizzo di malte tixotropiche, il supporto di calcestruzzo deve essere adeguatamente preumidificato, in base alle sue condizioni e alla composizione dei prodotti e dei sistemi utilizzati.

Ai fini dell'ottenimento della resistenza richiesta e della protezione delle armature, le malte tixotropiche devono essere applicate evitando la formazione di vuoti e materiale incoerente di rigetto.

Se l'intervento è di tipo strutturale, per evitare riduzioni di aderenza, sono da escludersi trattamenti della superficie della malta. Nel caso in cui fosse richiesto

un trattamento sulla malta proiettata strutturale, questo deve essere eseguito sullo strato finale che non è stato applicato umido su umido sul materiale strutturale.

L'applicazione a spruzzo della malta dovrebbe essere effettuata con un'angolazione quanto più vicina possibile a 90 gradi rispetto al supporto, ed a una distanza compresa tra 0,5 m e 1,0 m fra l'ugello e il supporto.

Se la malta è proiettata in uno spessore maggiore di 70 mm, può rendersi necessario incorporarvi un'armatura per impedire lo sviluppo di fessure da ritiro e favorire l'aderenza meccanica. In tal caso deve essere prestata particolare attenzione al fine di evitare la formazione di vuoti dietro l'armatura.

Malte gettate

Nel caso di utilizzo di prodotti o sistemi cementizi senza l'applicazione di un promotore di adesione, il supporto di calcestruzzo deve essere accuratamente preumidificato. Al momento dell'applicazione però non deve essere presente acqua sulla superficie. Qualora si utilizzi un promotore di adesione, le condizioni del supporto devono essere adeguatamente specificate.

Il fissaggio della cassaforma al supporto di calcestruzzo deve avvenire il più presto possibile dopo la preparazione del supporto. Deve essere inoltre evitato l'ingresso di detriti o contaminanti.

Qualora si impieghi una modalità di compattazione della malta tramite vibrazione, deve essere evitata l'inclusione di bolle d'aria, al fine di ottenere la resistenza richiesta, nonché proteggere l'armatura dalla corrosione. Se si impiega invece una modalità di compattazione per gravità, tramite getto di una malta fluida, devono essere soddisfatti anche i requisiti seguenti: la cassaforma deve essere a tenuta d'acqua nei confronti del calcestruzzo esistente, priva di ostacoli al libero scorrimento della malta e deve consentire la fuoruscita dell'aria e dell'acqua di essudamento; la malta deve essere introdotta nella cassaforma in modo tale che l'aria e l'acqua possano fuoruscire.

Strati di drenaggio sulle superfici della cassaforma impediscono la formazione di vuoti superficiali, riducendo il rapporto acqua-cemento dello strato superficiale.

Stagionatura

Un'adeguata stagionatura è necessaria qualora si utilizzino prodotti e sistemi di riparazione cementizi. A seconda della natura dei prodotti e dei sistemi, dello spessore della riparazione e delle condizioni ambientali dovranno essere indicati il metodo ed il periodo della stagionatura. Deve essere evitato l'utilizzo di agenti di stagionatura qualora questi ultimi influiscano negativamente sui prodotti e sui sistemi applicati successivamente.

La corretta stagionatura dei prodotti o sistemi è fondamentale per garantire la buona aderenza di questi al supporto, la riduzione del quadro fessurativo e l'espansione dei sistemi per cui questa è prevista. Tutto ciò è alla base di un intervento durevole, pertanto è onere del progettista prescriberne le modalità e della direzione lavori di controllarne l'esecuzione.

Fessure e giunti

Si deve tenere conto della posizione e delle dimensioni delle fessure e dei giunti, di qualunque movimento del supporto e dell'effetto sulla stabilità, sulla durabilità e sulla funzione della struttura, nonché del rischio che si formino nuove fessure in seguito al trattamento.

Al fine di mantenere le prestazioni del giunto, deve essere garantita l'estensione dello stesso giunto attraverso il materiale di riparazione.

Il riempimento delle fessure può essere effettuato mediante iniezione, imbibizione o tecniche che utilizzano il vuoto. Prima del riempimento delle fessure, si deve procedere alla rimozione di qualunque agente contaminante, quale ad esempio olio. La quantità tollerabile di umidità o acqua nelle fessure dipende dalle proprietà del materiale di riempimento. La pulizia ed asciugatura delle fessure può essere eseguita con metodi che comprendono l'utilizzo di acqua e solventi e aria pulita sotto pressione. In caso di riempimento delle fessure per iniezione, è solitamente necessario sigillare le fessure per completare l'iniezione senza interruzioni.

9. Compiti del Direttore Lavori

Nel caso di interventi di ripristino o rinforzo di strutture in calcestruzzo effettuati con malte da ripristino, **la figura del Direttore Lavori viene a rivestire un**

ruolo di estrema importanza poiché nella maggior parte degli interventi risultano assenti entrambi i momenti di collaudo statico e tecnico-amministrativo, a causa della loro classificazione come intervento locale e della natura degli importi a base di gara.

Il Direttore Lavori rappresenta pertanto il garante dell'intero processo realizzativo dell'intervento di ripristino o rinforzo, dalla fase di accettazione in cantiere del materiale fino al controllo di qualità in sito. Onere del Direttore Lavori è compiere una serie di azioni che portino al controllo della corretta esecuzione dell'opera, compreso il controllo sui materiali.

I compiti essenziali ma non esaustivi del Direttore Lavori possono essere così individuati:

- Verifica delle proposte progettuali e della consistenza effettiva delle opere oggetto di intervento;
- Accettazione in cantiere del materiale;
- Controllo delle procedure di applicazione in opera della malta da ripristino;
- Controllo delle prestazioni richieste dal progetto, in accordo con EN 1504, EN 12190 e D. M. 14.01.2008.

Il Direttore Lavori, in fase di accettazione, deve accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere ad ogni fornitore, per ogni diverso prodotto, la Dichiarazione di Conformità alla parte armonizzata della specifica norma europea EN 1504, **procedendo ad esplicita accettazione per iscritto**. Il Direttore Lavori è tenuto inoltre alla verifica della corrispondenza dei prodotti alle tipologie, classi e/o famiglie previsti nella suddetta documentazione;

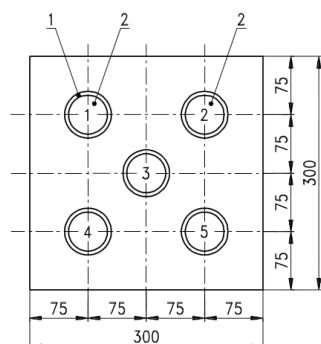
Il Direttore Lavori deve controllare il rispetto delle procedure di applicazione della malta da ripristino riportate all'interno della scheda prodotto. Precedentemente all'avvio dei lavori di protezione, riparazione o rinforzo di strutture in calcestruzzo **si suggerisce l'esecuzione di un campo prova su una porzione della struttura**, al fine di accertare le corrette modalità di applicazione del prodotto o sistema, tenuto conto anche delle specifiche condizioni ambientali e dell'effettiva preparazione del supporto. Successivamente all'esecuzione di prove riguardanti le proprietà del supporto, l'idoneità dei prodotti e dei sistemi, le loro modalità di applicazione e le proprietà finali dei prodotti e dei sistemi induriti e successivamente ad accettazione delle stesse, si potrà dar esecuzione ai lavori di

riparazione o rinforzo, avendo cura di seguire le medesime procedure di applicazione del materiale.

Con riferimento all'ultimo punto, riguardante il controllo del sistema di ripristino o rinforzo, si sottolinea l'importanza e la necessità di eseguire prove per la verifica dei valori di adesione tra materiale di riparazione o rinforzo ed il supporto e dei valori di resistenza a compressione.

L'adesione tra la malta ed il supporto viene valutata attraverso prove di pull-off eseguite in conformità alla UNI 1542. Possono essere ritenuti accettabili valori misurati in sito minori dei relativi valori richiesti per la classificazione della malta da ripristino e riportati nelle tabelle di cui al Paragrafo 4. Per malte per uso strutturale di classe R3 e R4, possono essere accettati valori in sito compresi nell'intervallo tra 1.2 MPa e 1.5 MPa. Per malte per uso non strutturale, il valore minimo richiesto di aderenza in sito è pari a 0.7 MPa.

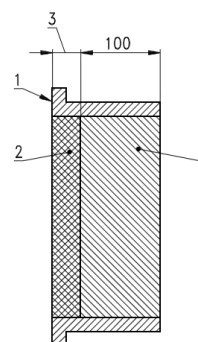
Dimensioni in mm



Pianta del campione riportante le posizioni dei tasselli

Legenda

- 1 Intaglio delimitante l'area di prova ottenuta mediante carotaggio
- 2 Tassello di acciaio o di alluminio avente diametro 50 mm



Sezione trasversale del campione, illustrante la posizione dello stampo

Legenda

- 1 Stampo
- 2 Prodotto o sistema
- 3 Spessore ottenuto regolando la posizione dello stampo
- 4 Campione di calcestruzzo di riferimento

Dettagli prova di pull-off

Ai fini del controllo della resistenza a compressione della malta di ripristino relativa alla classe indicata nella Marcatura CE, sono effettuate prove in conformità alla EN 12190 "Metodi di prova – Determinazione della resistenza a compressione delle malte da riparazione", che prevede la determinazione della resistenza a compressione su provini cubici di lato 40 mm, i quali possono essere anche ottenuti a partire da provini prismatici di dimensioni 40 mm x 40 mm x 160 mm, previo taglio del campione.

Nel caso di utilizzo di malte da ripristino caratterizzato da implicazioni di tipo strutturale, quali a titolo di esempio interventi di ricostruzione degli strati di copriferro o di rinforzo strutturale, devono essere eseguite prove di resistenza a

compressione in conformità al Decreto Ministeriale 14.01.2008 e alla Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009. Nello specifico le prove possono essere effettuate su provini normalizzati di tipo cilindro, aventi diametro pari a 150 mm ed altezza 300 mm, oppure di tipo cubico di lato 150 mm.

Tali prove dovranno essere eseguite sempre, anche nel caso in cui l'intervento in esame sia classificabile come intervento locale. Le prove dovranno essere eseguite presso Laboratori Ufficiali ed i risultati dovranno costituire parte integrante della documentazione tecnica allegata al Conto Finale dei Lavori, come specificato nel Modulo di Accettazione, Applicazione in Opera e Controllo allegato al presente Quaderno Tecnico.

Nel caso in cui i risultati delle prove effettuate in sito non siano conformi ai valori indicati nella scheda di prodotto del materiale e nella Marcatura CE, il Direttore Lavori deve inoltrare segnalazione al Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

10. Compiti del Progettista ed indicazioni progettuali

Al fine di garantire una adeguata qualità ed efficacia dell'intervento di ripristino o rinforzo di una struttura in calcestruzzo, la fase progettuale riveste un ruolo di primaria importanza.

Il Progettista deve indicare correttamente in fase progettuale la classe di malta da ripristino impiegata, le caratteristiche e prestazioni richieste e le fasi di applicazione. Il progettista deve espressamente specificare in sede progettuale il tipo di malta da ripristino prevista, identificata a seguito di un attento esame di tutte le problematiche relative, quali ad esempio lavorabilità, tempi di presa, vibrazioni, lavori in pendenza, ecc.

Le caratteristiche della malta da ripristino usata a scopo strutturale, ossia in sostituzione al calcestruzzo, devono essere definite in accordo al Decreto Ministeriale 14.01.2008. Se ad esempio, una malta è utilizzata per un ripristino del copriferro, deve avere resistenza non inferiore a quella del supporto.

L'impiego di malte da ripristino per interventi di ripristino o rinforzo di strutture in calcestruzzo è consigliato fino ad uno spessore di 4 cm. Nel caso di interventi di ripristino di tipo localizzato e nell'impossibilità di eseguire interventi globali di risanamento, tale valore può essere incrementato fino a circa 7/8 cm. Per

interventi di ripristino o rinforzo caratterizzati da spessori maggiori di 4 cm, a causa del costo elevato del materiale, dovranno essere previsti interventi con calcestruzzi da ripristino, oggetto del Quaderno Tecnico n. 10 *“Calcestruzzi da ripristino”*.

11. Malte fibrorinforzate

Per alcune applicazioni particolari potranno essere previste malte additivate con fibre di diversa natura disperse nella matrice. Le fibre di metallo o sintetiche dovranno essere strutturali e forniranno ai prodotti più o meno spiccate caratteristiche di resistenza a trazione e flessione – trazione.

Queste malte sono solitamente usate a scopo strutturale e potranno essere usate anche in assenza di barre di armatura aggiuntiva.

La loro caratterizzazione in fase progettuale segue le indicazioni dei paragrafi precedenti alle quali, se necessario in funzione dell'uso, andranno aggiunte le caratteristiche delle resistenze residue valutate secondo la UNI EN 14651.

Queste malte sono marcate CE secondo la UNI EN 1504-3 e classificate come R3 e R4.

Se utilizzate per uso strutturale, sono classificate come calcestruzzi fibrorinforzati (CNR-DT 204/2006; Fib Model Code for Concrete Structures 2010), oggetto del Quaderno Tecnico n.10 *“Calcestruzzi da ripristino”*.

Bibliografia

- [1] UNI EN 206-1:2006 “Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità”
- [2] UNI EN 1504-1:2005 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 1: Definizioni”
- [3] UNI EN 1504-3:2006 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 3: Riparazione strutturale e non strutturale”
- [4] UNI EN 1504-9:2008 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 9: Principi generali per l’uso dei prodotti e dei sistemi”
- [5] UNI EN 1504-10:2005 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 10: Applicazione in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori”
- [6] Decreto Ministeriale 14.01.2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”, Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008
- [7] Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 “Istruzioni per l’applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008”, Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009
- [8] EN 12190 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova – Determinazione della resistenza a compressione delle malte da riparazione”
- [9] UNI EN 1542 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo. Metodi di prova. Misurazione dell’aderenza per trazione diretta.”
- [10] CNR-DT 204/2006 “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato”
- [11] Fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013.

ANAGRAFICA DELL'OPERA					
INTERVENTI DI RIPRISTINO E RINFORZO CON UTILIZZO DI MALTE DA RIPRISTINO MODULO DI ACCETTAZIONE, APPLICAZIONE IN OPERA E CONTROLLO					
TIPOLOGIA DI INTERVENTO		ELEMENTO		CARATTERISTICHE	
Interventi di ripristino dello strato corticale del calcestruzzo ammalorato	☐	Pila	☐	Spessore [mm]	
		Pulvino	☐	Classe malta	R3 ☐ R4 ☐
Interventi di ripristino di strati corticali di calcestruzzo ammalorato e dell'armatura esistente	☐	Trave	☐		
		Soletta	☐		
Interventi di rinforzo di sezioni in calcestruzzo, quali incrementi di sezioni, ringrossi di sezioni di pile o pulvini	☐				
CONTROLLI DA EFFETTUARSI					
TIPOLOGIA DI CONTROLLO	OPERAZIONE DI CONTROLLO			CONSERVAZIONE DELLA DOCUMENTAZIONE	
Accettazione in cantiere del materiale	Presenza della Marcatura CE		☐	Controllo completezza documentazione ☐	
	Dichiarazione di Conformità		☐	Conservazione ☐	
	Corrispondenza alle tipologie, classi e/o famiglie previste		☐		
Controllo procedure di applicazione in opera	Corretta preparazione e pulizia del substrato (verifica della pressione di idrodemolizione)		☐	Data Il Direttore Lavori	
	Corretta bagnatura del substrato		☐		
	Corretta modalità di miscelazione		☐		
	Verifica degli spessori dei singoli strati		☐		
	Verifica dello stato delle barre di armatura		☐		
	Verifica della finitura e stagionatura delle malte applicate		☐		
Controllo delle prestazioni richieste	Prove di pull-off per adesione tra malta e supporto		☐		
	Prove di resistenza a compressione	EN 12190		☐	
		D.M. 14.01.2008		☐	



QUADERNO TECNICO N. 10

CALCESTRUZZI DA RIPRISTINO

1. Introduzione

Negli interventi di ripristino e rinforzo di strutture in c.a. possono essere utilizzati calcestruzzi da ripristino.

Le principali tipologie di intervento possibile possono essere così classificate:

- Interventi di ripristino dello strato corticale del calcestruzzo ammalorato, per spessori non inferiori a 40 mm;
- Interventi di ripristino di strati corticali di calcestruzzo ammalorato e dell'armatura esistente, per spessori non inferiori a 40 mm;
- Interventi di rinforzo di sezioni in calcestruzzo, quali incrementi di sezioni, ringrossi di sezioni di pile o pulvini, solitamente per spessori maggiori di 40 mm.

A titolo di esempio, per gli aspetti inerenti gli interventi di ripristino dello stato corticale, si rimanda al Quaderno Tecnico n. 6 *“Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati”*.

Gli interventi descritti possono essere eseguiti utilizzando malte da ripristino o calcestruzzi da ripristino. Il paragrafo 1 della norma UNI EN 206-1:2016 “Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità” definisce il requisito di classificazione di una malta rispetto al calcestruzzo, stabilito nel diametro massimo dell'aggregato pari a 4 mm. Di conseguenza, conglomerati cementizi con aggregato avente diametro massimo maggiore di 4 mm sono da considerarsi calcestruzzi.

L'utilizzo di malte da ripristino è trattato separatamente nel Quaderno Tecnico n. 9 *“Malte da ripristino”*, in virtù di loro specifiche caratteristiche, regole di progettazione e cantierizzazione.

Occorre considerare che molti degli interventi descritti, in cui vengono utilizzati calcestruzzi da ripristino, possono essere considerati, nell'ambito delle normative tecniche, come interventi di tipo locale, escludendo conseguentemente la necessità di effettuare un collaudo statico. Inoltre, considerata la natura degli importi a base di gara, in molti casi non si rende necessario nemmeno un collaudo di tipo amministrativo. Si evidenzia pertanto come la figura del Direttore Lavori rivesta un ruolo di estrema importanza, a garanzia del controllo della corretta esecuzione dell'opera in termini di applicazione delle procedure di

accettazione in cantiere dei materiali, di controllo delle prestazioni richieste dal progetto e di applicazione in opera.

È importante sottolineare che il Progettista dell'intervento di ripristino o rinforzo deve provvedere ad indicare correttamente le caratteristiche e le prestazioni richieste del calcestruzzo da ripristino, che possono differire da intervento ad intervento.

Nello specifico, l'utilizzo di calcestruzzi da ripristino richiede procedure dedicate in termini sia di prescrizione sia di controllo delle proprietà fisico-meccaniche. Nel presente Quaderno Tecnico si farà riferimento al Decreto Ministeriale 14.01.2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 e relativa Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 "Istruzioni per l'Applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008", Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009. Ai fini della prescrizione dei requisiti del calcestruzzo, delle sue prestazioni, delle procedure da seguire in fase di produzione, dei criteri di conformità e della valutazione della conformità si farà riferimento alla UNI EN 206-1 *"Calcestruzzo. Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità"*. Per quanto concerne le procedure e le caratteristiche dei prodotti e sistemi da utilizzare per la riparazione, la manutenzione e la protezione, il restauro e il consolidamento delle strutture in calcestruzzo, trova inoltre applicazione la norma UNI EN 1504 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità".

Nel seguito si indicherà con il termine "prodotto" un costituente formulato per la riparazione o la protezione di strutture in calcestruzzo, mentre con il termine "sistema" due o più prodotti utilizzati insieme oppure consecutivamente. La modalità di applicazione di un prodotto o sistema per mezzo di un'attrezzatura o di un metodo specifico è la "tecnologia".

In particolare, nella UNI EN 1504 Parte 1 vengono definiti i termini significativi e le principali categorie di prodotti e sistemi. La parte 3 della UNI EN 1504 specifica i requisiti per l'identificazione, le prestazioni inclusa la durabilità e la sicurezza di prodotti e sistemi da utilizzare per la riparazione strutturale e non strutturale delle opere di calcestruzzo. Nella UNI EN 1504 Parte 9 vengono definiti i principi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo

che hanno subito o potrebbero subire danni o deterioramenti e viene fornita una guida alla scelta di prodotti e sistemi che siano appropriati per l'uso previsto. La Parte 10 della UNI EN 1504 fornisce i requisiti per le condizioni del substrato prima e durante l'applicazione, compresi la stabilità strutturale, lo stoccaggio, la preparazione e l'applicazione dei prodotti e dei sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo, compresi il controllo di qualità, la manutenzione, la salute e la sicurezza e l'ambiente.

SCHEMA NORMATIVO UNI EN 1504		
Parte		Oggetto
1	UNI EN 1504-1:2005	Definizioni
2	UNI EN 1504-2:2005	Sistemi di protezione della superficie di calcestruzzo
3	UNI EN 1504-3:2006	Riparazione strutturale e non strutturale
4	UNI EN 1504-4:2005	Incollaggio strutturale
5	UNI EN 1504-5:2005	Iniezione del calcestruzzo
6	UNI EN 1504-6:2007	Ancoraggio dell'armatura di acciaio
7	UNI EN 1504-7:2007	Protezione contro la corrosione delle armature
8	UNI EN 1504-8:2005	Controllo di qualità e valutazione delle conformità
9	UNI EN 1504-9:2008	Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi
10	UNI EN 1504-10:2005	Applicazioni in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori

2. Principali tipologie di calcestruzzi da ripristino

Le principali categorie di prodotti e sistemi sono definite all'interno della UNI EN 1504 Parte 1 "Definizioni". Tra questi possono essere annoverati:

- 1) **prodotti e sistemi di ancoraggio**, utilizzati per il fissaggio dell'armatura nel calcestruzzo per il conferimento di un adeguato comportamento

strutturale oppure per il riempimento di cavità allo scopo di assicurare una continuità tra elementi di acciaio e calcestruzzo;

- 2) **prodotti e sistemi per iniezione**, impiegati per il ripristino dell'integrità e/o della durabilità della struttura;
- 3) **prodotti e sistemi di riparazione non strutturali**, applicati su una superficie di calcestruzzo per il ripristino dell'aspetto geometrico o estetico della struttura;
- 4) **prodotti e sistemi di protezione dell'armatura**, applicati ad armature non protette per aumentare la protezione dalla corrosione;
- 5) **prodotti e sistemi aggrappanti strutturali**, applicati al calcestruzzo per garantire un legame strutturale duraturo ad altri materiali applicati;
- 6) **prodotti e sistemi di riparazione strutturali**, applicati a una struttura di calcestruzzo per la sostituzione del calcestruzzo danneggiato ed il ripristino dell'integrità e della durabilità strutturale;
- 7) **prodotti e sistemi di protezione della superficie**, applicati per aumentare la durabilità delle strutture di calcestruzzo e calcestruzzo armato.

Con riferimento ai prodotti e sistemi di ripristino di elementi ammalorati in calcestruzzo, sono attualmente disponibili **calcestruzzi idraulici (CC)**, a base di leganti idraulici miscelati con aggregati di idonea granulometria, che possono contenere additivi e aggiunte che fanno presa mediante una reazione di idratazione.

Con il termine **aggiunte** si indicano materiali inorganici finemente suddivisi che possono essere aggiunti ai prodotti per la riparazione, allo scopo di migliorare determinate proprietà o conferirne di speciali. Possono a loro volta essere classificate in aggiunte praticamente inerti (tipo I) ed aggiunte pozzolaniche o ad idraulicità latente (tipo II). Il termine **additivi** invece si riferisce a materiali aggiunti durante il procedimento di miscelazione del calcestruzzo allo scopo di modificare le proprietà della miscela allo stato fresco e/o indurito.

I cementi da usarsi per il calcestruzzo da ripristino devono essere conformi alla EN 197-1.

3. Principi per la protezione e la riparazione

La scelta di un prodotto o sistema appropriato per la protezione, la riparazione o il rinforzo delle strutture di calcestruzzo che hanno subito o potrebbero subire danni o deterioramenti deve essere il risultato di un attento e complesso lavoro di progettazione. Il processo di riparazione può articolarsi nelle seguenti fasi principali:

- valutazione delle condizioni della struttura;
- identificazione delle cause di deterioramento;
- decisione degli obiettivi della protezione e della riparazione;
- scelta del/dei principio/i di protezione e riparazione appropriato/i;
- scelta dei metodi;
- definizione delle proprietà dei prodotti e dei sistemi;
- specifica dei requisiti di manutenzione in seguito alla protezione ed alla riparazione.

Punti chiave della UNI EN 1504 sono la definizione dei requisiti minimi per la protezione e riparazione, l'identificazione degli obiettivi dell'intervento di protezione e riparazione e l'indicazione delle basi per la scelta dei prodotti e sistemi. In particolare, tali tematiche sono trattate nella Parte 9 "Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi".

Ai fini di una corretta progettazione dell'intervento di protezione e riparazione è essenziale la fase di valutazione delle condizioni della struttura di calcestruzzo, dei difetti, compresi quelli non a vista e quelli potenziali, e delle cause di tali difetti. È altresì importante tenere conto dell'approccio progettuale originario, delle caratteristiche ambientali, delle condizioni durante la costruzione e della storia della struttura, delle condizioni d'uso ed infine dei futuri requisiti per l'uso richiesti.

I difetti più comuni riscontrabili in strutture di calcestruzzo riguardano i materiali che lo compongono, calcestruzzo ed armature. Queste ultime possono essere interessate da fenomeni di corrosione, a causa di difetti di progettazione oppure per raggiungimento della vita utile della struttura.

Per quanto concerne i difetti del calcestruzzo, una classificazione può essere effettuata a seconda della natura del difetto che può essere di origine meccanica, chimica o fisica. Le cause più comuni dei difetti di tipo meccanico possono essere

individuare in impatti, sovraccarichi, eventuali movimenti della struttura quali ad esempio assestamenti, esplosioni o vibrazioni. Difetti di natura chimica possono essere generalmente riconducibili a reazioni alcali-aggregato, ad attività biologiche o alla presenza di agenti aggressivi quali ad esempio solfati, acqua dolce o sali. Infine per quanto riguarda i difetti del calcestruzzo di natura fisica, le cause principali risiedono in cicli gelo/disgelo e in fenomeni termici, di cristallizzazione dei sali, di ritiro, erosione o usura. In riferimento alla seconda tipologia di difetto precedentemente descritta ed interessante le armature, le cause più comuni possono essere individuate in fenomeni di carbonatazione, presenza di correnti vaganti o di contaminanti corrosivi. La presenza di questa ultima causa di degrado può provenire da prodotti presenti alla miscelazione, quali ad esempio cloruro di sodio o cloruro di calcio, oppure dall'ambiente esterno, con apporto ad esempio di cloruro di sodio o altri agenti contaminanti. Nelle tabelle successive sono riportate in modo schematico le sopracitate cause comuni dei difetti riscontrabili nelle strutture di calcestruzzo, separatamente per il calcestruzzo e per le barre di armatura.

La scelta di un calcestruzzo da ripristino è in relazione soprattutto alle modalità applicative. Più semplice è l'applicazione, migliore questa sarà e quindi migliore sarà il risultato dell'intervento in termini di durabilità dello stesso.

Materiale	Natura del difetto	Causa comune
Calcestruzzo	Meccanica	Impatti
		Sovraccarichi
		Movimenti della struttura
		Esplosioni
		Vibrazioni
	Chimica	Reazioni alcali-aggregato
		Attività biologiche
		presenza di agenti aggressivi quali ad esempio solfati, acqua dolce o sali.
	Fisica	Cicli gelo/disgelo
		Fenomeni termici, di cristallizzazione dei sali, di ritiro, erosione o usura
		Fenomeni di cristallizzazione dei sali
		Ritiro
		Erosione
		Usura

Materiale	Natura del difetto	Causa comune	
Barre di armatura	Corrosione	Carbonatazione	
		Correnti vaganti	
		Contaminanti corrosivi alla miscelazione	Cloruro di sodio
			Cloruro di calcio
		Contaminanti corrosivi dall'ambiente esterno	Cloruro di sodio
			Altri agenti contaminanti

Alcuni dei difetti descritti possono derivare anche da specifiche non adeguate, materiali non idonei e non corrette fasi di progettazione ed esecuzione.

Per tali motivi, le fasi di identificazione e registrazione della natura e delle cause dei difetti riscontrabili nella struttura di calcestruzzo rivestono un ruolo di fondamentale importanza nel processo di riparazione. Appositi ed idonei piani di

indagine devono essere definiti. È importante sottolineare che i risultati ottenuti a valle delle indagini effettuate devono essere validi in entrambe le fasi di progettazione ed esecuzione dei lavori di protezione o riparazione. In caso negativo, nuove valutazioni devono essere effettuate.

La scelta dell'intervento di protezione e riparazione deve essere appropriata alle cause ed all'entità dei difetti, prendendo in considerazione fattori generali, strutturali, ambientali e fattori legati alla salute e sicurezza. Nella tabella seguente sono indicati degli esempi per ciascuna delle categorie sopra indicate.

Fattore	Descrizione
Generale	Uso previsto
	Vita di progetto e di servizio
	Requisiti prestazionali
	Prestazioni a lungo termine
	Opportunità di protezione, riparazione e monitoraggio addizionali
	Numero e costo dei cicli di riparazione
	Costo e finanziamento delle opzioni alternative di protezione o riparazione
	Proprietà e preparazione del substrato esistente
	Aspetto della struttura di calcestruzzo protetta o riparata.
Strutturale	Cambiamento aspetti dinamici o altre azioni dirette
	Mezzi mediante i quali verranno trasportati i carichi durante o dopo la protezione o la riparazione;
	Future necessità di ispezione e manutenzione
Ambientale	Ambiente futuro della struttura di calcestruzzo
	Protezione da intemperie, inquinamento, spruzzi salini, ecc.
	Protezione del substrato durante il lavoro di riparazione
Salute e sicurezza	Conseguenze del cedimento strutturale della struttura di calcestruzzo
	Requisiti sanitari e di sicurezza
	Impatto delle operazioni di riparazione sugli occupanti o utenti della struttura di calcestruzzo e sul pubblico

La scelta di un prodotto o di un sistema idoneo per la protezione o riparazione di una struttura in calcestruzzo si deve basare sull'applicazione di metodi conformi ad una serie di principi di base, che possono essere utilizzati separatamente o combinati fra di loro, definiti al Paragrafo 6 della UNI EN 1504

- Parte 9 “Principi generali per l’uso dei prodotti e dei sistemi”. In particolare sono identificati due gruppi di principi e di metodi, a seconda che questi siano correlati ai difetti del calcestruzzo (Principi da 1 a 6) oppure alla corrosione dell’armatura (Principi da 7 a 11). È ammesso l’impiego di metodi non descritti nella UNI EN 1504, previa dimostrazione di conformità al principio utilizzato.

Con riferimento ai soli interventi di riparazione strutturale e non strutturale delle strutture in calcestruzzo, oggetto del presente Quaderno Tecnico e descritti nella UNI EN 1504 – Parte 3 “Riparazione strutturale e non strutturale”, la scelta del prodotto o del sistema è basata sull’applicazione dei Principi 3, 4 e 7. Il Principio 3 (CR) – Ripristino del calcestruzzo prevede il ripristino del calcestruzzo originale di un elemento della struttura nella forma ed alla funzione specificate originariamente e può essere raggiunto con i metodi di applicazione a mano della malta (Metodo 3.1), di nuovo getto di calcestruzzo (Metodo 3.2) e di spruzzo di calcestruzzo o malta (Metodo 3.3). Il Principio 4 (SS) – Rafforzamento strutturale, consistente nell’aumento o ripristino della capacità di carico strutturale di un elemento della struttura di calcestruzzo, viene raggiunto con l’utilizzo del Metodo 4.4 di aggiunta di malta o calcestruzzo. Infine il Principio 7 (RP) – Conservazione e ripristino della passività prevede la creazione delle condizioni chimiche in cui la superficie dell’armatura viene mantenuta o riportata ad una condizione di passività. Tale principio può essere applicato attraverso i metodi di aumento del copriferro con aggiunta di malta di cemento o calcestruzzo (Metodo 7.1) e di sostituzione del calcestruzzo contaminato o carbonatato (Metodo 7.2).

Principio		Metodo	
N.	Definizione	N.	Definizione
3	Restauro del calcestruzzo	3.1	Applicazione a mano di malta
		3.2	Nuovo getto di calcestruzzo
		3.3	Malta o calcestruzzo proiettati
4	Consolidamento strutturale	4.4	Aggiunta di malta o di calcestruzzo
7	Conservazione o ripristino della passività	7.1	Aumento del copriferro con aggiunta di malta o calcestruzzo
		7.2	Sostituzione del calcestruzzo contaminato

Una volta fissato il principio e scelto il metodo appropriato, i prodotti ed i sistemi da utilizzarsi per interventi di riparazione strutturale e non strutturale di strutture in calcestruzzo sono selezionati in base ai requisiti richiesti dalla UNI EN 1504 – Parte 3, riguardante l'impiego di malte e di calcestruzzi, potenzialmente utilizzati insieme ad altri prodotti e sistemi, per il restauro e/o la sostituzione di calcestruzzo deteriorato e per la protezione dell'armature, al fine di prolungare la vita di servizio di una struttura di calcestruzzo che mostri deterioramento.

Per i tre Principi di riparazione considerati e per i relativi metodi di riparazione, nella tabella sottostante sono elencate le caratteristiche prestazionali dei prodotti e dei sistemi di riparazione strutturali e non strutturali richieste per *“tutti gli impieghi previsti”* o per *“determinati impieghi previsti”*.

Caratteristiche prestazionali	Principio di riparazione			
	3	4	7	
	Metodo di riparazione			
	3.1 – 3.2	3.3 ^{a)}	4.4	7.1 – 7.2
Resistenza a compressione	■	■	■	■
Contenuto di cloruri ^{b)}	■	■	■	■
Legame di aderenza	■	■	■	■
Ritiro/espansione impediti ^{c)}	■	■	■	■
Durabilità c) Resistenza alla carbonatazione ^{b) d)}	■	■	■	■
Durabilità d) Compatibilità termica Parte 1 o Parte 2 o Parte 4 della EN 13687 ^{e)}	□	□	□	□
Modulo di elasticità	□	□	■	□
Resistenza allo slittamento ^{f)}	□		□	□
Coefficiente di espansione termica ^{c) g)}	□	□	□	□
Assorbimento capillare ^{e) h)}	□	□	□	□

Note:

■ Per tutti gli impieghi previsti

□ Per determinati impieghi previsti

a) La natura del metodo di applicazione può determinare il cambiamento di alcuni metodi di prova. Fare riferimento alla EN 14487-1.

b) Questo requisito non è pertinente alla riparazione di calcestruzzo non armato.

c) Se sottoposto a cicli termici, questa prova aggiuntiva non è richiesta.

d) Qualora il sistema di riparazione includa un sistema di protezione superficiale con comprovate caratteristiche di protezione contro la carbonatazione (vedere la EN 1504-2) o sia una malta PC, questa prova non è pertinente.

e) Secondo le condizioni di esposizione ambientale.

f) Pertinente solo per le aree trafficate.

g) Pertinente solo per PC.

h) La resistenza alla corrosione rientra nei requisiti del contenuto di cloruro e della permeabilità all'acqua del prodotto.

4. Tipologie di calcestruzzo da ripristino

I calcestruzzi da ripristino possono essere raggruppati, a seconda della modalità di produzione, in **calcestruzzi preconfezionati** e **calcestruzzi predosati e marcati CE**.

I calcestruzzi preconfezionati sono prodotti con processo industrializzato mediante impianti, strutture e tecniche organizzate sia in cantiere che in uno stabilimento esterno al cantiere stesso. Tali impianti devono essere idonei ad una produzione costante, disporre di apparecchiature adeguate per il confezionamento, personale esperto ed attrezzature idonee a provare, valutare e mantenere la qualità del prodotto. Allo scopo di assicurare la rispondenza del prodotto ai requisiti richiesti e che la stessa sia mantenuta fino all'impiego, gli impianti devono essere dotati di un sistema permanente di controllo interno, certificato da organismi terzi indipendenti, come descritto al paragrafo 11.2.8 del D.M. 14.01.2008. Gli estremi di tale certificazione devono essere indicati all'interno dei documenti di accompagnamento di ogni fornitura di calcestruzzo confezionato con processo industrializzato. È onere del Direttore dei Lavori verificare la documentazione di accompagnamento di ciascuna fornitura di calcestruzzo confezionato e nel caso rifiutare le eventuali forniture provenienti da impianti non conformi. Prima dell'inizio della fornitura il Direttore dei Lavori dovrà ricevere copia della certificazione del controllo del processo di produzione e comunque dovrà effettuare le prove di accettazione previste al paragrafo 11.2.5. del D.M. 14.01.2008 e di seguito descritte al Paragrafo 5. Come descritto al paragrafo 11.2.8 del D.M. 14.01.2008 *“nel caso in cui l'impianto di produzione industrializzata appartenga al costruttore nell'ambito di uno specifico cantiere, il sistema di gestione della qualità del costruttore, predisposto in coerenza con la norma UNI EN ISO 9001:2000, certificato da un organismo accreditato, deve comprendere l'esistenza e l'applicazione di un sistema di controllo della produzione dell'impianto, conformemente alle specifiche indicazioni contenute nelle Linee Guida sul calcestruzzo preconfezionato elaborato dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei LL.PP.”* ed ancora *“Per produzioni di calcestruzzo inferiori a 1500 m³ di miscela omogenea, effettuate direttamente in cantiere, mediante processi di produzione temporanei e non industrializzati, la stessa deve essere confezionata sotto la diretta responsabilità del costruttore. Il*

Direttore dei Lavori deve avere, prima dell'inizio delle forniture, evidenza documentata dei criteri e delle prove che hanno portato alla determinazione della resistenza caratteristica di ciascuna miscela omogenea di conglomerato, così come indicato al § 11.2.3.”.

I calcestruzzi predosati e marcati CE secondo la UNI EN 1504-3 si trovano già confezionati in sacchi e non necessitano di aggiunte di altri materiali. La loro caratteristica principale consiste nel fatto che devono essere solo impastati nella betoniera o in autobetoniera o nella benna miscelatrice, con l'aggiunta di acqua, nella percentuale indicata nella relativa Scheda Tecnica. I vantaggi principali dell'utilizzo di un calcestruzzo predosato consistono in:

- rispetto della normativa vigente UNI EN 206-1;
- assenza di contestazioni in merito alla conformità del prodotto, se applicato correttamente in accordo con le indicazioni contenute nella Scheda Tecnica;
- facilità di impiego che non richiede l'impiego di manodopera specializzata;
- assenza di eventuali errori di cantiere nel dosaggio degli aggregati e del legante, essendo predosato;
- facili e pratiche fasi di movimentazione e stoccaggio, perché fornito in comodi e maneggevoli sacchi;
- riduzione dei costi di trasporto e semplificazione di tutte le operazioni di cantiere;
- impiego del prodotto con le normali attrezzature e metodologie di cantiere utilizzate per i calcestruzzi tradizionali;
- possibilità di pompaggio con pompa idonea per calcestruzzi.

Ai fini della preparazione del supporto o del cassero che conterrà il calcestruzzo possono essere impiegate le stesse metodologie ed i medesimi accorgimenti comunemente adottati per i calcestruzzi strutturali tradizionali.

La preparazione e l'utilizzo del prodotto deve avvenire in conformità e nel rispetto delle indicazioni contenute all'interno della Scheda Tecnica.

Generalmente possono individuarsi le seguenti fasi:

- versare l'intero contenuto del sacco di calcestruzzo premiscelato – non una parte di esso – in una impastatrice a coclea o in una comune betoniera;

- aggiungere la quantità di acqua necessaria all'impasto che deve essere mantenuta costante durante tutto il ciclo produttivo;
- il prodotto può essere impastato con mezzo meccanico oppure anche a mano purché l'impasto risulti omogeneo;
- completamento della messa in opera entro il tempo dalla fine dell'impasto indicato nella scheda tecnica;
- interruzione e ripresa del getto del calcestruzzo con un intervallo di tempo non superiore a quello indicato nella scheda tecnica;
- protezione delle superfici del getto dall'eccessiva evaporazione dell'acqua, con temperature ambientali superiori a + 25° C, tramite bagnatura periodica o copertura con fogli di polietilene;
- divieto di aggiungere prodotti estranei al composto originale;
- stoccaggio e conservazione del prodotto in conformità alle indicazioni contenute nella scheda tecnica.

5. Classificazione secondo Decreto Ministeriale 14.01.2008

Ai fini della classificazione del calcestruzzo da ripristino, trova applicazione il Decreto Ministeriale 14.01.2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 e relativa Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 “Istruzioni per l'Applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008”, Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009.

In particolare la prescrizione del materiale all'atto del progetto deve essere caratterizzata almeno mediante la classe di resistenza, la classe di consistenza, il diametro massimo dell'aggregato e la classe di esposizione.

Come specificato al Paragrafo 11.2.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008 *“la classe di resistenza è contraddistinta dai valori caratteristici delle resistenze cubica R_{ck} e cilindrica f_{ck} a compressione uniassiale, misurate su provini normalizzati e cioè rispettivamente su cilindri di diametro 150 mm e di altezza 300 mm e su cubi di spigolo 150 mm. Al fine delle verifiche sperimentali i provini prismatici di base 150x150 mm e di altezza 300 mm sono equiparati ai cilindri di cui sopra.”*

Ed ancora *“la resistenza caratteristica a compressione è definita come la resistenza per la quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori inferiori. Nelle presenti norme la resistenza caratteristica designa quella dedotta da prove su provini come sopra descritti, confezionati e stagionati come specificato al § 11.2.4, eseguite a 28 giorni di maturazione. Si dovrà tener conto degli effetti prodotti da eventuali processi accelerati di maturazione. In tal caso potranno essere indicati altri tempi di maturazione a cui riferire le misure di resistenza ed il corrispondente valore caratteristico. Il conglomerato per il getto delle strutture di un’opera o di parte di essa si considera omogeneo se confezionato con la stessa miscela e prodotto con medesime procedure”*.

Allo scopo di garantire il rispetto delle prescrizioni definite in sede di progetto, il calcestruzzo da ripristino deve essere prodotto in regime di controllo di qualità. Una prima fase di valutazione preliminare della resistenza è richiesta al fine di determinare, prima dell’inizio della costruzione delle opere, la miscela per la produzione del calcestruzzo con resistenza caratteristica di progetto. In tale fase, il costruttore deve effettuare idonee prove preliminari di studio, per ciascuna miscela omogenea di calcestruzzo da utilizzare, al fine di ottenere un materiale rispondente alle caratteristiche prescritte dal progettista ed alle esigenze costruttive, in termini di classe di resistenza, classe di consistenza, tempi di maturazione. Durante la produzione del calcestruzzo devono essere eseguiti controlli di produzione. Successivamente, durante l’esecuzione dell’opera, **è onere del Direttore dei Lavori eseguire specifici e sistematici controlli di accettazione del materiale**, tramite prelievo effettuato contestualmente al getto, al fine di verificare la conformità delle caratteristiche del calcestruzzo messo in opera rispetto a quello stabilito dal progetto e verificato in sede di valutazione preliminare.

Un prelievo consiste nel confezionamento di un gruppo di due provini con il calcestruzzo prelevato direttamente dall’impasto, al momento della posa in opera, alla presenza del Direttore dei Lavori o di un tecnico di sua fiducia – ferma restando tuttavia la personale responsabilità ad esso attribuita –, che provvederà a:

- redigere apposito Verbale di Prelievo;
- fornire indicazioni circa le corrette modalità di prelievo dei campioni;

- fornire indicazioni circa le corrette modalità di conservazione dei campioni in cantiere, fino alla consegna al laboratorio incaricato delle prove;
- identificare i provini mediante l'apposizione di sigle, etichettature indelebili o analoghi accorgimenti;
- redigere e sottoscrivere la domanda di prove al laboratorio, con l'indicazione precisa della posizione delle strutture interessate da ciascun prelievo, della data di prelievo e degli estremi dei Verbali di Prelievo.
- consegnare i campioni presso uno dei laboratori di prova di cui all'art. 59 del D.P.R. n. 380/2001.

Apposito riferimento al Verbale di Prelievo deve essere riportato nella certificazione emessa dal Laboratorio. I certificati di prova devono contenere almeno:

- l'identificazione del Laboratorio che rilascia il certificato;
- una identificazione univoca del certificato, tramite numero di serie e data di emissione;
- l'identificazione del committente dei lavori e del cantiere di riferimento;
- il nominativo del Direttore dei Lavori che richiede la prova;
- la descrizione, l'identificazione e la data di prelievo dei campioni da provare;
- la data di ricevimento dei campioni e la data di esecuzione delle prove;
- l'identificazione delle specifiche di prova o la descrizione del metodo o procedura adottata, con l'indicazione delle norme di riferimento per l'esecuzione della stessa;
- le dimensioni effettivamente misurate dei campioni provati, dopo eventuale rettifica;
- le modalità di rottura dei campioni;
- la massa volumica dei campioni;
- i valori misurati di resistenza.

In funzione del quantitativo di miscela omogenea in accettazione, sono definiti due tipologie di controllo: la prima, denominata controllo di tipo A è riferita ad un quantitativo non maggiore di 300 m³; la seconda, denominata controllo di tipo B, è richiesta nel caso di opere che richiedano l'impiego di un quantitativo di calcestruzzo omogeneo maggiore di 1500 m³.

Con riferimento al controllo di tipo A, ogni controllo di accettazione è rappresentato da tre prelievi, ciascuno dei quali eseguito su un massimo di 100 m³ di getto di miscela omogenea. Risulta quindi un controllo di accettazione ogni 300 m³ massimo di getto. Per ogni giorno di getto va comunque effettuato almeno un prelievo.

Per impieghi con meno di 100 m³ di getto di miscela omogenea, fermo restando l'obbligo di almeno tre prelievi, è consentito derogare dall'obbligo di prelievo giornaliero.

Con riferimento al controllo di tipo B, il controllo deve essere eseguito con frequenza non minore di un controllo ogni 1500 m³ di miscela omogenea. Per ogni giorno di getto di miscela omogenea va effettuato almeno un prelievo e complessivamente almeno 15 prelievi sui 1500 m³.

Per entrambe le tipologie di controllo A e B, nel caso in cui ci siano variazioni di qualità e/o provenienza dei costituenti dell'impasto, che possano far presumere una variazione di qualità del calcestruzzo, tale da non poter più essere considerato omogeneo, **il Direttore Lavori ha l'obbligo di prescrivere ulteriori prelievi rispetto al numero minimo.**

Il valore medio delle resistenze a compressione dei due provini di un prelievo rappresenta la resistenza di prelievo. Il quantitativo di calcestruzzo può essere accettato se il controllo di accettazione risulta essere positivo.

Nel caso di controllo di tipo A, il controllo di accettazione è positivo se risulta:

$$R_m \geq R_{ck} + 3.5$$

dove R_m è la resistenza media dei prelievi.

Nel caso di controllo di tipo B, il controllo di accettazione è positivo se risulta:

$$R_m \geq R_{ck} + 1.4s$$

dove s è lo scarto quadratico medio.

6. Preparazione del supporto

Al fine di garantire una adeguata applicazione dei prodotti e sistemi per la protezione e riparazione di una struttura in calcestruzzo, deve essere garantita una preparazione del supporto di calcestruzzo idonea alle condizioni richieste del supporto e allo stato strutturale degli elementi.

La norma UNI EN 1504 – Parte 10 “Applicazione in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori” stabilisce i requisiti per la preparazione del supporto in funzione del metodo di riparazione e di protezione scelto.

In particolare, con riferimento all’impiego di calcestruzzi per la protezione e riparazione di strutture in calcestruzzo, il processo di preparazione del supporto si articola nelle fasi di pulitura, irruvidimento o martellinatura e di rimozione del calcestruzzo.

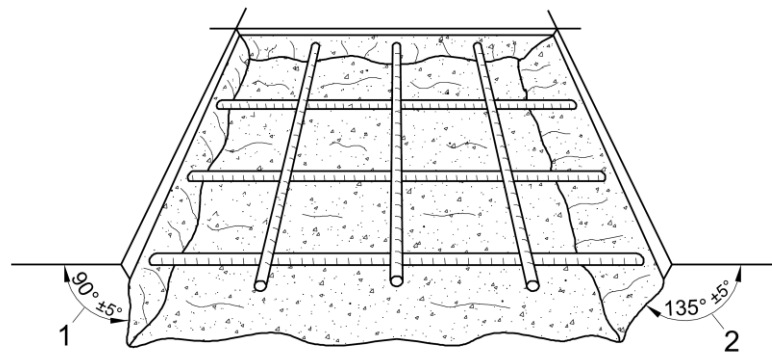
In accordo ai Principi ed ai metodi di protezione e riparazione di cui alla norma UNI EN 1504 – Parte 9, devono essere rimossi gli strati di calcestruzzo debole, danneggiato e deteriorato, o dove necessario il calcestruzzo sano. L’eventuale presenza di micro-fessure o delaminazioni contribuisce infatti alla riduzione di ancoraggio ed integrità strutturale. A tal fine è suggerito di ispezionare visivamente e sottoporre a martellamento la superficie finita della struttura in calcestruzzo, per rilevare la presenza di materiale incoerente.

L’entità dell’intervento di rimozione del calcestruzzo, adeguato ai Principi e ai Metodi scelti, deve essere ridotta al minimo, non deve ridurre l’integrità strutturale oltre la capacità della struttura di svolgere la propria funzione e deve essere correlata ai valori di profondità di carbonatazione e ai profili di concentrazione dei cloruri. È altresì importante stabilire l’entità della rimozione del calcestruzzo in funzione di:

- resistenza del calcestruzzo alla penetrazione di gas e di fluidi;
- natura e concentrazione dei contaminanti prima e dopo la riparazione;
- profondità della contaminazione;
- profondità della carbonatazione;
- attività di corrosione dell'armatura;
- copriferro;
- necessità di compattazione del materiale di riparazione;
- necessità di aderenza al supporto;

- necessità di trattamento dell'armatura.

Come rappresentato nell'immagine sottostante, nel caso di interventi locali è suggerita un'inclinazione del taglio secondo un angolo minimo di 90° (1 in Figura), per evitare sottosquadri e massimo di 135° (2 in figura), per ridurre distacchi dalla superficie superiore del calcestruzzo sano adiacente. I bordi dovrebbero essere adeguatamente irruviditi al fine di garantire una sufficiente adesione tra materiale originario e prodotto di riparazione.



Dettagli del taglio del supporto

Nel caso in cui le barre di armatura siano interessate da fenomeni di corrosione, la profondità della rimozione deve essere correlata alle specifiche di riparazione. La stessa dovrebbe estendersi in modo tale da lasciare un giuoco tra l'armatura ed il supporto almeno uguale al maggiore tra 15 mm o la dimensione massima dell'aggregato del materiale di riparazione aumentato di 5 mm, al fine di consentire una compattazione adeguata.

Una efficace tecnica di rimozione del calcestruzzo è rappresentata dall'idrodemolizione. I suoi principali vantaggi consistono nell'assenza di sviluppo di microfessure e nella riduzione dello strato di calcestruzzo sano rimosso.

L'idrodemolizione deve essere effettuata con lance manuali o sistemi automatizzati capaci di garantire un getto d'acqua costante fino alla pressione massima di 1500 bar, in modo tale da rimuovere in maniera mirata solo le parti superficiali non solidali al resto del calcestruzzo. La portata d'acqua ideale è compresa fra i 150-300 l/min. Tuttavia l'idroscarifica e le relative pressione e portata d'acqua di esecuzione devono essere conformi agli elaborati progettuali e tarate rispetto alla resistenza meccanica del calcestruzzo su cui si va ad operare.

La demolizione può essere completata con mezzi meccanici per piccole porzioni di materiale.

L'idrodemolizione deve portare alla luce lo strato di calcestruzzo di buona qualità ed omogeneità ed eliminare ogni altro elemento che possa alterare la coesione dei successivi trattamenti e deve essere spinta fino ai valori di rimozione non eccedenti quanto stabilito nei disegni progettuali (da intendersi come valor medio sulla superficie interessata dal trattamento, come di seguito meglio esposto).

In seguito alla scarifica o idroscarifica del calcestruzzo è fondamentale pulire le superfici da trattare, soprattutto se orizzontali, con l'idrolavaggio a 300-400 atm ed una portata d'acqua di almeno 150 l/min.

La superficie del calcestruzzo di supporto dovrà risultare macroscopicamente ruvida (asperità non inferiore a 5 mm di profondità) allo scopo di ottenere la massima aderenza tra il nuovo ed il vecchio materiale.

7. Applicazioni in opera di prodotti e sistemi

Aderenza

I requisiti di aderenza tra il vecchio calcestruzzo ed il calcestruzzo da ripristino devono essere specificati in accordo alla UNI EN 1504-3. Un profilo superficiale ruvido può essere ottenuto mediante idrodemolizione o con mezzi meccanici.

La tecnica dell'idrodemolizione garantisce usualmente una buona aderenza tra il supporto di calcestruzzo e il materiale di riparazione, evitando quindi la necessità di disporre collegamenti meccanici per il trasferimento delle sollecitazioni di trazione e di taglio minori di 0,4 MPa.

Qualora siano utilizzati prodotti e sistemi cementizi o polimerici di riparazione, si dovrebbe decidere se sia appropriato applicare un fondo ancorante. L'utilizzo di rivestimenti ancoranti può ridurre l'aderenza se lo stesso va in presa prima dell'applicazione dei prodotti successivi. Qualora invece non sia utilizzato un fondo ancorante, la superficie deve essere inumidita e non deve essere lasciata asciugare prima dell'applicazione dei prodotti e sistemi, allo scopo di impedire il trasferimento dell'acqua dal prodotto di riparazione al supporto, che influenzerebbe negativamente l'idratazione del prodotto di riparazione. **Tuttavia, la presenza di acqua all'interno delle cavità e porosità superficiali potrebbe**

ridurre l'aderenza. Un'indicazione è data dall'aspetto della superficie che dovrebbe essere scura e opaca, senza lucidità.

È necessario prevedere un'armatura di contrasto per spessori maggiori di 40 mm.

Calcestruzzi proiettati

Nel caso di utilizzo di calcestruzzi predosati tixotropici, il supporto di calcestruzzo deve essere adeguatamente preumidificato, in base alle sue condizioni e alla composizione dei prodotti e dei sistemi utilizzati.

Ai fini dell'ottenimento della resistenza richiesta e della protezione delle armature, i calcestruzzi predosati tixotropici devono essere applicati evitando la formazione di vuoti e materiale incoerente di rigetto.

Se l'intervento è di tipo strutturale, per evitare riduzioni di aderenza, sono da escludersi trattamenti della superficie del calcestruzzo. Nel caso in cui fosse richiesto un trattamento sul calcestruzzo proiettato strutturale, questo deve essere eseguito sullo strato finale che non è stato applicato umido su umido sul materiale strutturale.

L'applicazione a spruzzo del calcestruzzo dovrebbe essere effettuata con un'angolazione quanto più vicina possibile a 90 gradi rispetto al supporto, ed a una distanza compresa tra 0,5 m e 1,0 m fra l'ugello e il supporto.

Se il calcestruzzo è proiettato in uno spessore maggiore di 70 mm, può rendersi necessario incorporarvi un'armatura per impedire lo sviluppo di fessure da ritiro e favorire l'aderenza meccanica. In tal caso deve essere prestata particolare attenzione al fine di evitare la formazione di vuoti dietro l'armatura.

Calcestruzzi gettati

Nel caso di utilizzo di prodotti o sistemi cementizi senza l'applicazione di un promotore di adesione, il supporto di calcestruzzo deve essere accuratamente preumidificato. Al momento dell'applicazione però non deve essere presente acqua sulla superficie. Qualora si utilizzi un promotore di adesione, le condizioni del supporto devono essere adeguatamente specificate.

Il fissaggio della cassaforma al supporto di calcestruzzo deve avvenire il più presto possibile dopo la preparazione del supporto. Deve essere inoltre evitato l'ingresso di detriti o contaminanti.

Qualora si impieghi una modalità di compattazione del calcestruzzo tramite vibrazione, deve essere evitata l'inclusione di bolle d'aria, al fine di ottenere la resistenza richiesta, nonché proteggere l'armatura dalla corrosione. Se si impiega invece una modalità di compattazione per gravità, tramite getto di un calcestruzzo fluido, devono essere soddisfatti anche i requisiti seguenti: la cassaforma deve essere a tenuta d'acqua nei confronti del calcestruzzo esistente, priva di ostacoli al libero scorrimento del calcestruzzo e deve consentire la fuoriuscita dell'aria e dell'acqua di essudamento; il calcestruzzo deve essere introdotto nella cassaforma in modo tale che l'aria e l'acqua possano fuoriuscire. Strati di drenaggio sulle superfici della cassaforma impediscono la formazione di vuoti superficiali, riducendo il rapporto acqua-cemento dello strato superficiale.

Stagionatura

Un'adeguata stagionatura è necessaria qualora si utilizzino prodotti e sistemi di riparazione cementizi. A seconda della natura dei prodotti e dei sistemi, dello spessore della riparazione, e delle condizioni ambientali e della finitura superficiale del getto dovranno essere indicati il metodo ed il periodo della stagionatura. Deve essere evitato l'utilizzo di agenti di stagionatura qualora questi ultimi influiscano negativamente sui prodotti e sui sistemi applicati successivamente.

Al fine di evitare la fessurazione di origine termica, è importante che, durante l'idratazione e il processo di indurimento del calcestruzzo, il gradiente di temperatura in tutta la struttura sia il più debole possibile.

La corretta stagionatura dei prodotti o sistemi è fondamentale per garantire la buona aderenza di questi al supporto, la riduzione del quadro fessurativo e l'espansione dei sistemi per cui questa è prevista. Tutto ciò è alla base di un intervento durevole, pertanto è onere del progettista prescriverne le modalità e della direzione lavori di controllarne l'esecuzione.

Fessure e giunti

Si deve tenere conto della posizione e delle dimensioni delle fessure e dei giunti, di qualunque movimento del supporto e dell'effetto sulla stabilità, sulla durabilità e sulla funzione della struttura, nonché del rischio che si formino nuove fessure in seguito al trattamento.

Al fine di mantenere le prestazioni del giunto, deve essere garantita l'estensione dello stesso giunto attraverso il materiale di riparazione.

L'insorgere delle fessure deve essere limitato attraverso il posizionamento dei giunti e l'uso di agenti anti ritiro nella miscela, tuttavia il riempimento delle fessure può essere effettuato mediante iniezione, imbibizione o tecniche che utilizzano il vuoto. Prima del riempimento delle fessure, si deve procedere alla rimozione di qualunque agente contaminante, quale ad esempio olio. La quantità tollerabile di umidità o acqua nelle fessure dipende dalle proprietà del materiale di riempimento. La pulizia ed asciugatura delle fessure può essere eseguita con metodi che comprendono l'utilizzo di acqua e solventi e aria pulita sotto pressione. In caso di riempimento delle fessure per iniezione, è solitamente necessario sigillare le fessure per completare l'iniezione senza interruzioni.

8. Compiti del Direttore Lavori

Nel caso di interventi di ripristino o rinforzo di strutture in calcestruzzo effettuati con calcestruzzi da ripristino, **la figura del Direttore Lavori viene a rivestire un ruolo di estrema importanza poiché nella maggior parte degli interventi risultano assenti entrambi i momenti di collaudo statico e tecnico-amministrativo, a causa della loro classificazione come intervento locale e della natura degli importi a base di gara.**

Il Direttore Lavori rappresenta pertanto il garante dell'intero processo realizzativo dell'intervento di ripristino o rinforzo, dalla fase di accettazione in cantiere del materiale fino al controllo di qualità in sito. Onere del Direttore Lavori è compiere una serie di azioni che portino al controllo della corretta esecuzione dell'opera, compreso il controllo sui materiali.

I compiti essenziali ma non esaustivi del Direttore Lavori possono essere così individuati:

- Verifica delle proposte progettuali e della consistenza effettiva delle opere oggetto di intervento;
- Accettazione in cantiere del materiale;
- Controllo delle procedure di applicazione in opera del calcestruzzo da ripristino;

- Controllo delle prestazioni richieste dal progetto, in accordo con EN 1504, D.M. 14.01.2008 e UNI EN 206:2014.

Nel caso di impiego di calcestruzzo predosato e marcato CE il Direttore Lavori, in fase di accettazione, deve accertarsi del possesso della marcatura CE, **procedendo ad esplicita accettazione per iscritto.**

Il Direttore Lavori deve controllare il rispetto delle procedure di miscelazione e di applicazione del calcestruzzo da ripristino predosato riportate all'interno della scheda tecnica del prodotto.

In caso in cantiere si renda necessario adottare modalità di miscelazione o quantità diverse da quelle indicate nella scheda tecnica, precedentemente all'avvio dei lavori di protezione, riparazione o rinforzo di strutture in calcestruzzo deve essere eseguito un campo prova su una porzione della struttura, al fine di accertare le corrette modalità di applicazione del prodotto o sistema, tenuto conto anche delle specifiche condizioni ambientali e dell'effettiva preparazione del supporto. Successivamente all'esecuzione di prove riguardanti le proprietà del supporto, l'idoneità dei prodotti e dei sistemi, le loro modalità di applicazione e le proprietà finali dei prodotti e dei sistemi induriti e successivamente ad accettazione delle stesse, si potrà dar esecuzione ai lavori di riparazione o rinforzo, avendo cura di seguire le medesime procedure di applicazione del materiale.

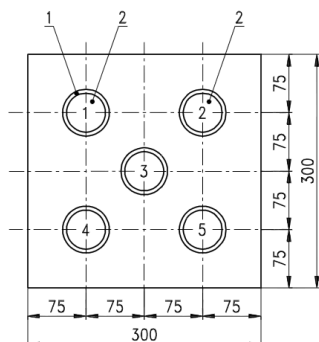
Nel caso di impiego di calcestruzzo preconfezionato, è onere del Direttore dei Lavori verificare la documentazione di accompagnamento di ciascuna fornitura e nel caso rifiutare le eventuali forniture provenienti da impianti non conformi. Prima dell'inizio della fornitura il Direttore dei Lavori dovrà ricevere copia della certificazione del controllo del processo di produzione.

Considerate le maggiori quantità di prodotto utilizzate nel caso di interventi di protezione, riparazione o rinforzo con calcestruzzo da ripristino rispetto a quelli effettuati con malte – causa maggiori spessori – **si suggerisce l'esecuzione di un campo prova su una porzione della struttura sia nel caso si utilizzino calcestruzzi premiscelati sia preconfezionati.**

Con riferimento all'ultimo punto, riguardante il controllo del sistema di ripristino o rinforzo, si sottolinea l'importanza e la necessità di eseguire prove per la verifica dei valori di adesione tra materiale di riparazione o rinforzo ed il supporto e dei valori di resistenza a compressione.

L'adesione tra il supporto ed il calcestruzzo da ripristino viene valutata attraverso prove di pull-off eseguite in conformità alla UNI EN 1542.

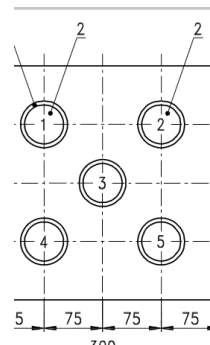
Dimensioni in mm



Pianta del campione riportante le posizioni dei tasselli

Legenda

- 1 Intaglio delimitante l'area di prova ottenuta mediante carotaggio
- 2 Tassello di acciaio o di alluminio avente diametro 50 mm



Pianta del campione riportante le posizioni dei tasselli

Legenda

- 1 Intaglio delimitante l'area di prova ottenuta mediante carotaggio
- 2 Tassello di acciaio o di alluminio avente diametro 50 mm

Dettagli prova di pull-off

Ai fini del controllo della resistenza a compressione del calcestruzzo da ripristino sono effettuate prove in conformità al Decreto Ministeriale 14.01.2008 e alla Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009. Nello specifico le prove possono essere effettuate su provini normalizzati di tipo cilindro, aventi diametro pari a 150 mm ed altezza 300 mm, oppure di tipo cubico di lato 150 mm.

Tali prove dovranno essere eseguite sempre, anche nel caso in cui l'intervento in esame sia classificabile come intervento locale. Le prove dovranno essere eseguite presso Laboratori Ufficiali ed i risultati dovranno costituire parte integrante della documentazione tecnica allegata al Conto Finale dei Lavori, come specificato nel Modulo di Accettazione, Applicazione in Opera e Controllo allegato al presente Quaderno Tecnico.

Nel caso in cui i risultati delle prove effettuate in sito non siano conformi ai valori indicati nella scheda di prodotto del materiale e nella Marcatura CE, il Direttore Lavori deve inoltrare segnalazione al Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

9. Compiti del Progettista ed indicazioni progettuali

Al fine di garantire una adeguata qualità ed efficacia dell'intervento di ripristino o rinforzo di una struttura in calcestruzzo, la fase progettuale riveste un ruolo di primaria importanza.

Il Progettista deve indicare correttamente in fase progettuale le caratteristiche del calcestruzzo da ripristino. La scelta del calcestruzzo da ripristino da utilizzarsi deve assicurare una corretta compatibilità con il supporto. Il progettista deve dare indicazioni riguardanti l'adesione con il substrato. In fase progettuale può farsi riferimento alla UNI EN 1992-1-1 *“Progettazione delle strutture di calcestruzzo Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici”*. Si evidenzia come in alcuni casi potrebbe risultare necessario inserire appositi connettori. La corretta adesione tra calcestruzzo da ripristino e supporto deve essere verificata mediante prove di pull-off, che devono essere prescritte in fase progettuale.

Al fine di evitare di indurre tensioni dovute a fenomeni di ritiro deve essere assicurata una idonea compatibilità con il supporto in termini di ritiro.

Il progettista deve espressamente specificare in sede progettuale il tipo di calcestruzzo da ripristino previsto, identificato a seguito di un attento esame di tutte le problematiche relative, quali ad esempio lavorabilità, tempi di presa, vibrazioni, lavori in pendenza, ecc.

Le caratteristiche del calcestruzzo da ripristino devono essere definite in accordo al Decreto Ministeriale 14.01.2008. Ad esempio, nel caso di intervento di ripristino del copriferro, il calcestruzzo deve avere resistenza non inferiore a quella del supporto.

L'impiego di calcestruzzi da ripristino per interventi di ripristino o rinforzo di strutture in calcestruzzo è consigliato per spessori maggiori di 4 cm.

Per interventi di ripristino o rinforzo caratterizzati da spessori minori di 4 cm dovranno essere previsti interventi con malte da ripristino, oggetto del Quaderno Tecnico n. 9 *“Malte da ripristino”*. Solamente nel caso di interventi di ripristino localizzato e nell'impossibilità di eseguire interventi globali di risanamento, si potranno utilizzare malte da ripristino per spessori maggiori di 4 cm.

Particolare attenzione deve essere posta nella definizione del diametro massimo dell'inerte, da effettuarsi in relazione allo spessore dello strato di calcestruzzo da ripristino ed alla adesione con il supporto.

10. Calcestruzzi fibrorinforzati

I calcestruzzi fibrorinforzati sono materiali compositi caratterizzati da una matrice cementizia e da fibre discrete. La matrice può essere costituita da calcestruzzi o da malte, normali oppure ad alte prestazioni. Le fibre possono essere di acciaio, di materiale polimerico – acrilico, arammide, nylon, poliestere, polietilene e propilene –, di carbonio, di vetro o di materiale naturale. Le fibre sono caratterizzate in base al tipo di materiale e altri parametri geometrici quali la lunghezza, il diametro equivalente, il rapporto d'aspetto e la forma (fibre lisce, uncinate, ecc.). Le fibre devono essere marcate secondo la EN 14889:2006.

L'aggiunta di fibre disperse in una matrice cementizia ne modifica le proprietà meccaniche. Le proprietà del composito dipendono dalle caratteristiche dei materiali componenti e dai loro dosaggi ed in particolare dalla geometria, dalla percentuale volumetrica e dalle caratteristiche meccaniche della fibra, dall'aderenza tra la fibra e la matrice di calcestruzzo, dalle caratteristiche meccaniche della matrice. Le fibre possono contribuire a migliorare il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure e/o incrementare l'energia assorbita nel processo di frattura (tenacità). Una volta raggiunta la fessurazione della matrice, le fibre sono in grado di manifestare il proprio contributo, conferendo al composito una resistenza post-fessurazione assente nella matrice senza fibre.

Come indicato al paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, l'utilizzo di calcestruzzi fibrorinforzati richiede il possesso, da parte del Produttore, del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego, rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sulla base di Linee Guida approvate dallo stesso Consiglio Superiore. **Il Direttore Lavori dovrà pertanto accertarsi del possesso e del regime di validità del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.** Attualmente sono in fase di redazione le Linee Guida per l'ottenimento del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego, che daranno indicazioni anche sulle prove da eseguirsi in cantiere.

Si sottolinea che potranno essere utilizzati calcestruzzi fibrorinforzati preconfezionati e premiscelati, se e solo se in possesso del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

Per quanto concerne la fase di progettazione si può fare riferimento alla CNR-DT 204/2006 e al Fib Model Code for Concrete Structures 2010.

Bibliografia

- [1] Decreto Ministeriale 14.01.2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008
- [2] Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 “Istruzioni per l’Applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008”, Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009
- [3] UNI EN 206-1:2006 “Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità”
- [4] UNI EN 1504-1:2005 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 1: Definizioni”
- [5] UNI EN 1504-3:2006 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 3: Riparazione strutturale e non strutturale”
- [6] UNI EN 1504-9:2008 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 9: Principi generali per l’uso dei prodotti e dei sistemi”
- [7] UNI EN 1504-10:2005 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 10: Applicazione in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori”
- [8] EN 12190 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova – Determinazione della resistenza a compressione delle malte da riparazione”
- [9] UNI EN 1542 “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo. Metodi di prova. Misurazione dell’aderenza per trazione diretta.”
- [10] UNI EN 1992-1-1 “*Progettazione delle strutture di calcestruzzo Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici*”.
- [11] CNR-DT 204/2006 “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato”
- [12] Fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013

[illegible]



QUADERNO TECNICO N. 11

TESSUTI IN FRP

1. Introduzione

Nel caso di interventi locali derivanti da lavori di manutenzione straordinaria, è spesso necessario ripristinare un'adeguata capacità portante della struttura, senza apportare significative variazioni in termini di massa e rigidità. In questi casi specifici, una efficace tecnica di intervento è rappresentata dall'utilizzo di materiali compositi costituiti da matrici polimeriche e da fibre in diversi materiali, comunemente denominati FRP, acronimo di Fiber Reinforced Polymers. I materiali più comunemente impiegati per le fibre sono il carbonio, il vetro e l'arammide. A seconda del materiale, il composito viene quindi denominato rispettivamente CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer, GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer e AFRP – Aramid Fiber Reinforced Polymer.

Nella Tabella 1 sono riassunte le principali proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni.

Tabella 1: Proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni

	Modulo di elasticità normale	Resistenza a trazione	Deformazione a rottura	Coefficiente di dilatazione termica	Densità
	[GPa]	[MPa]	[%]	[10⁻⁶ °C⁻¹]	[g/cm³]
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

L'utilizzo di compositi per il rinforzo strutturale presenta vantaggi rispetto a tecniche tradizionali nei casi in cui sia richiesta un'adeguata reversibilità dell'intervento, oltre che una minimizzazione dell'impatto estetico sulla struttura originaria, ovvero nei casi in cui il ricorso ad altre tecniche sia reso difficoltoso dalla limitatezza dello spazio a disposizione.

I compositi in FRP sono distinti a seconda della loro geometria in lamine pultruse e tessuti. Le prime sono caratterizzate da una disposizione unidirezionale delle fibre e sono utilizzate preferibilmente per il placcaggio di superfici regolari. I secondi sono generalmente bidirezionali e facilmente adattabili alla forma dell'elemento strutturale da rinforzare.

Oggetto del presente documento sarà esclusivamente l'utilizzo di tessuti in FRP, rimandando per quanto riguarda l'utilizzo di lamine pultruse in FRP al Quaderno Tecnico n. 12 *“Lamine in FRP e barre di materiale composito fibrorinforzato”*.

Nel presente Quaderno Tecnico si farà riferimento al Decreto Ministeriale 14.01.2008 *“Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”*, Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 e relativa Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 *“Istruzioni per l'Applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008”*, Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009. L'utilizzo di detti materiali deve essere inoltre fatto seguendo le indicazioni della CNR-DT 200 R1/2013 *“Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati”*. Ai fini dell'identificazione e del controllo di accettazione si farà riferimento alla *“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”*, emanata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Servizio Tecnico Centrale e approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015.

2. Classificazione dei sistemi di rinforzo in FRP

Un materiale FRP è caratterizzato a seconda della:

- geometria, ovvero forma e dimensioni;
- disposizione e orientazione delle fibre rispetto agli assi di simmetria del materiale; nel caso in cui questa sia casuale, il composito ha caratteristiche simili a quelle di un materiale isotropo, viceversa è anisotropo;
- concentrazione, ovvero frazione in volume.

Le fibre più comunemente impiegate per la produzione di materiali compositi FRP, sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche. La loro geometria filiforme conferisce a tali materiali caratteristiche di rigidità e resistenza maggiori di quelle possedute dagli stessi materiali quando siano utilizzati in configurazione tridimensionale, a causa della minore densità di difetti.

Le fibre sono disponibili in commercio in varie forme, tra cui:

- filamento (monofilament), con dimensioni di circa 10 μm di diametro;
- cavo di filatura (tow), fascio costituito da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), praticamente senza torsione;
- filo o filato (spun yarn), filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- filo assemblato (roving), fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

Le matrici più comunemente impiegate nei sistemi di rinforzo in FRP sono di tipo polimerico, a base di resine termoindurenti. Tali resine, disponibili in forma parzialmente polimerizzata, si presentano a temperatura ambiente allo stato liquido o pastoso. Tramite una reazione per miscelazione con un opportuno reagente, esse polimerizzano o reticolano, passando allo stato solido vetroso.

I loro principali vantaggi consistono in:

- bassa viscosità allo stato fluido;
- buona 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.

Gli svantaggi principali sono invece rappresentati da:

- ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa;
- comportamento fragile;
- sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più comunemente utilizzate per uso strutturale sono quelle epossidiche, ma sono anche impiegate resine poliestere o vinilestere.

I sistemi di rinforzo in materiale composito FRP possono essere classificati da un punto di vista morfologico in:

- 1) **sistemi preformati**, costituiti da elementi di varia forma – lamine, nastri, barre o altro – prodotti in stabilimento mediante processo di pultrusione o altri processi produttivi di comprovata validità tecnologica, e successivamente incollati in cantiere all'elemento strutturale da rinforzare;
- 2) **sistemi impregnati in situ**, costituiti da fogli o tessuti di fibre uni o multi-direzionali, impregnati in situ con resina polimerica che può avere anche la funzione di adesivo con il substrato;

Nel presente Quaderno Tecnico si farà riferimento esclusivamente ai sistemi impregnati in situ. Come già specificato, l'utilizzo di sistemi preformati sarà oggetto del Quaderno Tecnico n. 12 *“Lamine in FRP e barre di materiale composito fibrorinforzato”*.

Come specificato dalla *“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”*, i suddetti sistemi di rinforzo in FRP possono essere classificati da un punto di vista meccanico in base ai valori del modulo elastico e della tensione di rottura, valutati in regime di trazione uniassiale nella direzione delle fibre. Per quanto concerne i sistemi impregnati in situ, le suddette caratteristiche meccaniche devono essere riferite, all'area delle sole fibre secche all'interno della sezione retta del rinforzo, al netto della resina di impregnatura. Tali valori devono risultare inoltre opportunamente stabili nei confronti del degrado indotto sul composito FRP da azioni ambientali.

Con riferimento a sistemi di rinforzo realizzati in situ, costituiti da uno specifico tessuto ed una specifica resina, le due fasi devono essere entrambe commercializzate da uno stesso *“Fornitore”*. Per questi deve farsi riferimento esclusivamente al lotto di spedizione, inteso come l'insieme di una specifica resina e di uno specifico tessuto, consegnati in cantiere al fine della realizzazione di uno specifico composito.

A seconda della natura della fibra e dei valori nominali del modulo elastico e della tensione di rottura a trazione, valutati nella direzione delle fibre, i sistemi di rinforzo sono riconducibili alle classi mostrate in Tabella 2. L'appartenenza alla corrispondente classe è legittimata dalla condizione che i valori misurati di tali parametri siano maggiori o uguali a quelli nominali, indicati nella tabella.

Se in fase di qualificazione, i valori del modulo elastico e della resistenza a trazione del materiale composito ricadono in classi differenti, ai fini della classificazione si farà riferimento alla classe avente le caratteristiche nominali inferiori.

Nel caso di tessuti pluriassiali, nei quali le fibre sono disposte lungo più direzioni, i valori indicati nella Tabella si intendono riferiti alla direzione di prevalente interesse.

Tabella 2: Classificazione dei sistemi impregnati in situ

Classe	Fibra	Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre [GPa]	Resistenza a trazione nella direzione delle fibre [MPa]
60G	Vetro	60	1300
210C	Carbonio	210	2700
350/1750C	Carbonio	350	1750
350/2800C	Carbonio	350	2800
500C	Carbonio	500	2000
100A	Arammide	100	2200

3. Proprietà meccaniche dei sistemi di rinforzo in FRP impregnati in situ

Come detto precedentemente, il materiale composito è costituito da matrici polimeriche e da fibre in diversi materiali. Le fibre assolvono la funzione di elementi portanti, sia in termini di resistenza sia di rigidità. La matrice ha invece un duplice compito di protezione delle fibre e di trasferimento degli sforzi tra fibra e fibra e tra queste ultime e l'elemento strutturale da rinforzare. Generalmente le fibre sono caratterizzate da resistenza e rigidità elevate, nonché da valori della deformazione a rottura inferiori a quelli della matrice.

In Figura 1 sono mostrati in modo qualitativo i legami costitutivi delle fibre, della matrice e del corrispondente materiale composito unidirezionale. Come si può vedere, il composito è caratterizzato da una rigidità inferiore a quella delle sole fibre e dalla medesima deformazione a rottura delle stesse, $\varepsilon_{fib,max}$. Il trasferimento degli sforzi dalla matrice alle fibre non può infatti più avvenire al superamento di tale valore di deformazione.

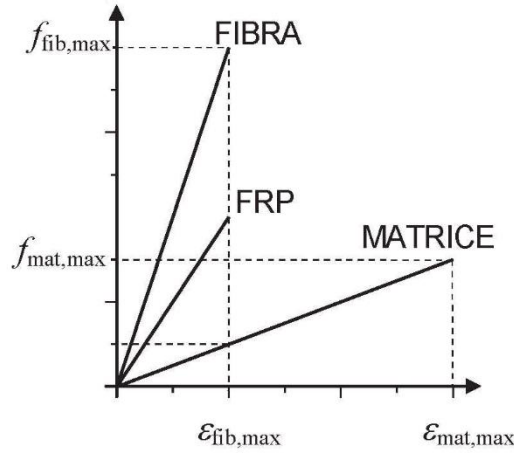


Figura 1: Sovrapposizione leggi costitutive composito e sue fasi costituenti

Al fine della valutazione del modulo elastico e della resistenza in una specifica direzione, il sistema di rinforzo impregnato in situ è assimilato ad un composito equivalente costituito dal solo tessuto secco, riferendosi pertanto alla sola area della sezione retta di tessuto secco A_{fib} , disposta nella suddetta direzione. Tale modalità di calcolo risulta essere efficace a causa della difficoltà di quantificare le frazioni volumetriche delle due fasi costituenti, a causa dell'incertezza sull'effettiva quantità di resina messa in opera manualmente in cantiere.

Per quanto concerne la determinazione dell'area resistente del tessuto A_{fib} si deve fare riferimento alla Scheda Tecnica del tessuto utilizzato.

Le proprietà meccaniche del composito impregnato in situ, in termini di resistenza a trazione f_f e modulo elastico a trazione E_f nella direzione delle fibre, sono valutate come:

$$f_f = F_{fu} / A_{fib} \quad (1)$$

$$E_f = F_{fu} / (A_{fib} \cdot \varepsilon_{fu}) \quad (2)$$

in cui F_{fu} e ε_{fu} sono rispettivamente la forza e la deformazione ultima, determinate sperimentalmente.

Ai fini applicativi, può risultare conveniente riferire l'area resistente del tessuto allo spessore di una lastra equivalente costituita dal solo materiale delle fibre, avente spessore t_f pari a:

$$t_f = A_{fib} / b_f \quad (3)$$

4. Qualificazione dei sistemi di rinforzo in FRP

Come indicato al paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, tutti i materiali e prodotti per uso strutturale devono essere identificati univocamente a cura del produttore, qualificati sotto la responsabilità dello stesso ed accettati dal Direttore dei Lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione.

Nel caso in cui i materiali e prodotti da costruzione per uso strutturale non siano marcati CE o non siano provvisti di Benestare Tecnico Europeo, devono essere in possesso di un Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego, rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale, sulla base di Linee Guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il Direttore Lavori dovrà pertanto accertarsi del possesso e del regime di validità del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

Le procedure per l'identificazione, la qualificazione e l'accettazione dei sistemi di rinforzo FRP sono descritte nella Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale *“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”*, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015.

Al fine della qualificazione dei sistemi di rinforzo in FRP impregnati in situ, sono richieste una qualificazione del Fornitore ed una qualificazione iniziale dei sistemi di rinforzo realizzabili con le fasi – resina e fibre – commercializzate da quest'ultimo, basate su prove di tipo meccanico e di accertamento della durabilità ambientale.

Ai sensi del paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, i Fornitori devono richiedere il Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego al Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, allegando:

- elenco e caratteristiche del sistema di rinforzo da qualificare, con l'indicazione della composizione in termini di fibre e resine;
- copia della certificazione del sistema di gestione della qualità;
- modalità di marcatura che si intende adottare per l'identificazione del sistema di rinforzo;
- indicazione delle fonti di approvvigionamento delle fasi;

- dichiarazione, resa dai produttori delle fasi – fibre e resine – circa le caratteristiche prestazionali delle fasi stesse;
- copia del Manuale di qualità aziendale, coerente alla norma UNI EN 9001;
- copia del Manuale di preparazione dei prodotti del sistema di rinforzo, contenente le istruzioni operative per la corretta realizzazione del prodotto fibrorinforzato;
- copia del Manuale di installazione dei prodotti del sistema di rinforzo, contenente le istruzioni operative per la corretta applicazione del sistema di rinforzo;
- indicazione del Laboratorio incaricato per l'esecuzione delle prove di qualificazione del sistema di rinforzo;
- eventuali certificazioni relative ai sistemi di rinforzo già rilasciate.

Successivamente il Servizio Tecnico Centrale provvede a verificare la completezza e congruità della documentazione presentata, nonché l'idoneità del Laboratorio incaricato. In caso di esito positivo, si procede con l'esecuzione delle prove di qualificazione a cura del Laboratorio incaricato dal Fornitore. I risultati delle suddette prove sono trasmessi al Servizio Tecnico Centrale che può esprimere un giudizio di conformità negativo o positivo. Nel primo caso il Fornitore, una volta individuate le cause delle non conformità, può apportare le opportune azioni correttive, dandone comunicazione al Servizio Tecnico Centrale ed al Laboratorio incaricato e successivamente ripetere le prove di qualificazione. Nel secondo caso il Servizio Tecnico Centrale, sentita la competente Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, provvede a rilasciare al Fornitore il CIT. Il prodotto può essere impiegato solo dopo il rilascio del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego. Quest'ultimo ha validità di 5 anni dalla data di rilascio e può essere rinnovato.

L'uso strutturale del sistema di rinforzo in FRP può avvenire solo ed esclusivamente dopo il rilascio del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego: tutti i prodotti forniti in cantiere devono essere accompagnati da copia del certificato, da cui deve risultare con chiarezza il logo o il marchio del Fornitore. La validità dello stesso è subordinata al permanere delle condizioni di produzione in fabbrica e delle procedure interne di controllo. Il verificarsi, nell'anno, di prove negative relativamente alle proprietà meccaniche del prodotto, documentate dal

controllo continuo di fabbrica o da prove di accettazione in cantiere dovrà essere valutato dal Servizio Tecnico Centrale, giungendo nei casi più gravi alla revoca del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

Per quanto riguarda le prove di qualificazione di tipo meccanico e per l'accertamento della durabilità ambientale si rimanda ai paragrafi 5.2.3 e 5.2.4 della Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale "Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti", approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015.

Tutti i prodotti devono essere accompagnati da una Scheda Tecnica con indicazione di:

- resistenza e reazione al fuoco del prodotto;
- temperatura di transizione vetrosa;
- comportamento del prodotto nei confronti della temperatura, specificando l'intervallo all'interno del quale sono garantite le sue caratteristiche prestazionali;
- condizioni di impiego;
- informazioni relative a ulteriori caratteristiche prestazionali;

Specifiche prove di resistenza al fuoco devono essere eseguite nel caso in cui l'ambito di utilizzo le richieda. Un esempio di Scheda Tecnica per sistemi di rinforzo impregnati in situ è contenuta nell'Allegato B della Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015, e riportata in Appendice al presente Quaderno Tecnico.

5. Compiti del progettista

Durante la fase progettuale, particolare attenzione deve essere prestata alla individuazione, eliminazione o attenuazione dei rischi che potrebbero interessare la struttura. La configurazione del sistema di rinforzo deve essere tale da assicurare una sensibilità minima nei confronti dei suddetti rischi e deve essere in grado di sopportare eventuali danneggiamenti localizzati. Il sistema di rinforzo deve inoltre eliminare o posticipare fenomeni di collasso fragile preesistenti.

Requisiti fondamentali del sistema di rinforzo sono:

- reale efficacia dell'intervento;
- durabilità;
- reversibilità;
- compatibilità fisico-chimica e meccanica dei materiali di rinforzo con quelli delle strutture rinforzate;
- soddisfacimento dei requisiti di esercizio;
- soddisfacimento dei requisiti di resistenza al collasso.

Il sistema di rinforzo deve inoltre presentare una resistenza nei confronti di scenari di incendio, adeguata al tempo di esposizione che si vuole garantire.

Al sistema di rinforzo composito in FRP possono essere affidati esclusivamente sforzi di trazione. Pertanto, tali sistemi di rinforzo non devono essere posizionati in zone in cui è necessario resistere a sforzi di compressione.

Il Progettista deve indicare chiaramente nel progetto la classe del sistema di rinforzo previsto, conformemente alle indicazioni riportate nella Tabella 2. In particolare deve fare riferimento ai valori nominali minimi della resistenza a trazione e del modulo elastico, entrambi valutati nella direzione delle fibre.

Il Progettista deve definire la temperatura di esercizio e le temperature limite, minima e massima, di utilizzo del sistema di rinforzo. I suddetti valori devono essere indicati sia nella Relazione Progettuale sia negli Elaborati Grafici di Progetto. I valori della temperatura di esercizio devono comunque rispettare i limiti indicati al paragrafo 11.9 del Decreto Ministeriale 14.01.2008. In particolare il campo di temperatura di riferimento per la valutazione delle variazioni è $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \div +45\text{ }^{\circ}\text{C}$. In relazione alla collocazione geografica dell'opera, in caso possano essere attese temperature superiori a $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ o inferiori a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, il Progettista può fissare un intervallo di temperature più ampio.

In base all'importanza e all'entità dell'applicazione, può suggerire al Direttore dei Lavori l'esecuzione di eventuali prove di qualità dell'installazione nei confronti del distacco dal supporto.

Al fine di assicurare la durabilità dell'efficacia dell'intervento di rinforzo nel corso della vita utile della struttura rinforzata, anche in relazione al degrado atteso, particolare attenzione deve essere prestata a:

- destinazione d'uso della struttura rinforzata;

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

In fase progettuale, si può assumere una vita utile della struttura rinforzata identica a quella dell'analoga struttura di nuova realizzazione. Di conseguenza, per quanto concerne il calcolo dei coefficienti parziali da adottare per le azioni di calcolo, devono essere impiegati gli stessi di quelli previsti dalla Normativa vigente per le nuove costruzioni.

Per il calcolo degli interventi di rinforzo di strutture in c.a. ed in c.a.p. mediante l'utilizzo di tessuti di materiale FRP occorre fare riferimento alla Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015 ed alla CNR-DT 200 R1/2013. L'impiego di tali sistemi si dimostra efficace ai fini dell'incremento della resistenza ultima di elementi in calcestruzzo, nei confronti di meccanismi di collasso per flessione e per taglio. Il rinforzo a flessione viene utilizzato nel caso in cui il momento flettente di progetto superi la corrispondente resistenza dell'elemento strutturale e si realizza applicando, al lembo teso dell'elemento da rinforzare, uno o più strati di tessuto impregnati in situ. Il rinforzo a taglio viene utilizzato nel caso in cui il taglio di calcolo sia superiore alla resistenza di calcolo e viene realizzato applicando in aderenza, sulla superficie esterna, uno o più strati di tessuto, in adiacenza oppure in modo discontinuo.

Nelle verifiche di sicurezza, l'aderenza tra composito e substrato assume particolare importanza, poiché connessa al meccanismo di rottura fragile per distacco dal supporto. In accordo al criterio di gerarchia delle resistenze, il verificarsi di meccanismi di collasso per flessione e taglio non deve essere, in qualsiasi caso, preceduto da meccanismi di crisi per perdita di aderenza.

Quest'ultima può verificarsi nell'adesivo, nel substrato, nel contatto tra substrato ed adesivo oppure nel rinforzo in FRP, ad esempio all'interfaccia tra strati sovrapposti.

Le modalità più comuni di rottura per distacco dal supporto, illustrate in Figura 2, consistono in:

- Distacco di estremità;
- Distacco intermedio, a causa della presenza di fessure dovute alla flessione;
- Distacco a causa dalla presenza di fessure dovute al taglio;
- Distacco a causa di irregolarità della superficie del substrato.

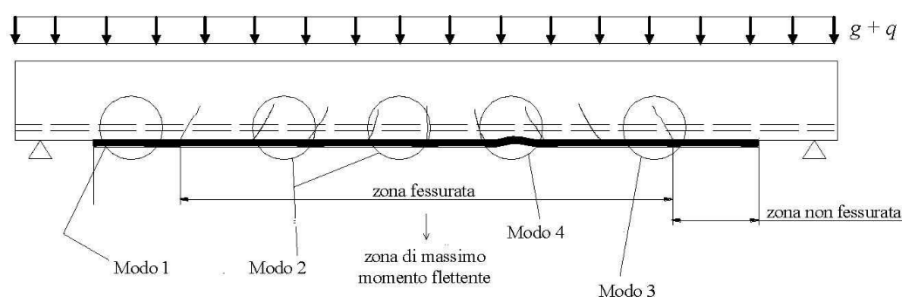


Figura 2: Modalità di rottura per distacco dal supporto [3]

6. Problemi speciali di progetto

Nel seguente paragrafo sono esaminati e discussi una serie di aspetti che possono influenzare la durabilità, il comportamento e l'efficacia del sistema di rinforzo in FRP e che pertanto devono essere adeguatamente tenuti in considerazione durante l'intera fase progettuale. In particolare, le proprietà meccaniche di materiali FRP presentano un degrado per effetto di azioni ambientali o per effetto della modalità di carico. Nella tabella seguente sono riassunte schematicamente le principali problematiche di progetto.

Tabella 3: Problemi speciali di progetto

Gruppo di azioni	Azione
Ambientali	Ambiente alcalino
	Umidità
	Temperatura estrema e cicli termici
	Cicli di gelo e disgelo
	Radiazioni ultraviolette (UV)
Modalità di carico	Viscosità e rilassamento
	Fatica

6.1. Ambiente alcalino

L'ambiente alcalino che caratterizza la soluzione acquosa contenuta nei pori del calcestruzzo può, in alcuni casi, determinare fenomeni di degrado della resina e/o delle zone di interfaccia. Gli effetti provocati dall'ambiente alcalino si differenziano a seconda della tipologia di resina impiegata. Generalmente le resine epossidiche sono caratterizzate da una migliore resistenza all'ambiente alcalino, rispetto alle resine poliestere. Rispetto a queste ultime sono pertanto da preferire resine più resistenti, come ad esempio quelle di vinilestere.

Il danneggiamento della resina o delle fibre per effetto dell'azione di alcali deve essere sempre adeguatamente tenuto in considerazione. Al fine di ridurre il rischio di degrado del materiale composito, è opportuno che il processo di reticolazione della resina sia completato prima che si manifesti l'esposizione ad ambienti alcalini.

6.2. Umidità

L'umidità è un'azione di tipo ambientale che deve essere presa attentamente in considerazione, in quanto può indurre un degrado del composito in FRP, andando ad interessare principalmente la resina. L'assorbimento di umidità dipende da differenti fattori, tra cui la tipologia di resina, la composizione e la qualità del sistema di rinforzo, lo spessore, le condizioni di maturazione, l'interfaccia resina-fibra e le condizioni di lavorazione.

Tra i principali effetti di degrado dovuti alla presenza di umidità possono essere annoverati:

- plasticizzazione della resina;
- riduzione della temperatura di transizione vetrosa;
- riduzione di resistenza del sistema di rinforzo;
- riduzione della rigidità del sistema di rinforzo.

6.3. Temperatura estrema e cicli termici

I materiali FRP realizzati con matrici polimeriche sono particolarmente sensibili all'azione della temperatura. Temperature estreme e/o cicli termici possono influire sul comportamento del sistema di rinforzo FRP, influenzandone la risposta viscosa della resina. In particolare, il modulo di elasticità normale della resina diminuisce all'aumentare della temperatura, causando un drastico decremento di resistenza e rigidità. L'efficienza e le prestazioni del sistema di rinforzo diminuiscono significativamente nel caso in cui la temperatura superi il valore della temperatura di transizione vetrosa della resina.

Generalmente l'effetto di cicli termici non è tale da produrre variazioni significative ma potrebbe indurre la formazione di microfratture.

Per tali motivi, il sistema di rinforzo deve essere adeguatamente progettato e realizzato, in modo che la temperatura di esercizio sia sempre inferiore alla temperatura di transizione vetrosa. I valori delle temperature di esercizio e di applicazione sono indicate nel Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

Tali fenomeni sono accentuati dall'esposizione alle alte temperature, come ad esempio quelle che possono prodursi in caso di incendio. Un ulteriore effetto dell'azione di alte temperature consiste nella diminuzione dell'aderenza tra il sistema di rinforzo ed il supporto, con conseguente distacco del composito dal substrato e perdita di efficacia dell'intervento stesso di rinforzo. In tali casi, è pertanto necessario adottare rivestimenti protettivi di spessore adeguato, al fine di garantire un mantenimento migliore delle proprietà meccaniche dei materiali FRP applicati esternamente agli elementi rinforzati.

6.4. Cicli di gelo e disgelo

L'esposizione a cicli di gelo e disgelo può causare un decadimento delle prestazioni del sistema di rinforzo, provocando il danneggiamento della resina e

dell'interfaccia tra fibre e resina, a causa del verificarsi di distacchi. Generalmente, non si registrano effetti deleteri nei confronti delle fibre.

L'umidità può essere responsabile di un'amplificazione del degrado prodotto da cicli di gelo e disgelo, in quanto la natura ciclica di tale azione può favorire la crescita e la propagazione delle microfratture provocate dalla presenza di soluzioni saline in ambiente umido.

6.5. Radiazioni ultraviolette (UV)

Generalmente, le radiazioni ultraviolette (UV) non provocano degrado delle prestazioni meccaniche dei sistemi di rinforzo con materiali FRP. In alcuni casi, possono però verificarsi fenomeni di fragilizzazioni ed erosioni superficiali della resina.

Effetti negativi, quali la penetrazione di umidità e di altri agenti aggressivi attraverso la superficie danneggiata, possono però essere connessi alla presenza di radiazioni ultraviolette. Pertanto, è opportuno proteggere il sistema di rinforzo dall'azione di radiazioni ultraviolette, ad esempio mediante la predisposizione di idonei rivestimenti oppure attraverso l'aggiunta di additivi appropriati nella resina.

6.6. Viscosità e rilassamento

Le prestazioni del sistema di rinforzo in FRP possono essere influenzate da azioni legate alla modalità di carico, come ad esempio i fenomeni di viscosità e di rilassamento. In particolare, la resistenza e la deformazione a lungo termine del sistema di rinforzo in FRP dipendono dalle proprietà della resina e delle fibre. In genere le resine termoindurenti sono meno viscosi di quelle termoplastiche.

Inoltre, la viscosità delle resine è strettamente dipendente dalla presenza delle fibre: tali fenomeni risultano infatti più pronunciati nel caso di carichi applicati in direzione trasversale 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 opportunamente ridotta in fase progettuale, limitando le tensioni di esercizio nel composito.

6.7. Fatica

Generalmente non si riscontra un decadimento delle prestazioni dei materiali FRP a causa di fenomeni di fatica, poiché la presenza delle fibre contrasta in modo efficace la formazione di fessure, ostacolandone la propagazione.

6.8. Fattori di conversione ambientale e per effetti di lunga durata

Al fine di evitare l'insorgere di fenomeni di danneggiamento e di decadimento delle prestazioni del sistema di rinforzo in FRP, a causa delle azioni descritte nei paragrafi precedenti, il Progettista, in accordo ai paragrafi 3.5.1 e 3.5.2 della CNR-DT 200 R1/2013, può ridurre il valore di progetto, attraverso l'adozione di un fattore di conversione ambientale η_a e/o di un fattore di conversione per effetti di lunga durata η_l , rispettivamente per i casi di azioni di tipo ambientale o legate alla modalità di carico.

Tabella 4: Fattori di conversione ambientale

Condizione di esposizione	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

Tabella 5: Fattori di conversione per effetti di lunga durata

Modalità di carico	Fibra	Resina	η_a
Carico di lungo termine	Vetro	Epossidica	0.30
	Arammidica	Epossidica	0.50
	Carbonio	Epossidica	0.80
Ciclico	Tutte		0.50

Nel caso in cui sia previsto l'utilizzo di rivestimenti protettivi di comprovata affidabilità, per l'intero periodo di vita utile del sistema di rinforzo in FRP, i valori del fattore di conversione ambientale riportati in Tabella 4 possono essere incrementati del 10% e comunque non devono essere superiori al valore unitario.

6.9. Atti vandalici

La resistenza e l'efficienza del sistema di rinforzo possono essere influenzate da azioni provocate da atti vandalici, in quanto i materiali FRP mostrano una sensibilità particolare nei confronti, ad esempio, di incisioni e/o lacerazioni prodotte da strumenti di taglio.

Al fine di evitare tali problematiche, si suggerisce di adottare idonee misure di protezione del sistema di rinforzo in FRP nei confronti di eventi vandalici, soprattutto in caso di applicazione su elementi strutturali posizionati in aree accessibili. La sicurezza di tali elementi strutturali, nell'ipotesi di assenza del

sistema di rinforzo per atto vandalico, deve essere verificata allo stato limite ultimo, considerando la combinazione di azioni quasi permanente ed i valori dei coefficienti parziali dei materiali per situazioni eccezionali.

7. Applicazione in opera del sistema di rinforzo

Considerata la natura particolare degli interventi di rinforzo in oggetto, le Imprese Appaltatrici e gli Applicatori devono possedere specifiche e comprovate competenze nell'applicazione dei materiali compositi su strutture di calcestruzzo e di muratura, da documentare attraverso precedenti esperienze. In particolare, deve essere dimostrata un adeguato livello di capacità, abilità ed esperienza del personale preposto all'installazione, nei riguardi dell'applicazione di sistemi di rinforzo FRP a scopo strutturale. Durante l'esecuzione dell'intervento devono essere garantiti un'adeguata supervisione ed un idoneo controllo di qualità.

Le Imprese Appaltatrici e gli Applicatori devono altresì verificare la conformità dei prodotti alle prescrizioni indicate dal Progettista. In caso di indisponibilità di materiali con i requisiti indicati in fase di progettazione, le stesse devono concordare possibili alternative con il Progettista e/o con il Direttore dei Lavori. Al fine di garantire l'inalterabilità delle proprietà fisico-chimiche dei materiali che costituiscono il sistema di rinforzo, particolare attenzione deve essere prestata alle modalità di trasporto, stoccaggio, conservazione, movimentazione ed utilizzo degli stessi.

In particolare, generalmente, si consiglia di conservare fibre e resine in ambiente con temperatura compresa tra i 10 °C e i 24 °C, e grado di umidità inferiore al 20%, per evitare modifiche della reattività della miscela e delle proprietà della resina. Nella Scheda Tecnica del sistema di rinforzo è altresì indicato il tempo di stoccaggio, entro il quale il prodotto può essere impiegato per l'uso. È assolutamente da escludersi l'utilizzo di un costituente oltre il tempo di stoccaggio, oppure nei casi di deterioramento o contaminazione dello stesso.

Un apposito Manuale di Installazione è allegato dal Fornitore alla documentazione di accompagnamento di ogni lotto di spedizione. All'interno di tale documento sono fornite le istruzioni operative, al fine di una corretta applicazione del sistema di rinforzo in FRP, con particolare riguardo ai trattamenti da effettuare sul supporto prima dell'installazione.

Il punto di partenza del processo di esecuzione del sistema di rinforzo è rappresentato dal controllo delle condizioni del substrato e dall'adozione di misure atte alla eliminazione del deterioramento, con eventuale rimozione e ricostruzione delle porzioni ammalorate. Il Progettista ed il Direttore dei Lavori devono verificare le caratteristiche del substrato e valutarne lo stato di deterioramento, prima dell'applicazione del rinforzo. Il valore medio della resistenza a compressione del calcestruzzo deve essere necessariamente superiore a 15 MPa. In caso di danneggiamento del substrato per cause di natura fisico-chimica, fisico-meccanica, deve essere prevista la rimozione dell'intera porzione interessata.

Se le barre di armatura sono interessate da fenomeni di corrosione, è necessario adottare idonei provvedimenti atti all'eliminazione delle cause del deterioramento del supporto, prima di procedere alla ricostruzione delle parti di calcestruzzo rimosse. In tal caso, è necessario rimuovere lo strato deteriorato mediante spazzolatura o sabbiatura e poi trattare la superficie con idonei inibitori di corrosione.

Successivamente alla rimozione di tutte le cause di degrado, si può procedere alla ricostruzione delle porzioni danneggiate e rimosse, mediante l'uso di betoncini reoplastici. Eventuali asperità superficiali superiori a 10 mm possono essere sottoposte a livellamento, ad esempio con stucco epossidico compatibile. In caso di profondità maggiori di 20 mm, è opportuno l'utilizzo di idonei materiali di apporto. Infine, si raccomanda di sigillare eventuali fessure di ampiezza superiore a 0.5 mm mediante iniezione, prima dell'applicazione del rinforzo.

Potrebbe inoltre essere opportuno ricorrere a interventi di sabbiatura della superficie interessata dal sistema di rinforzo, al fine di assicurare un grado di ruvidezza almeno pari a 0.3 mm. È necessario assicurarsi che le parti siano perfettamente pulite e che siano assenti eventuali *film* disarmanti, polveri, grassi, idrocarburi e tensioattivi.

Per quanto riguarda i casi che prevedono l'applicazione del sistema di rinforzo intorno agli spigoli, devono essere previsti opportuni interventi preventivi di arrotondamento degli stessi, allo scopo di evitare localizzazioni di tensioni, che possano condurre ad una rottura prematura del composito. Il raggio minimo di curvatura dell'arrotondamento deve essere maggiore o uguale a 20 mm.

Al fine di garantire un'esecuzione a regola d'arte del sistema di rinforzo con materiali compositi, si raccomanda di:

- tenere in considerazione le condizioni di temperatura e di umidità dell'ambiente, seguendo le indicazioni contenute nella Scheda Tecnica del sistema di rinforzo;
- evitare l'installazione del rinforzo con condizioni elevate di umidità, poiché queste ultime possono ritardare la stagionatura delle resine;
- adottare misure di protezione del rinforzo – ad esempio teli protettivi – nei casi di pioggia, eccessivo soleggiamento, forti gradienti termici, elevata umidità o presenza di polveri;
- prevedere una lunghezza minima di ancoraggio maggiore o uguale a 200 mm, oppure l'impiego di connettori meccanici;
- disporre le fibre secondo l'orientamento previsto in progetto, evitando ondulazioni;
- prevedere nel caso di sistemi di rinforzo con fibre di carbonio, ove necessario, strati di materiale isolante, al fine di evitare l'innescò di corrosione galvanica per contatto tra fibre e acciaio delle armature;
- predisporre zone aggiuntive di rinforzo (*testimoni*) in parti della struttura opportunamente selezionate, nella previsione di prove di controllo di tipo semi-distruttive;
- proteggere il sistema di rinforzo dall'azione diretta dell'irraggiamento solare – al fine di evitare alterazioni chimico-fisiche nella matrice epossidica – mediante l'impiego di vernici acriliche protettive, previa pulitura della superficie del composito o in alternativa mediante intonaci o malte, preferibilmente di natura cementizia, di adeguato spessore, previa preparazione della superficie mediante applicazione di resina epossidica e successivo spolvero “*fresco su fresco*” di polvere di quarzo;
- proteggere il sistema di rinforzo dall'azione del fuoco attraverso l'uso di pannelli intumescenti o l'applicazione di intonaci protettivi. Nella Scheda Tecnica del sistema è indicato il grado di protezione conseguibile in relazione allo spessore del rivestimento. Nel caso di impiego di pannelli, generalmente a base di calciosilicati, posati sul rinforzo tramite fissaggio

con tasselli, deve essere assolutamente evitato il danneggiamento delle fibre per taglio o foratura.

8. Controlli di accettazione in cantiere

La figura del Direttore dei Lavori assume un ruolo di fondamentale importanza nel processo di accettazione dei materiali in cantiere, a causa del suo ruolo di tipo decisionale.

Al momento della consegna in cantiere, il Direttore dei Lavori deve verificare la provenienza dei materiali forniti e la loro rispondenza alle prescrizioni del Progettista, controllando le caratteristiche meccaniche e fisiche dei prodotti, avvalendosi delle corrispettive certificazioni.

Il Direttore Lavori deve accertarsi del possesso e del regime di validità del Certificato di Idoneità Tecnica all’Impiego. L’elenco dei Certificati di Idoneità Tecnica all’Impiego emessi è pubblicato sul sito web del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Deve verificare che il prodotto presenti una resistenza nominale in accordo alle indicazioni progettuali e che lo stesso possa essere utilizzato all’interno dell’intervallo di temperature definito dal Progettista. Deve inoltre verificare che l’applicazione in opera del rinforzo sia eseguita in accordo alle temperature di applicazione indicate nel Certificato di Idoneità Tecnica all’Impiego.

Ai sensi del paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, tutti i materiali e prodotti per uso strutturale – nel caso specifico i sistemi di rinforzo in FRP impregnati in situ – devono essere accettati dal Direttore dei Lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione, finalizzate all’accertamento della qualità dei materiali e della corrispondenza dei risultati con i valori forniti dal Produttore o dal Fornitore. In base all’importanza ed all’entità dell’applicazione, il Direttore dei Lavori può richiedere l’esecuzione di specifiche prove, finalizzate alla verifica della resistenza al distacco del sistema di rinforzo dal supporto, rispetto alle previsioni progettuali.

Indicazioni riguardo i controlli di accettazione in cantiere sono contenute nella Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale “Linea Guida per la

identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015. È obbligo e competenza del Direttore dei Lavori l’esecuzione di controlli di accettazione in cantiere, esclusivamente di tipo meccanico.

I campioni devono essere ricavati da laminati realizzati in cantiere con i materiali base oggetto di fornitura ed in accordo alla procedura di installazione prescritta dal Fornitore, impiegando gli stessi addetti del cantiere. Le prove meccaniche devono essere effettuate da un Laboratorio autorizzato entro 30 giorni, nelle stesse condizioni ambientali di quelle di installazione.

Per ciascuna classe di sistema di rinforzo da installare e ciascun Fornitore, deve essere realizzato un laminato costituito da tre strati. Da ciascun laminato devono quindi essere ricavati 3 campioni, in riferimento ad ogni lotto di spedizione e comunque ogni 500 mq o frazione di sistema di rinforzo, sempre che il marchio e la documentazione di accompagnamento dimostrino la provenienza del sistema di rinforzo da uno stesso Fornitore.

Ai fini del controllo di accettazione, i valori della tensione di rottura e del modulo elastico a trazione, entrambi nella direzione delle fibre, devono risultare non inferiori a quelli nominali, indicati nella Tabella 2.

In caso l’esito delle prove sia negativo, il Direttore dei Lavori, dopo averne data notizia al Fornitore, deve prelevare in cantiere dei campioni di tessuto e di resina, in quantità opportuna, ed inviarli ad un Laboratorio incaricato, di fiducia anche del Fornitore, insieme con il Manuale di Installazione prodotto dal Fornitore. Il Direttore dei Lavori deve assicurare, mediante l’apposizione di sigle, etichettature indelebili, ecc., che i campioni inviati al Laboratorio siano effettivamente quelli da lui prelevati.

Al fine della validità della certificazione emessa dal Laboratorio, la richiesta di prove deve essere sottoscritta dal Direttore dei Lavori e deve contenere indicazioni sui campioni di tessuto e di resina prelevati. Esplicita menzione di ciò deve essere fatta nel certificato stesso. In accordo alle procedure descritte nel Manuale di Installazione, il laboratorio provvede alla realizzazione di un laminato composto da 3 strati e da questo sono successivamente ricavati 3 provini da sottoporre a prova di trazione. Il Direttore dei Lavori ed il Fornitore possono richiedere di assistere alla preparazione dei provini ed alla successiva prova.

Se i valori della tensione di rottura e del modulo elastico a trazione dei tre provini, entrambi nella direzione delle fibre, risultano non inferiori a quelli nominali indicati nella Tabella 2, la prova è ritenuta superata. **In caso di esito negativo della prova, il Direttore dei Lavori deve darne comunicazione al Servizio Tecnico Centrale.**

I contenuti minimi dei certificati emessi dai laboratori sono:

- identificazione del laboratorio che rilascia il certificato;
- identificazione univoca del certificato (numero di serie e data di emissione)
- identificazione di ciascuna sua pagina, oltre al numero totale di pagine;
- identificazione del committente dei lavori in esecuzione e del cantiere di riferimento;
- nominativo del Direttore dei Lavori che richiede la prova;
- estremi del verbale del prelievo sottoscritto dal Direttore dei Lavori;
- data di ricevimento dei campioni, di confezionamento dei provini e di esecuzione delle prove;
- descrizione dei campioni sottoposti a prova;
- notizia dell'eventuale presenza, al momento del confezionamento dei provini e dell'esecuzione delle prove, del Direttore dei Lavori e del Fornitore o di loro rappresentanti formalmente delegati;
- identificazione della norma di riferimento per l'esecuzione della prova;
- valori delle grandezze misurate.

In fase di accettazione, **il Direttore dei Lavori deve verificare che i prodotti costituenti ciascun lotto di spedizione siano coperti da un Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego in regime di validità. Una copia deve inoltre essere allegata ai documenti di trasporto.** Nel caso di materiali e prodotti recanti la Marcatura CE, il Direttore dei Lavori deve accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere ad ogni Fornitore, per ogni diverso prodotto, il Certificato ovvero Dichiarazione di Conformità alla parte armonizzata della specifica norma europea.

In ogni caso, il Direttore dei Lavori deve verificare che i prodotti consegnati in cantiere rientrino nelle tipologie previste nella detta documentazione.

Ai fini della rintracciabilità, il Direttore dei Lavori deve annotare l'ubicazione dei sistemi di rinforzo utilizzati nel consolidamento della struttura, con riferimento

ai diversi lotti di spedizione, e deve trasmetterne le annotazioni, debitamente sottoscritte, all'Appaltatore.

Il Fornitore deve garantire l'archiviazione e la disponibilità della documentazione di accompagnamento dei materiali per almeno dieci anni. Ai fini della rintracciabilità dei prodotti, è onere dell'Appaltatore assicurare la conservazione della stessa documentazione, comprese marcature, etichette di riconoscimento ed eventuali annotazioni trasmesse dal Direttore dei Lavori, fino al completamento delle operazioni di collaudo statico.

Tutti gli adempimenti di cui sopra sono richiesti anche in caso di sistemi di rinforzo impregnati in situ provenienti dall'estero. In caso di esistenza di una certificazione riconosciuta dalle rispettive Autorità estere competenti, in alternativa alla richiesta del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego, può essere inoltrata al Servizio Tecnico Centrale una richiesta di riconoscimento dell'equivalenza della procedura adottata nel Paese di origine. L'equivalenza è sancita con provvedimento del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

9. Prove non distruttive e semi-distruttive

Ai fini del controllo e dell'eventuale monitoraggio nel tempo del sistema di rinforzo, è possibile ricorrere a prove di tipo non distruttivo e semi-distruttivo. Le prime sono utilizzate principalmente per la rilevazione di eventuali difetti nella realizzazione, mentre le seconde permettono di caratterizzare le proprietà meccaniche del sistema di rinforzo. Per quanto concerne la tipologia di prove da effettuarsi e la loro numerosità devono essere adeguatamente tenute in considerazione l'importanza dell'intervento e l'incidenza delle zone trattate nei confronti delle dimensioni della struttura.

9.1. Prove non distruttive

Le prove di tipo non distruttivo comunemente impiegate per rilevare la presenza di eventuali difetti nella realizzazione del sistema di rinforzo sono:

- Prove di tipo acustico stimolato;
- Prove ultrasoniche ad alta frequenza;

- Prove termografiche;
- Prove in emissione acustica.

Le prove di tipo acustico stimolato sono fondate sul diverso comportamento oscillatorio dello strato di composito con o senza adesione con il substrato. Possono essere eseguite tramite percussione della superficie del composito di tipo manuale oppure automatizzata.

Le prove ultrasoniche ad alta frequenza sono basate sul fenomeno della riflessione, adottando frequenze superiori a 1.0 MHz – a causa della entità degli spessori in gioco – e sonde con diametro inferiore a 25 mm. Ai fini della localizzazione dei difetti, buoni risultati si ottengono mediante la tecnica basata sulla variazione dell'ampiezza del primo picco.

Nel caso di sistemi di rinforzo costituiti da fibre in vetro o arammidiche, caratterizzati da una bassa conducibilità termica, si dimostrano efficaci prove termografiche. Si sconsiglia l'uso delle stesse nel caso di compositi realizzati con fibre di carbonio. È importante sottolineare che deve essere assolutamente evitato il danneggiamento del rinforzo per effetto del riscaldamento impartito nel corso della prova, che non deve essere eccessivamente prossimo alla temperatura di transizione vetrosa.

Le prove in emissione acustica, utilizzate per rilevare la presenza di difetti di incollaggio, sono basate sulla registrazione dei rumori generati dalla formazione di fessure e distacchi tra substrato e rinforzo.

9.2. Prove semi-distruttive

Le prove di tipo semi-distruttivo consistono in prove di strappo normale e prove di strappo a taglio. Entrambe le tipologie di prova devono essere effettuate in zone aggiuntive di rinforzo (*testimoni*), e se possibile anche in zone del sistema di rinforzo non critiche.

La prova di strappo normale viene utilizzata per accertare le proprietà del substrato. Generalmente si ricorre all'impiego di piastre in acciaio, di forma circolare, aventi spessore pari a 20 mm e diametro non inferiore a 50 mm. Prima dell'esecuzione della prova, il rinforzo è ritagliato lungo il bordo della piastra, mediante l'utilizzo di una fresa cilindrica retta di spessore non maggiore di 3 mm. Particolare attenzione deve essere prestata in tale fase, al fine di evitare il surriscaldamento del composito. Il substrato viene quindi contestualmente

inciso per una profondità di almeno 2 mm. Durante l'esecuzione della prova, deve essere sempre garantita l'ortogonalità della direzione di applicazione della forza di strappo alla superficie del rinforzo.

La superficie di strappo deve essere contenuta all'interno del substrato e non deve coincidere con l'interfaccia composito-substrato.

La prova di strappo a taglio viene impiegata per accertare l'efficacia dell'incollaggio e della preventiva preparazione del supporto. Possono essere eseguite prove di strappo a taglio di tipo diretto e indiretto.

Nel caso di prova di tipo diretto (Figura 3), la stessa viene eseguita in corrispondenza di uno spigolo libero della struttura, su cui è incollato il rinforzo, lasciandone un'opportuna porzione libera, cioè non incollata, in continuità del materiale incollato. Su quest'ultima viene quindi applicata l'azione radente, impiegando il suddetto spigolo come contrasto.

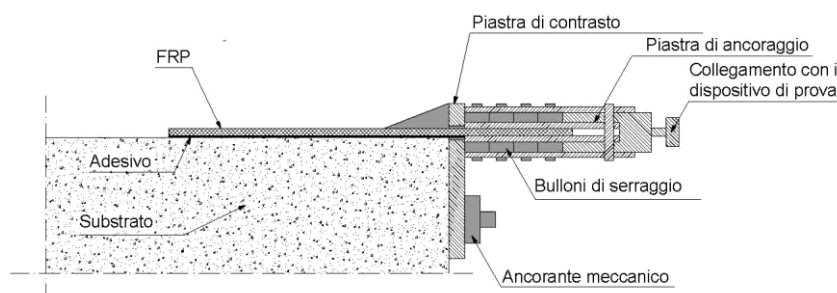


Figura 3: Prova di strappo a taglio di tipo diretto [3]

Nel caso di prova di tipo indiretto (Figura 4), in assenza di testimoni, la prova è eseguita direttamente su un rinforzo realizzato, in prossimità di uno spigolo della struttura. Preventivamente all'esecuzione della prova, il materiale composito è sezionato dalla parte rimanente e sulla faccia a vista è incollata una piastra metallica, caratterizzata dalla presenza di una parte aggettante rispetto allo spigolo, atta all'afferraggio da parte del dispositivo di prova. Generalmente la piastra presenta una larghezza non inferiore a 45 mm ed uno spessore non superiore a 6 mm. Al fine di assicurare una idonea aderenza, sulla faccia a contatto con il composito è consigliata la presenza di scanalature.

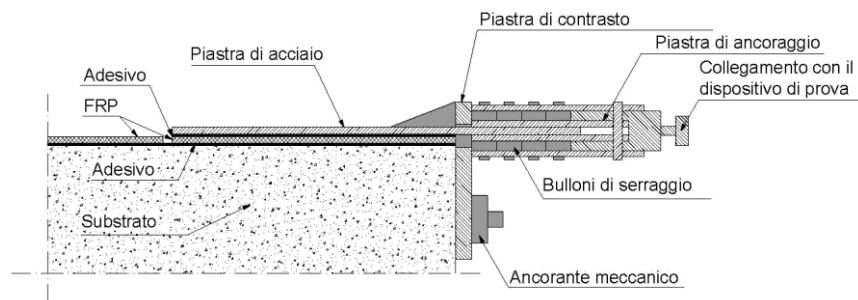


Figura 4: Prova di strappo a taglio di tipo indiretto [3]

Per entrambi i tipi di prova, la lunghezza della porzione di FRP incollata deve risultare non inferiore a 200 mm nel caso di strutture di c.a. e comunque superiore a 1.1 volte la lunghezza ottimale di ancoraggio del rinforzo di FRP.

Appendice A: Esempio di Scheda Tecnica

Il produttore deve riportare i valori statistici necessari per la valutazione delle resistenze caratteristiche (ad esempio media, scarto quadratico medio, popolazione, frattile, intervallo di confidenza).

Descrizione

Nome commerciale, tipo di fibra, tipo di resina, numero di strati, marcatura ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

Caratteristiche geometriche e fisiche

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
Densità delle fibre	[g/cm ³]	ASTM D 792 ISO 1183 -1
Massa del tessuto per unità di area	[g/m ²]	ISO 3374
Densità della resina	[g/cm ³]	ISO 1675
Area equivalente	[mm ² /m]	
Spessore equivalente	[mm]	
Frazione in peso delle fibre nel composito		
Frazione in volume delle fibre nel composito		
Temperatura di transizione vetrosa della resina	[°C]	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E1640 (DMA)
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo	[°C]	
Resistenza e reazione al fuoco		

Proprietà meccaniche

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
Modulo elastico del laminato riferita all'area netta fibre	[MPa]	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferita all'area netta fibre	[MPa]	
Deformazione a rottura	[%]	

Condizioni di stoccaggio

Descrizione

Precauzioni d'uso e sicurezza

Descrizione

Indicazioni sull'utilizzo del prodotto in un sistema di rinforzo

Descrizione

Appendice B: Esempio di calcolo di rinforzo a flessione di una soletta in c.a.

Il calcolo della resistenza flessionale della sezione rinforzata è effettuato in accordo alla CNR-DT 200 R1/2013, utilizzando le equazioni di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e di equilibrio alla rotazione intorno all'asse baricentrico della sezione di solo calcestruzzo. In Figura 5 è mostrata la modalità di rottura della sezione in oggetto: si distinguono due zone, contrassegnate dai numeri 1 e 2, nelle quali la rottura viene attinta rispettivamente, per raggiungimento della deformazione massima del tessuto in FRP o della deformazione ultima del calcestruzzo.

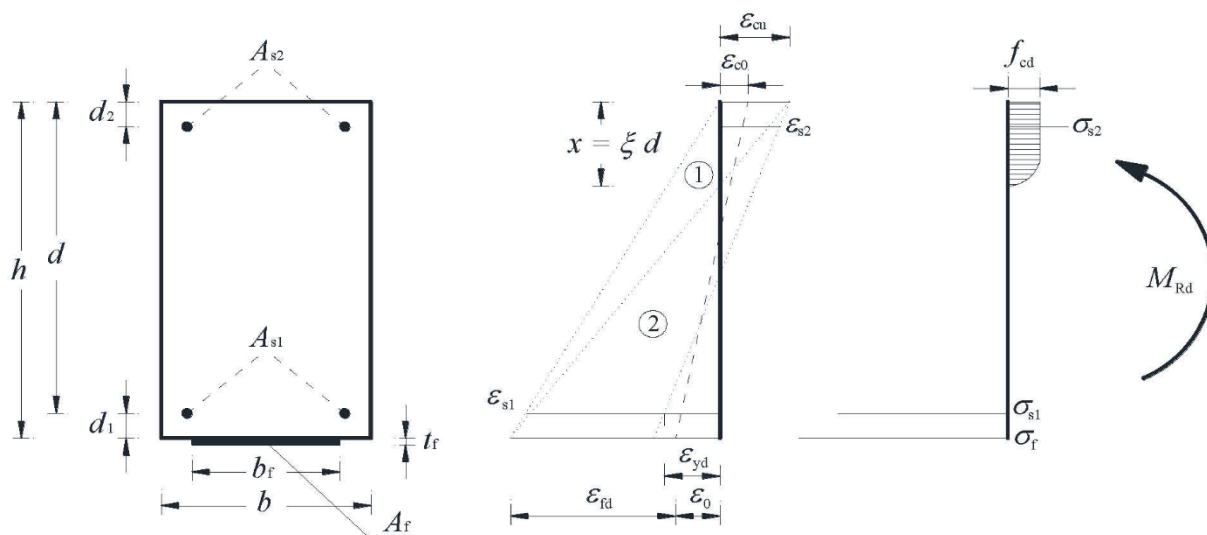


Figura 5: Modalità di rottura sezione in c.a. rinforzata con tessuti in FRP [3]

Il calcolo è effettuato ipotizzando una soletta in c.a. avente larghezza e altezza pari rispettivamente a 1000 mm e 200 mm, e due differenti disposizioni di barre di armatura, uguali a 5Ø14 sup. + inf. e 5Ø16 sup. + inf..

Nelle tabelle seguenti sono riportati i dati geometrici, le caratteristiche meccaniche dei diversi materiali – calcestruzzo, acciaio e FRP – ed i risultati delle verifiche effettuate.

Caso n.1: 5Ø14 sup. + inf.**Dati geometrici**

Base	b	1000 mm
Altezza	h	200 mm
Copriferro	δ	30 mm
Altezza utile	$d=h-\delta$	170 mm
Diametro barre superiori	$\varnothing_{sup}$	14 mm
Numero barre superiori	n_{sup}	5
Area barre superiori	$A_{sup} = n_{sup} \cdot \pi \cdot \varnothing_{sup}^2 / 4$	769 mm ²
Diametro barre inferiori	$\varnothing_{sup}$	14 mm
Numero barre inferiori	n_{inf}	5
Area barre inferiori	$A_{inf} = n_{inf} \cdot \pi \cdot \varnothing_{sup}^2 / 4$	769 mm ²
Spessore del tessuto	t_{fb}	0.167 mm
Numero di strati	n_f	2
Spessore del rinforzo	t_f	0.334 mm
Larghezza del rinforzo	b_f	1000 mm

Materiali

Calcestruzzo		
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	f_{ck}	25 MPa
Resistenza media cilindrica a compressione	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$	33 MPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_c	1.5
Fattore di confidenza	FC	1.35
Resistenza di progetto cilindrica a compressione	$f_{cd} = f_{cm} / (\gamma_c \cdot FC)$	16.3 MPa
Resistenza media a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3}$	2.56 MPa
Deformazione ultima	ε_{cu}	0.0035

Acciaio		
Resistenza caratteristica di snervamento	f_{yk}	450 MPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_s	1.15
Fattore di confidenza	FC	1.35
Resistenza di progetto di snervamento	$f_{yd} = f_{yk} / (\gamma_s \cdot FC)$	289.8 MPa
Deformazione ultima	ε_{su}	0.1
Modulo elastico	E_s	210 GPa

Tessuto in fibra di carbonio (Classe 210C)		
Resistenza caratteristica a trazione nella direzione delle fibre	f_{fk}	2700 MPa
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	E_f	210 GPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_f	1.1
Deformazione a rottura	ε_{fk}	0.013
Coefficiente parziale per distacco dal supporto	$\gamma_{f,d}$	1.2
Fattore di conversione ambientale	η_a	0.85
Coefficiente geometrico	$k_b = [(2 \cdot b_f / b) / (1 + b_f / b)]^{0.5} \geq 1$	1
Coefficiente correttivo di tipo sperimentale	$k_{G,2}$	0.10 mm
Fattore di confidenza	FC	1.35
Coefficiente condizione di carico	$k_q = (1.25 \text{ per carichi distribuiti, } 1 \text{ altri casi})$	1.25
Tensione massima per distacco intermedio	$f_{fdd,2} = k_q / \gamma_{f,d} [E_f \cdot 2 \cdot k_b \cdot k_{G,2} / (t_f \cdot FC) \cdot (f_{cm} \cdot f_{ctm})^{0.5}]^{0.5}$	964.3 MPa
Deformazione massima per distacco intermedio	$\varepsilon_{fdd} = f_{fdd,2} / E_f$	$4.592 \cdot 10^{-3}$
Deformazione massima	$\varepsilon_{fd} = \min(\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f, \varepsilon_{fdd})$	$4.592 \cdot 10^{-3}$

Calcolo del momento ultimo

Calcestruzzo		
Momento carichi SLE	M_o	2.5 kNm
Deformazione iniziale del calcestruzzo, lembo teso	$\varepsilon_o = M_o / (0.9 \cdot d \cdot E_s \cdot A_{sup})$	$1.01 \cdot 10^{-4}$
Momento ultimo	M_u	93.3 kNm
Momento agente SLU	M_{Sd}	85.0 kNm

Caso n.1: 5Ø16 sup. + inf.**Dati geometrici**

Base	b	1000 mm
Altezza	h	200 mm
Copriferro	δ	30 mm
Altezza utile	$d=h-\delta$	170 mm
Diametro barre superiori	$\varnothing_{sup}$	16 mm
Numero barre superiori	n_{sup}	5
Area barre superiori	$A_{sup} = n_{sup} \cdot \pi \cdot \varnothing_{sup}^2 / 4$	1005 mm ²
Diametro barre inferiori	$\varnothing_{sup}$	16 mm
Numero barre inferiori	n_{inf}	5
Area barre inferiori	$A_{inf} = n_{inf} \cdot \pi \cdot \varnothing_{sup}^2 / 4$	1005 mm ²
Spessore del tessuto	t_{fb}	0.167 mm
Numero di strati	n_f	1
Spessore del rinforzo	t_f	0.167 mm
Larghezza del rinforzo	b_f	1000 mm

Materiali

Calcestruzzo		
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	f_{ck}	25 MPa
Resistenza media cilindrica a compressione	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$	33 MPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_c	1.5
Fattore di confidenza	FC	1.35
Resistenza di progetto cilindrica a compressione	$f_{cd} = f_{cm} / (\gamma_c \cdot FC)$	16.3 MPa
Resistenza media a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3}$	2.56 MPa
Deformazione ultima	ε_{cu}	0.0035

Acciaio		
Resistenza caratteristica di snervamento	f_{yk}	450 MPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_s	1.15
Fattore di confidenza	FC	1.35
Resistenza di progetto di snervamento	$f_{yd} = f_{yk} / (\gamma_s \cdot FC)$	289.8 MPa
Deformazione ultima	ε_{su}	0.1
Modulo elastico	E_s	210 GPa

Tessuto in fibra di carbonio (Classe 210C)		
Resistenza caratteristica a trazione nella direzione delle fibre	f_{fk}	2700 MPa
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	E_f	210 GPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_f	1.1
Deformazione a rottura	ε_{fk}	0.013
Coefficiente parziale per distacco dal supporto	$\gamma_{f,d}$	1.2
Fattore di conversione ambientale	η_a	0.85
Coefficiente geometrico	$k_b = [(2 \cdot b_f / b) / (1 + b_f / b)]^{0.5} \geq 1$	1
Coefficiente correttivo di tipo sperimentale	$k_{G,2}$	0.10 mm
Fattore di confidenza	FC	1.35
Coefficiente condizione di carico	$k_q = (1.25 \text{ per carichi distribuiti, } 1 \text{ altri casi})$	1.25
Tensione massima per distacco intermedio	$f_{fdd,2} = k_q / \gamma_{f,d} [E_f \cdot 2 \cdot k_b \cdot k_{G,2} / (t_f \cdot FC) \cdot (f_{cm} \cdot f_{ctm})^{0.5}]^{0.5}$	1364 MPa
Deformazione massima per distacco intermedio	$\varepsilon_{fdd} = f_{fdd,2} / E_f$	$6.494 \cdot 10^{-3}$
Deformazione massima	$\varepsilon_{fd} = \min(\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f, \varepsilon_{fdd})$	$6.494 \cdot 10^{-3}$

Calcolo del momento ultimo

Calcestruzzo		
Momento carichi SLE	M_o	2.5 kNm
Deformazione iniziale del calcestruzzo, lembo teso	$\varepsilon_o = M_o / (0.9 \cdot d \cdot E_s \cdot A_{sup})$	$7.74 \cdot 10^{-5}$
Momento ultimo	M_u	86.8 kNm
Momento agente SLU	M_{Sd}	85.0 kNm

Bibliografia

- [1] Decreto Ministeriale 14.01.2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008
- [2] Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 “Istruzioni per l’Applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008”, Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009
- [3] CNR-DT 200 R1/2013 “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati”
- [4] Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale “Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015



QUADERNO TECNICO N.12

LAMINE IN FRP E BARRE DI MATERIALE
COMPOSITO FIBRORINFORZATO

1. Introduzione

Nel caso di interventi locali derivanti da lavori di manutenzione straordinaria, è spesso necessario ripristinare un'adeguata capacità portante della struttura, senza apportare significative variazioni in termini di massa e rigidità. In questi casi specifici, una efficace tecnica di intervento è rappresentata dall'utilizzo di materiali compositi costituiti da matrici polimeriche e da fibre in diversi materiali, comunemente denominati FRP, acronimo di Fiber Reinforced Polymers. I materiali più comunemente impiegati per le fibre sono il carbonio, il vetro e l'arammide. A seconda del materiale, il composito viene quindi denominato rispettivamente CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer, GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer e AFRP – Aramid Fiber Reinforced Polymer. Nella Tabella 1 sono riassunte le principali proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni.

Tabella 1: Proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni

	Modulo di elasticità normale	Resistenza a trazione	Deformazione a rottura	Coefficiente di dilatazione termica	Densità
	[GPa]	[MPa]	[%]	[10⁻⁶ °C⁻¹]	[g/cm³]
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

L'utilizzo di compositi per il rinforzo strutturale presenta vantaggi rispetto a tecniche tradizionali nei casi in cui sia richiesta un'adeguata reversibilità dell'intervento, oltre che una minimizzazione dell'impatto estetico sulla struttura originaria, ovvero nei casi in cui il ricorso ad altre tecniche sia reso difficoltoso dalla limitatezza dello spazio a disposizione.

I compositi in FRP sono distinti a seconda della loro geometria in lamine pultruse e tessuti. Le prime sono caratterizzate da una disposizione unidirezionale delle fibre e sono utilizzate preferibilmente per il placcaggio di superfici regolari. I secondi sono generalmente bidirezionali e facilmente adattabili alla forma dell'elemento strutturale da rinforzare.

Oggetto del presente documento sarà esclusivamente l'utilizzo di lamine pultruse in FRP, rimandando per quanto riguarda l'utilizzo di tessuti in FRP al Quaderno Tecnico n. 11 *“Tessuti in FRP”*.

Nel presente Quaderno Tecnico si farà riferimento al Decreto Ministeriale 14.01.2008 *“Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”*, Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 e relativa Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 *“Istruzioni per l'Applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008”*, Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009. L'utilizzo di detti materiali deve essere inoltre fatto seguendo le indicazioni della CNR-DT 200 R1/2013 *“Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati”*. Ai fini dell'identificazione e del controllo di accettazione si farà riferimento alla *“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”*, emanata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Servizio Tecnico Centrale e approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015.

Un paragrafo conclusivo del presente Quaderno Tecnico è dedicato inoltre all'impiego di barre di materiale composito fibrorinforzato, con riferimento alla CNR-DT 203/2006 *“Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato”*.

2. Classificazione dei sistemi di rinforzo in FRP

Un materiale FRP è caratterizzato a seconda della:

- geometria, ovvero forma e dimensioni;

- disposizione e orientazione delle fibre rispetto agli assi di simmetria del materiale; nel caso in cui questa sia casuale, il composito ha caratteristiche simili a quelle di un materiale isotropo, viceversa è anisotropo;
- concentrazione, ovvero frazione in volume.

Le fibre più comunemente impiegate per la produzione di materiali compositi FRP, sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche. La loro geometria filiforme conferisce a tali materiali caratteristiche di rigidità e resistenza maggiori di quelle possedute dagli stessi materiali quando siano utilizzati in configurazione tridimensionale, a causa della minore densità di difetti.

Le fibre sono disponibili in commercio in varie forme, tra cui:

- filamento (monofilament), con dimensioni di circa 10 μm di diametro;
- cavo di filatura (tow), fascio costituito da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), praticamente senza torsione;
- filo o filato (spun yarn), filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- filo assemblato (roving), fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

Le matrici più comunemente impiegate nei sistemi di rinforzo in FRP sono di tipo polimerico, a base di resine termoindurenti. Tali resine, disponibili in forma parzialmente polimerizzata, si presentano a temperatura ambiente allo stato liquido o pastoso. Tramite una reazione per miscelazione con un opportuno reagente, esse polimerizzano o reticolano, passando allo stato solido vetroso.

I loro principali vantaggi consistono in:

- bassa viscosità allo stato fluido;
- buona 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.

Gli svantaggi principali sono invece rappresentati da:

- ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa;
- comportamento fragile;

- sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più comunemente utilizzate per uso strutturale sono quelle epossidiche, ma sono anche impiegate resine poliestere o vinilestere.

I sistemi di rinforzo in materiale composito FRP possono essere classificati da un punto di vista morfologico in:

- 3) **sistemi preformati**, costituiti da elementi di varia forma – lamine, nastri, barre o altro – prodotti in stabilimento mediante processo di pultrusione o altri processi produttivi di comprovata validità tecnologica, e successivamente incollati in cantiere all'elemento strutturale da rinforzare;
- 4) **sistemi impregnati in situ**, costituiti da fogli o tessuti di fibre uni o multi-direzionali, impregnati in situ con resina polimerica che può avere anche la funzione di adesivo con il substrato;

Nel presente Quaderno Tecnico si farà riferimento esclusivamente ai sistemi preformati. Come già specificato, l'utilizzo di sistemi impregnati in situ sarà oggetto del Quaderno Tecnico n. 11 *“Tessuti in FRP”*.

Come specificato dalla *“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”*, i suddetti sistemi di rinforzo in FRP possono essere classificati da un punto di vista meccanico in base ai valori del modulo elastico e della tensione di rottura, valutati in regime di trazione uniassiale nella direzione delle fibre. Per quanto concerne i sistemi preformati, le suddette caratteristiche meccaniche, valutate in regime di trazione uniassiale, devono essere riferite all'unità di superficie complessiva della sezione retta del rinforzo FRP (fibre e matrice), ortogonalmente cioè alla direzione delle fibre.

Tali valori devono risultare inoltre opportunamente stabili nei confronti del degrado indotto sul composito FRP da azioni ambientali.

A seconda della natura della fibra e dei valori nominali del modulo elastico e della tensione di rottura a trazione, valutati nella direzione delle fibre, i sistemi di rinforzo sono riconducibili alle classi mostrate in Tabella 2. L'appartenenza alla corrispondente classe è legittimata dalla condizione che i valori misurati di tali parametri siano maggiori o uguali a quelli nominali, indicati nella tabella.

Se in fase di qualificazione, i valori del modulo elastico e della resistenza a trazione del materiale composito ricadono in classi differenti, ai fini della classificazione si farà riferimento alla classe avente le caratteristiche nominali inferiori.

Nel caso di prodotti appartenenti alla stessa classe ma realizzati con fasi differenti (fibre e/o resina), ai fini della qualificazione sono richiesti processi separati.

Tabella 2: Classificazione dei sistemi preformati

Classe	Fibra	Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre [GPa]	Resistenza a trazione nella direzione delle fibre [MPa]
E17	Vetro	17	170
E23	Vetro	23	240
G38/600	Vetro	38	600
G38/800	Vetro	38	800
G45	Vetro	45	1000
C120	Carbonio	120	1800
C150/1800	Carbonio	150	1800
C150/2300	Carbonio	150	2300
C190/1800	Carbonio	190	1800
C200/1800	Carbonio	200	1800
A55	Arammide	55	1200

3. Proprietà meccaniche dei sistemi di rinforzo in FRP preformati

Come detto precedentemente, il materiale composito è costituito da matrici polimeriche e da fibre in diversi materiali. Le fibre assolvono la funzione di elementi portanti, sia in termini di resistenza sia di rigidità. La matrice ha invece un duplice compito di protezione delle fibre e di trasferimento degli sforzi tra fibra e fibra e tra queste ultime e l'elemento strutturale da rinforzare. Generalmente le fibre sono caratterizzate da resistenza e rigidità elevate, nonché da valori della deformazione a rottura inferiori a quelli della matrice.

In Figura 1 sono mostrati in modo qualitativo i legami costitutivi delle fibre, della matrice e del corrispondente materiale composito unidirezionale. Come si può vedere, il composito è caratterizzato da una rigidità inferiore a quella delle sole fibre e dalla medesima deformazione a rottura delle stesse, $\varepsilon_{fib,max}$. Il trasferimento degli sforzi dalla matrice alle fibre non può infatti più avvenire al superamento di tale valore di deformazione.

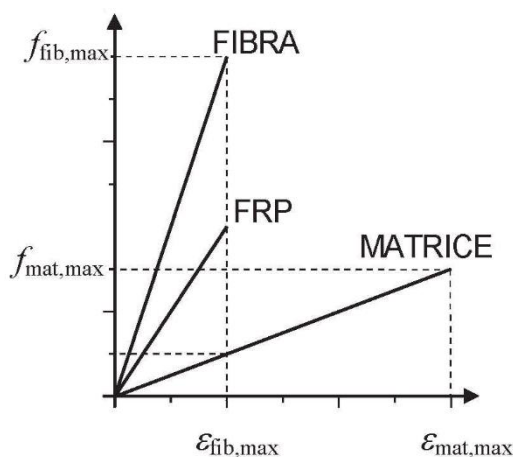


Figura 1: Sovrapposizione leggi costitutive composito e sue fasi costituenti

In prima approssimazione, i valori delle caratteristiche meccaniche di rigidità e di resistenza del sistema di rinforzo preformato possono essere stimati mediante modelli micromeccanici, quali ad esempio la regola delle miscele, a causa della disposizione delle fibre generalmente unidirezionale.

Le proprietà meccaniche dei compositi preformati, in termini di resistenza a trazione f_f e modulo elastico a trazione E_f nella direzione delle fibre, sono valutate come:

$$f_f = F_{fu} / A_f \quad (1)$$

$$E_f = F_{fu} / (A_f \varepsilon_{fu}) \quad (2)$$

in cui F_{fu} e ε_{fu} sono rispettivamente la forza e la deformazione ultima, determinate sperimentalmente, ed A_f è l'area della sezione retta del sistema di rinforzo preformato.

4. Qualificazione dei sistemi di rinforzo in FRP

Come indicato al paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, tutti i materiali e prodotti per uso strutturale devono essere identificati univocamente a cura del produttore, qualificati sotto la responsabilità dello stesso ed accettati dal Direttore dei Lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione.

Nel caso in cui i materiali e prodotti da costruzione per uso strutturale non siano marcati CE o non siano provvisti di Benestare Tecnico Europeo, devono essere in possesso di un Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego, rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale, sulla base di Linee Guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il Direttore Lavori dovrà pertanto accertarsi del possesso e del regime di validità del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

Le procedure per l'identificazione, la qualificazione e l'accettazione dei sistemi di rinforzo FRP sono descritte nella Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale *“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”*, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015.

I sistemi di rinforzo in FRP preformati devono essere prodotti in uno stabilimento dotato di un sistema permanente di controllo interno della qualità. Il sistema di controllo della produzione in stabilimento si esplica attraverso le fasi di controllo sui materiali base, di identificazione dei prodotti, di esecuzione di prove iniziali di tipo e di effettuazione di controlli periodici della produzione.

Al fine di garantire la corrispondenza delle caratteristiche dei materiali all'atto dell'utilizzo con quelle dichiarate dal produttore del materiale base, per ciascun materiale base – fibre, tessuti, resine ed eventuali additivi – e per ciascuna fornitura, devono essere effettuati specifici controlli periodici. I risultati di tali controlli devono verificare i valori delle caratteristiche del materiale dichiarati dalla ditta fornitrice e devono essere registrati nel sistema di controllo di produzione aziendale.

La seconda fase del controllo della produzione, ovvero l'identificazione dei prodotti, si realizza mediante l'istituzione, da parte del Produttore, di un Sistema

di Identificazione dei Prodotti. Ciascun sistema di rinforzo deve essere identificabile e riconducibile alla relativa linea di produzione ed allo stabilimento di produzione. A tal fine è obbligatorio apporre una marcatura ad ogni singolo pezzo, o dove ciò non sia possibile alla più piccola confezione – con identificativi diversi per ogni prodotto, per ogni linea di produzione ovvero per ogni stabilimento di produzione –, alla fine del ciclo di produzione e/o della linea di confezionamento ovvero per ogni lotto di produzione, prima del deposito a magazzino e comunque prima della spedizione. Deve esserne garantita la inalterabilità sino alla consegna in cantiere senza possibilità di manomissione.

Il sistema di rinforzo non può essere impiegato in caso di mancata marcatura, di non corrispondenza al marchio oppure di illeggibilità, anche parziale.

Al fine dell'ottenimento del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego, il Produttore deve effettuare prove iniziali di tipo, presso un Laboratorio Autorizzato, per stabilire le caratteristiche prestazionali dei sistemi di rinforzo prodotti. Sono da intendersi come *prodotti diversi*, prodotti appartenenti a classi differenti tra quelle indicate nella Tabella 2, oppure prodotti ricadenti nella stessa classe, ma realizzati con un differente accoppiamento di fibre e resina. Sono previste prove iniziali di tipo meccanico, per la determinazione del modulo elastico e della tensione di rottura, entrambi nella direzione delle fibre. Allo scopo di stimare il degrado delle suddette proprietà meccaniche per effetto di azioni ambientali, è prevista l'esecuzione di prove cicliche di gelo e disgelo e di prove di invecchiamento artificiale (umidità, ambienti salini e alcalini). Per ulteriori dettagli riguardo l'esecuzione delle suddette prove di qualificazione di tipo si rimanda al paragrafo 4.3 della Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015. Lo schema delle prove previste e della loro numerosità è riassunto nella Tabella 3.

Tabella 3: Sintesi delle prove iniziali di tipo

Tipo di prova	Misura	Numero dei campioni	Numero dei lotti di produzione interessati
Resistenza meccanica	Modulo elastico Tensione di rottura	15	3
Resistenza a cicli di gelo-disgelo	Verifica di alterazioni superficiali + Modulo elastico Tensione di rottura	4 sottoposti a prova 4 di controllo	2
Resistenza all'umidità		4 sottoposti a prova 4 di controllo	2
Resistenza agli ambienti salini		4 sottoposti a prova 4 di controllo	2
Resistenza agli ambienti alcalini		4 sottoposti a prova 4 di controllo	2

Tutti i prodotti devono essere accompagnati da una Scheda Tecnica, predisposta dal Produttore, con indicazione di:

- resistenza e reazione al fuoco del prodotto;
- temperatura di transizione vetrosa;
- comportamento del prodotto nei confronti della temperatura, specificando l'intervallo all'interno del quale sono garantite le sue caratteristiche prestazionali;
- condizioni di impiego;
- informazioni relative a ulteriori caratteristiche prestazionali;

Specifiche prove di resistenza al fuoco devono essere eseguite nel caso in cui l'ambito di utilizzo le richieda.

Un esempio di Scheda Tecnica per sistemi di rinforzo preformati è contenuta nell'Allegato A della Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015, e riportata in Appendice al presente Quaderno Tecnico.

La fase conclusiva del sistema di controllo della produzione in stabilimento, rappresentata dall'esecuzione di controlli periodici della produzione, consiste nella valutazione su base statistica delle proprietà geometriche, fisiche, meccaniche dei prodotti finiti, allo scopo di garantire un livello adeguato e costante delle suddette caratteristiche. In particolare, è prevista l'esecuzione di prove di trazione nella direzione delle fibre, per la determinazione della tensione

di rottura a trazione e del modulo elastico. Per ogni prodotto deve essere redatto un Registro di Controllo della Produzione dove devono essere riportati i risultati di tutte le prove effettuate, nel caso di esito sia positivo sia negativo.

Ai sensi del paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, i Produttori devono richiedere il Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego al Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, allegando la documentazione descritta al paragrafo 4.5 della Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015. Successivamente il Servizio Tecnico Centrale provvede a verificare la completezza e congruità della documentazione presentata, nonché l'idoneità del Laboratorio incaricato. In caso di esito positivo, si procede con una visita iniziale in fabbrica e l'esplicitazione di eventuali non conformità rilevate e del relativo termine temporale concesso al Produttore per apportare le opportune azioni correttive.

All'esito positivo di tutte le verifiche previste, il Servizio Tecnico Centrale, sentita la competente Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, provvede al rilascio del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego al Produttore. **Il prodotto può essere impiegato solo dopo il rilascio del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego. Quest'ultimo ha validità di 5 anni dalla data di rilascio e può essere rinnovato.**

L'uso strutturale del sistema di rinforzo in FRP può avvenire solo ed esclusivamente dopo il rilascio del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego: tutti i prodotti forniti in cantiere devono essere accompagnati da copia del certificato, da cui deve risultare con chiarezza il logo o il marchio del Fornitore. La validità dello stesso è subordinata al permanere delle condizioni di produzione in fabbrica e delle procedure interne di controllo. Il verificarsi, nell'anno, di prove negative relativamente alle proprietà meccaniche del prodotto, documentate dal controllo continuo di fabbrica o da prove di accettazione in cantiere dovrà essere valutato dal Servizio Tecnico Centrale, giungendo nei casi più gravi alla revoca del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

5. Compiti del progettista

Durante la fase progettuale, particolare attenzione deve essere prestata alla individuazione, eliminazione o attenuazione dei rischi che potrebbero interessare la struttura. La configurazione del sistema di rinforzo deve essere tale da assicurare una sensibilità minima nei confronti dei suddetti rischi e deve essere in grado di sopportare eventuali danneggiamenti localizzati. Il sistema di rinforzo deve inoltre eliminare o posticipare fenomeni di collasso fragile preesistenti.

Requisiti fondamentali del sistema di rinforzo sono:

- reale efficacia dell'intervento;
- durabilità;
- reversibilità;
- compatibilità fisico-chimica e meccanica dei materiali di rinforzo con quelli delle strutture rinforzate;
- soddisfacimento dei requisiti di esercizio;
- soddisfacimento dei requisiti di resistenza al collasso.

Il sistema di rinforzo deve inoltre presentare una resistenza nei confronti di scenari di incendio, adeguata al tempo di esposizione che si vuole garantire.

Al sistema di rinforzo composito in FRP possono essere affidati esclusivamente sforzi di trazione. Pertanto, tali sistemi di rinforzo non devono essere posizionati in zone in cui è necessario resistere a sforzi di compressione.

Il Progettista deve indicare chiaramente nel progetto la classe del sistema di rinforzo previsto, conformemente alle indicazioni riportate nella Tabella 2. In particolare deve fare riferimento ai valori nominali minimi della resistenza a trazione e del modulo elastico, entrambi valutati nella direzione delle fibre.

Il Progettista deve definire la temperatura di esercizio e le temperature limite, minima e massima, di utilizzo del sistema di rinforzo. I suddetti valori devono essere indicati sia nella Relazione Progettuale sia negli Elaborati Grafici di Progetto. I valori della temperatura di esercizio devono comunque rispettare i limiti indicati al paragrafo 11.9 del Decreto Ministeriale 14.01.2008. In particolare il campo di temperatura di riferimento per la valutazione delle variazioni è $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \div +45\text{ }^{\circ}\text{C}$. In relazione alla collocazione geografica dell'opera, in caso possano essere attese temperature superiori a $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ o inferiori a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, il Progettista può fissare un intervallo di temperature più ampio.

In base all'importanza e all'entità dell'applicazione, può suggerire al Direttore dei Lavori l'esecuzione di eventuali prove di qualità dell'installazione nei confronti del distacco dal supporto.

Al fine di assicurare la durabilità dell'efficacia dell'intervento di rinforzo nel corso della vita utile della struttura rinforzata, anche in relazione al degrado atteso, particolare attenzione deve essere prestata a:

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

In fase progettuale, si può assumere una vita utile della struttura rinforzata identica a quella dell'analoga struttura di nuova realizzazione. Di conseguenza, per quanto concerne il calcolo dei coefficienti parziali da adottare per le azioni di calcolo, devono essere impiegati gli stessi di quelli previsti dalla Normativa vigente per le nuove costruzioni.

Per il calcolo degli interventi di rinforzo di strutture in c.a. ed in c.a.p. mediante l'utilizzo di tessuti di materiale FRP occorre fare riferimento alla Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015 ed alla CNR-DT 200 R1/2013. L'impiego di tali sistemi si dimostra efficace ai fini dell'incremento della resistenza ultima di elementi in calcestruzzo, nei confronti di meccanismi di collasso per flessione e per taglio. Il rinforzo a flessione viene utilizzato nel caso in cui il momento flettente di progetto superi la corrispondente resistenza dell'elemento strutturale e si realizza applicando, al lembo teso dell'elemento da rinforzare, una o più lamine preformate. Il rinforzo a taglio viene utilizzato nel caso in cui il taglio di calcolo sia superiore alla

resistenza di calcolo e viene realizzato applicando in aderenza, sulla superficie esterna, una o più lamine preformate, in adiacenza oppure in modo discontinuo. Nelle verifiche di sicurezza, l'aderenza tra composito e substrato assume particolare importanza, poiché connessa al meccanismo di rottura fragile per distacco dal supporto. In accordo al criterio di gerarchia delle resistenze, il verificarsi di meccanismi di collasso per flessione e taglio non deve essere, in qualsiasi caso, preceduto da meccanismi di crisi per perdita di aderenza. Quest'ultima può verificarsi nell'adesivo, nel substrato, nel contatto tra substrato ed adesivo oppure nel rinforzo in FRP, ad esempio all'interfaccia tra strati sovrapposti.

Le modalità più comuni di rottura per distacco dal supporto, illustrate in Figura 2, consistono in:

- Distacco di estremità;
- Distacco intermedio, a causa della presenza di fessure dovute alla flessione;
- Distacco a causa dalla presenza di fessure dovute al taglio;
- Distacco a causa di irregolarità della superficie del substrato.

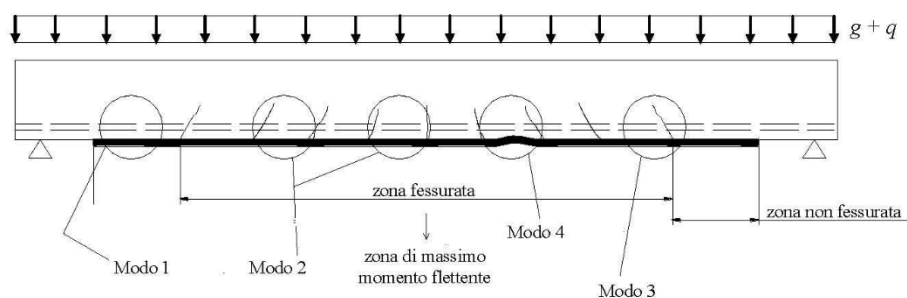


Figura 2: Modalità di rottura per distacco dal supporto [3]

6. Problemi speciali di progetto

Nel seguente paragrafo sono esaminati e discussi una serie di aspetti che possono influenzare la durabilità, il comportamento e l'efficacia del sistema di rinforzo in FRP e che pertanto devono essere adeguatamente tenuti in considerazione durante l'intera fase progettuale. In particolare, le proprietà meccaniche di materiali FRP presentano un degrado per effetto di azioni

ambientali o per effetto della modalità di carico. Nella tabella seguente sono riassunte schematicamente le principali problematiche di progetto.

Tabella 3: Problemi speciali di progetto

Gruppo di azioni	Azione
Ambientali	Ambiente alcalino
	Umidità
	Temperatura estrema e cicli termici
	Cicli di gelo e disgelo
	Radiazioni ultraviolette (UV)
Modalità di carico	Viscosità e rilassamento
	Fatica

6.1. Ambiente alcalino

L'ambiente alcalino che caratterizza la soluzione acquosa contenuta nei pori del calcestruzzo può, in alcuni casi, determinare fenomeni di degrado della resina e/o delle zone di interfaccia. Gli effetti provocati dall'ambiente alcalino si differenziano a seconda della tipologia di resina impiegata. Generalmente le resine epossidiche sono caratterizzate da una migliore resistenza all'ambiente alcalino, rispetto alle resine poliestere. Rispetto a queste ultime sono pertanto da preferire resine più resistenti, come ad esempio quelle di vinilestere.

Il danneggiamento della resina o delle fibre per effetto dell'azione di alcali deve essere sempre adeguatamente tenuto in considerazione. Al fine di ridurre il rischio di degrado del materiale composito, è opportuno che il processo di reticolazione della resina sia completato prima che si manifesti l'esposizione ad ambienti alcalini.

6.2. Umidità

L'umidità è un'azione di tipo ambientale che deve essere presa attentamente in considerazione, in quanto può indurre un degrado del composito in FRP, andando ad interessare principalmente la resina. L'assorbimento di umidità dipende da differenti fattori, tra cui la tipologia di resina, la composizione e la

qualità del sistema di rinforzo, lo spessore, le condizioni di maturazione, l'interfaccia resina-fibra e le condizioni di lavorazione.

Tra i principali effetti di degrado dovuti alla presenza di umidità possono essere annoverati:

- plasticizzazione della resina;
- riduzione della temperatura di transizione vetrosa;
- riduzione di resistenza del sistema di rinforzo;
- riduzione della rigidità del sistema di rinforzo.

6.3. Temperatura estrema e cicli termici

I materiali FRP realizzati con matrici polimeriche sono particolarmente sensibili all'azione della temperatura. Temperature estreme e/o cicli termici possono influire sul comportamento del sistema di rinforzo FRP, influenzandone la risposta viscosa della resina. In particolare, il modulo di elasticità normale della resina diminuisce all'aumentare della temperatura, causando un drastico decremento di resistenza e rigidità. L'efficienza e le prestazioni del sistema di rinforzo diminuiscono significativamente nel caso in cui la temperatura superi il valore della temperatura di transizione vetrosa della resina.

Generalmente l'effetto di cicli termici non è tale da produrre variazioni significative ma potrebbe indurre la formazione di microfratture.

Per tali motivi, il sistema di rinforzo deve essere adeguatamente progettato e realizzato, in modo che la temperatura di esercizio sia sempre inferiore alla temperatura di transizione vetrosa. I valori delle temperature di esercizio e di applicazione sono indicate nel Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

Tali fenomeni sono accentuati dall'esposizione alle alte temperature, come ad esempio quelle che possono prodursi in caso di incendio. Un ulteriore effetto dell'azione di alte temperature consiste nella diminuzione dell'aderenza tra il sistema di rinforzo ed il supporto, con conseguente distacco del composito dal substrato e perdita di efficacia dell'intervento stesso di rinforzo. In tali casi, è pertanto necessario adottare rivestimenti protettivi di spessore adeguato, al fine di garantire un mantenimento migliore delle proprietà meccaniche dei materiali FRP applicati esternamente agli elementi rinforzati.

6.4. Cicli di gelo e disgelo

L'esposizione a cicli di gelo e disgelo può causare un decadimento delle prestazioni del sistema di rinforzo, provocando il danneggiamento della resina e dell'interfaccia tra fibre e resina, a causa del verificarsi di distacchi. Generalmente, non si registrano effetti deleteri nei confronti delle fibre.

L'umidità può essere responsabile di un'amplificazione del degrado prodotto da cicli di gelo e disgelo, in quanto la natura ciclica di tale azione può favorire la crescita e la propagazione delle microfratture provocate dalla presenza di soluzioni saline in ambiente umido.

6.5. Radiazioni ultraviolette (UV)

Generalmente, le radiazioni ultraviolette (UV) non provocano degrado delle prestazioni meccaniche dei sistemi di rinforzo con materiali FRP. In alcuni casi, possono però verificarsi fenomeni di fragilizzazioni ed erosioni superficiali della resina.

Effetti negativi, quali la penetrazione di umidità e di altri agenti aggressivi attraverso la superficie danneggiata, possono però essere connessi alla presenza di radiazioni ultraviolette. Pertanto, è opportuno proteggere il sistema di rinforzo dall'azione di radiazioni ultraviolette, ad esempio mediante la predisposizione di idonei rivestimenti oppure attraverso l'aggiunta di additivi appropriati nella resina.

6.6. Viscosità e rilassamento

Le prestazioni del sistema di rinforzo in FRP possono essere influenzate da azioni legate alla modalità di carico, come ad esempio i fenomeni di viscosità e di rilassamento. In particolare, la resistenza e la deformazione a lungo termine del sistema di rinforzo in FRP dipendono dalle proprietà della resina e delle fibre. In genere le resine termoindurenti sono meno viscosi di quelle termoplastiche.

Inoltre, la viscosità delle resine è strettamente dipendente dalla presenza delle fibre: tali fenomeni risultano infatti più pronunciati nel caso di carichi applicati in direzione trasversale 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 opportunamente ridotta in fase progettuale, limitando le tensioni di esercizio nel composito.

6.7. Fatica

Generalmente non si riscontra un decadimento delle prestazioni dei materiali FRP a causa di fenomeni di fatica, poiché la presenza delle fibre contrasta in modo efficace la formazione di fessure, ostacolandone la propagazione.

6.8. Fattori di conversione ambientale e per effetti di lunga durata

Al fine di evitare l'insorgere di fenomeni di danneggiamento e di decadimento delle prestazioni del sistema di rinforzo in FRP, a causa delle azioni descritte nei paragrafi precedenti, il Progettista, in accordo ai paragrafi 3.5.1 e 3.5.2 della CNR-DT 200 R1/2013, può ridurre il valore di progetto, attraverso l'adozione di un fattore di conversione ambientale η_a e/o di un fattore di conversione per effetti di lunga durata η_l , rispettivamente per i casi di azioni di tipo ambientale o legate alla modalità di carico.

Tabella 4: Fattori di conversione ambientale

Condizione di esposizione	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

Tabella 5: Fattori di conversione per effetti di lunga durata (carichi di esercizio)

Modalità di carico	Fibra	Resina	η_t
Carico di lungo termine	Vetro	Epossidica	0.30
	Arammidica	Epossidica	0.50
	Carbonio	Epossidica	0.80
Ciclico	Tutte		0.50

Nel caso in cui sia previsto l'utilizzo di rivestimenti protettivi di comprovata affidabilità, per l'intero periodo di vita utile del sistema di rinforzo in FRP, i valori del fattore di conversione ambientale riportati in Tabella 4 possono essere incrementati del 10% e comunque non devono essere superiori al valore unitario.

6.9. Atti vandalici

La resistenza e l'efficienza del sistema di rinforzo possono essere influenzate da azioni provocate da atti vandalici, in quanto i materiali FRP mostrano una sensibilità particolare nei confronti, ad esempio, di incisioni e/o lacerazioni prodotte da strumenti di taglio.

Al fine di evitare tali problematiche, si suggerisce di adottare idonee misure di protezione del sistema di rinforzo in FRP nei confronti di eventi vandalici, soprattutto in caso di applicazione su elementi strutturali posizionati in aree accessibili. La sicurezza di tali elementi strutturali, nell'ipotesi di assenza del sistema di rinforzo per atto vandalico, deve essere verificata allo stato limite ultimo, considerando la combinazione di azioni quasi permanente ed i valori dei coefficienti parziali dei materiali per situazioni eccezionali.

7. Applicazione in opera del sistema di rinforzo

Considerata la natura particolare degli interventi di rinforzo in oggetto, le Imprese Appaltatrici e gli Applicatori devono possedere specifiche e comprovate competenze nell'applicazione dei materiali compositi su strutture di calcestruzzo e di muratura, da documentare attraverso precedenti esperienze. In particolare, deve essere dimostrata un adeguato livello di capacità, abilità ed esperienza del

personale preposto all'installazione, nei riguardi dell'applicazione di sistemi di rinforzo FRP a scopo strutturale. Durante l'esecuzione dell'intervento devono essere garantiti un'adeguata supervisione ed un idoneo controllo di qualità.

Le Imprese Appaltatrici e gli Applicatori devono altresì verificare la conformità dei prodotti alle prescrizioni indicate dal Progettista. In caso di indisponibilità di materiali con i requisiti indicati in fase di progettazione, le stesse devono concordare possibili alternative con il Progettista e/o con il Direttore dei Lavori. Al fine di garantire l'inalterabilità delle proprietà fisico-chimiche dei materiali che costituiscono il sistema di rinforzo, particolare attenzione deve essere prestata alle modalità di trasporto, stoccaggio, conservazione, movimentazione ed utilizzo degli stessi.

In particolare, generalmente, si consiglia di conservare fibre e resine in ambiente con temperatura compresa tra i 10 °C e i 24 °C, e grado di umidità inferiore al 20%, per evitare modifiche della reattività della miscela e delle proprietà della resina. Nella Scheda Tecnica del sistema di rinforzo è altresì indicato il tempo di stoccaggio, entro il quale il prodotto può essere impiegato per l'uso. È assolutamente da escludersi l'utilizzo di un costituente oltre il tempo di stoccaggio, oppure nei casi di deterioramento o contaminazione dello stesso.

Nel caso di impiego di lamine o elementi preformati, particolare attenzione deve essere prestata nei confronti di eventuali danneggiamenti a seguito di piegatura o inopportuna sovrapposizione.

Un apposito Manuale di Installazione è allegato dal Fornitore alla documentazione di accompagnamento di ogni lotto di spedizione. All'interno di tale documento sono fornite le istruzioni operative, al fine di una corretta applicazione del sistema di rinforzo in FRP, con particolare riguardo ai trattamenti da effettuare sul supporto prima dell'installazione.

Il punto di partenza del processo di esecuzione del sistema di rinforzo è rappresentato dal controllo delle condizioni del substrato e dall'adozione di misure atte alla eliminazione del deterioramento, con eventuale rimozione e ricostruzione delle porzioni ammalorate. Il Progettista ed il Direttore dei Lavori devono verificare le caratteristiche del substrato e valutarne lo stato di deterioramento, prima dell'applicazione del rinforzo. Il valore medio della resistenza a compressione del calcestruzzo deve essere necessariamente superiore a 15 MPa. In caso di danneggiamento del substrato per cause di natura

fisico-chimica, fisico-meccanica, deve essere prevista la rimozione dell'intera porzione interessata.

Se le barre di armatura sono interessate da fenomeni di corrosione, è necessario adottare idonei provvedimenti atti all'eliminazione delle cause del deterioramento del supporto, prima di procedere alla ricostruzione delle parti di calcestruzzo rimosse. In tal caso, è necessario rimuovere lo strato deteriorato mediante spazzolatura o sabbiatura e poi trattare la superficie con idonei inibitori di corrosione.

Successivamente alla rimozione di tutte le cause di degrado, si può procedere alla ricostruzione delle porzioni danneggiate e rimosse, mediante l'uso di betoncini reoplastici. Eventuali asperità superficiali superiori a 10 mm possono essere sottoposte a livellamento, ad esempio con stucco epossidico compatibile. In caso di profondità maggiori di 20 mm, è opportuno l'utilizzo di idonei materiali di apporto. Infine, si raccomanda di sigillare eventuali fessure di ampiezza superiore a 0.5 mm mediante iniezione, prima dell'applicazione del rinforzo.

Potrebbe inoltre essere opportuno ricorrere a interventi di sabbiatura della superficie interessata dal sistema di rinforzo, al fine di assicurare un grado di ruvidezza almeno pari a 0.3 mm. È necessario assicurarsi che le parti siano perfettamente pulite e che siano assenti eventuali *film* disarmanti, polveri, grassi, idrocarburi e tensioattivi.

Per quanto riguarda i casi che prevedono l'applicazione del sistema di rinforzo intorno agli spigoli, devono essere previsti opportuni interventi preventivi di arrotondamento degli stessi, allo scopo di evitare localizzazioni di tensioni, che possano condurre ad una rottura prematura del composito. Il raggio minimo di curvatura dell'arrotondamento deve essere maggiore o uguale a 20 mm.

Al fine di garantire un'esecuzione a regola d'arte del sistema di rinforzo con materiali compositi, si raccomanda di:

- tenere in considerazione le condizioni di temperatura e di umidità dell'ambiente, seguendo le indicazioni contenute nella Scheda Tecnica del sistema di rinforzo;
- evitare l'installazione del rinforzo con condizioni elevate di umidità, poiché queste ultime possono ritardare la stagionatura delle resine;

- adottare misure di protezione del rinforzo – ad esempio teli protettivi – nei casi di pioggia, eccessivo soleggiamento, forti gradienti termici, elevata umidità o presenza di polveri;
- prevedere una lunghezza minima di ancoraggio maggiore o uguale a 200 mm, oppure l'impiego di connettori meccanici;
- disporre le fibre secondo l'orientamento previsto in progetto, evitando ondulazioni;
- prevedere nel caso di sistemi di rinforzo con fibre di carbonio, ove necessario, strati di materiale isolante, al fine di evitare l'innescò di corrosione galvanica per contatto tra fibre e acciaio delle armature;
- predisporre zone aggiuntive di rinforzo (*testimoni*) in parti della struttura opportunamente selezionate, nella previsione di prove di controllo di tipo semi-distruttive;
- proteggere il sistema di rinforzo dall'azione diretta dell'irraggiamento solare – al fine di evitare alterazioni chimico-fisiche nella matrice epossidica – mediante l'impiego di vernici acriliche protettive, previa pulitura della superficie del composito o in alternativa mediante intonaci o malte, preferibilmente di natura cementizia, di adeguato spessore, previa preparazione della superficie mediante applicazione di resina epossidica e successivo spolvero “*fresco su fresco*” di polvere di quarzo;
- proteggere il sistema di rinforzo dall'azione del fuoco attraverso l'uso di pannelli intumescenti o l'applicazione di intonaci protettivi. Nella Scheda Tecnica del sistema è indicato il grado di protezione conseguibile in relazione allo spessore del rivestimento. Nel caso di impiego di pannelli, generalmente a base di calciosilicati, posati sul rinforzo tramite fissaggio con tasselli, deve essere assolutamente evitato il danneggiamento delle fibre per taglio o foratura.

8. Controlli di accettazione in cantiere

La figura del Direttore dei Lavori assume un ruolo di fondamentale importanza nel processo di accettazione dei materiali in cantiere, a causa del suo ruolo di tipo decisionale.

Al momento della consegna in cantiere, il Direttore dei Lavori deve verificare la provenienza dei materiali forniti e la loro rispondenza alle prescrizioni del Progettista, controllando le caratteristiche meccaniche e fisiche dei prodotti, avvalendosi delle corrispettive certificazioni.

Il Direttore Lavori deve accertarsi del possesso e del regime di validità del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego. L'elenco dei Certificati di Idoneità Tecnica all'Impiego emessi è pubblicato sul sito web del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Deve verificare che il prodotto presenti una resistenza nominale in accordo alle indicazioni progettuali e che lo stesso possa essere utilizzato all'interno dell'intervallo di temperature definito dal Progettista. Deve inoltre verificare che l'applicazione in opera del rinforzo sia eseguita in accordo alle temperature di applicazione indicate nel Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

Ai sensi del paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, tutti i materiali e prodotti per uso strutturale – nel caso specifico i sistemi di rinforzo in FRP preformati – devono essere accettati dal Direttore dei Lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione, finalizzate all'accertamento della qualità dei materiali e della corrispondenza dei risultati con i valori forniti dal Produttore o dal Fornitore. In base all'importanza ed all'entità dell'applicazione, il Direttore dei Lavori può richiedere l'esecuzione di specifiche prove, finalizzate alla verifica della resistenza al distacco del sistema di rinforzo dal supporto, rispetto alle previsioni progettuali.

Indicazioni riguardo i controlli di accettazione in cantiere sono contenute nella Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale “Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09

luglio 2015. **È obbligo e competenza del Direttore dei Lavori l'esecuzione di controlli di accettazione in cantiere di tipo meccanico.** I campioni devono riguardare tutti i rinforzi FRP preformati oggetto di fornitura, nell'ambito di ciascun lotto di spedizione. Le prove meccaniche devono essere effettuate entro 30 giorni, da un laboratorio autorizzato, di cui all'art. 59 del DPR 380/2001, con comprovata esperienza e strumentazione adeguata per prove su FRP.

Il Direttore dei Lavori, prima dell'accettazione e della messa in opera, deve verificare la presenza della marchiatura e rifiutare eventuali forniture non conformi.

Per ciascun sistema di rinforzo preformato, devono essere ricavati 3 campioni, in riferimento ad ogni lotto di spedizione e comunque ogni 500 mq o frazione di sistema di rinforzo, sempre che il marchio e la documentazione di accompagnamento dimostrino la provenienza del sistema di rinforzo da uno stesso stabilimento. Sono inoltre prescritti controlli riguardanti le caratteristiche della resina – adesivo, in ragione di un provino ogni lotto di spedizione, al fine di verificarne la conformità con le indicazioni fornite dal Produttore e riportate nel Manuale di Installazione.

Ai fini del controllo di accettazione, i valori della tensione di rottura a trazione e del modulo elastico, entrambi nella direzione delle fibre, devono risultare non inferiori a quelli nominali, indicati nella Tabella 2, e le proprietà della resina – adesivo devono essere in accordo con i valori dichiarati dal Produttore.

Al fine della validità della certificazione emessa dal Laboratorio, la richiesta di prove deve essere sottoscritta dal Direttore dei Lavori. Il Direttore dei Lavori deve assicurare, mediante l'apposizione di sigle, etichettature indelebili, ecc., che i campioni inviati al Laboratorio siano effettivamente quelli da lui prelevati.

In caso di esito negativo delle prove di tipo meccanico, le stesse devono essere ripetute su ulteriori 3 campioni provenienti da prodotti appartenenti allo stesso lotto. Quest'ultimo può essere considerato conforme se i valori delle caratteristiche meccaniche di tutti e tre i campioni da esaminare, risultano maggiori o uguali del competente valore di accettazione. Viceversa, sia il provino – presenza di eventuali difetti – sia il metodo di prova – eventuale errore occorso durante l'esecuzione della prova – devono essere attentamente analizzati. **In caso di esito negativo della prova, il Direttore dei Lavori deve darne comunicazione al Servizio Tecnico Centrale e l'intero lotto di spedizione deve**

essere considerato non conforme e come tale non deve essere utilizzato per il previsto rinforzo strutturale.

I contenuti minimi dei certificati emessi dai laboratori sono:

- identificazione del laboratorio che rilascia il certificato;
- identificazione univoca del certificato (numero di serie e data di emissione)
- identificazione di ciascuna sua pagina, oltre al numero totale di pagine;
- identificazione del committente dei lavori in esecuzione e del cantiere di riferimento;
- nominativo del Direttore dei Lavori che richiede la prova;
- descrizione e identificazione dei campioni sottoposti a prova, con indicazione della relativa marcatura ove non reperibile sui campioni;
- estremi del verbale del prelievo sottoscritto dal Direttore dei Lavori;
- data di ricevimento dei campioni e di esecuzione delle prove;
- identificazione della norma di riferimento per l'esecuzione della prova;
- dimensioni effettivamente misurate dei campioni;
- valori delle grandezze misurate;
- indicazione del marchio identificativo rilevato dal Laboratorio incaricato sui campioni da sottoporre a prove.

In fase di accettazione, **il Direttore dei Lavori deve verificare che i prodotti costituenti ciascun lotto di spedizione siano coperti da un Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego in regime di validità. Una copia deve inoltre essere allegata ai documenti di trasporto.** Nel caso di materiali e prodotti recanti la Marcatura CE, il Direttore dei Lavori deve accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere ad ogni Fornitore, per ogni diverso prodotto, il Certificato ovvero Dichiarazione di Conformità alla parte armonizzata della specifica norma europea.

In ogni caso, il Direttore dei Lavori deve verificare che i prodotti consegnati in cantiere rientrino nelle tipologie previste nella detta documentazione.

Ai fini della rintracciabilità dei prodotti, l'Appaltatore deve garantire l'archiviazione e la disponibilità della documentazione di accompagnamento dei materiali, comprese marcature, etichette di riconoscimento ed eventuali annotazioni del Direttore dei lavori, fino al completamento delle operazioni di collaudo statico e, ove previsto, tecnico-amministrativo.

Specifiche ed ulteriori prescrizioni sono richieste in caso di impiego di sistemi di rinforzo preformati prodotti da Produttori qualificati, come precedentemente descritto, ma forniti da soggetti differenti, con un proprio marchio o logo:

- esistenza di un sistema di gestione della qualità dei soggetti fornitori, coerente con la norma UNI EN 9001 e certificato da un organismo terzo indipendente, di adeguata competenza e organizzazione, che operi nel rispetto della norma UNI EN 17021:2006;
- dichiarazione da parte dei soggetti fornitori al Servizio Tecnico Centrale della loro attività, contenente l'impegno a commercializzare, con un proprio logo o marchio, esclusivamente sistemi di rinforzo preformati qualificati all'origine, senza alcuna trasformazione;
- conferma annuale della suddetta dichiarazione al Servizio Tecnico Centrale;
- presenza di una documentazione di accompagnamento dei sistemi di rinforzo consegnati in cantiere, con indicazione del soggetto fornitore;
- indicazione sul Documento di Trasporto degli estremi dell'attestato di avvenuta dichiarazione di attività, rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale, recante il logo o il marchio del soggetto fornitore.

È obbligo e competenza del Direttore dei Lavori verificare quanto sopra indicato e rifiutare eventuali forniture non conformi. Il collaudatore, preso atto della suddetta documentazione, deve riportare gli estremi del soggetto fornitore all'interno del Certificato di Collaudo.

Tutti gli adempimenti di cui sopra sono richiesti anche in caso di sistemi di rinforzo preformati provenienti dall'estero. In caso di esistenza di una certificazione riconosciuta dalle rispettive Autorità estere competenti, in alternativa alla richiesta del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego, può essere inoltrata al Servizio Tecnico Centrale una richiesta di riconoscimento dell'equivalenza della procedura adottata nel Paese di origine. L'equivalenza è sancita con provvedimento del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

9. Prove non distruttive e semi-distruttive

Ai fini del controllo e dell'eventuale monitoraggio nel tempo del sistema di rinforzo, è possibile ricorrere a prove di tipo non distruttivo e semi-distruttivo. Le prime sono utilizzate principalmente per la rilevazione di eventuali difetti nella realizzazione, mentre le seconde permettono di caratterizzare le proprietà meccaniche del sistema di rinforzo. Per quanto concerne la tipologia di prove da effettuarsi e la loro numerosità devono essere adeguatamente tenute in considerazione l'importanza dell'intervento e l'incidenza delle zone trattate nei confronti delle dimensioni della struttura.

9.1. Prove non distruttive

Le prove di tipo non distruttivo comunemente impiegate per rilevare la presenza di eventuali difetti nella realizzazione del sistema di rinforzo sono:

- Prove di tipo acustico stimolato;
- Prove ultrasoniche ad alta frequenza;
- Prove termografiche;
- Prove in emissione acustica.

Le prove di tipo acustico stimolato sono fondate sul diverso comportamento oscillatorio dello strato di composito con o senza adesione con il substrato. Possono essere eseguite tramite percussione della superficie del composito di tipo manuale oppure automatizzata.

Le prove ultrasoniche ad alta frequenza sono basate sul fenomeno della riflessione, adottando frequenze superiori a 1.0 MHz – a causa della entità degli spessori in gioco – e sonde con diametro inferiore a 25 mm. Ai fini della localizzazione dei difetti, buoni risultati si ottengono mediante la tecnica basata sulla variazione dell'ampiezza del primo picco.

Nel caso di sistemi di rinforzo costituiti da fibre in vetro o arammidiche, caratterizzati da una bassa conducibilità termica, si dimostrano efficaci prove termografiche. Si sconsiglia l'uso delle stesse nel caso di compositi realizzati con fibre di carbonio. È importante sottolineare che deve essere assolutamente evitato il danneggiamento del rinforzo per effetto del riscaldamento impartito nel corso della prova, che non deve essere eccessivamente prossimo alla temperatura di transizione vetrosa.

Le prove in emissione acustica, utilizzate per rilevare la presenza di difetti di incollaggio, sono basate sulla registrazione dei rumori generati dalla formazione di fessure e distacchi tra substrato e rinforzo.

9.2. Prove semi-distruttive

Le prove di tipo semi-distruttivo consistono in prove di strappo normale e prove di strappo a taglio. Entrambe le tipologie di prova devono essere effettuate in zone aggiuntive di rinforzo (*testimoni*), e se possibile anche in zone del sistema di rinforzo non critiche.

La prova di strappo normale viene utilizzata per accertare le proprietà del substrato. Generalmente si ricorre all'impiego di piastre in acciaio, di forma circolare, aventi spessore pari a 20 mm e diametro non inferiore a 50 mm. Prima dell'esecuzione della prova, il rinforzo è ritagliato lungo il bordo della piastra, mediante l'utilizzo di una fresa cilindrica retta di spessore non maggiore di 3 mm. Particolare attenzione deve essere prestata in tale fase, al fine di evitare il surriscaldamento del composito. Il substrato viene quindi contestualmente inciso per una profondità di almeno 2 mm. Durante l'esecuzione della prova, deve essere sempre garantita l'ortogonalità della direzione di applicazione della forza di strappo alla superficie del rinforzo.

La superficie di strappo deve essere contenuta all'interno del substrato e non deve coincidere con l'interfaccia composito-substrato.

La prova di strappo a taglio viene impiegata per accertare l'efficacia dell'incollaggio e della preventiva preparazione del supporto. Possono essere eseguite prove di strappo a taglio di tipo diretto e indiretto.

Nel caso di prova di tipo diretto (Figura 3), la stessa viene eseguita in corrispondenza di uno spigolo libero della struttura, su cui è incollato il rinforzo, lasciandone un'opportuna porzione libera, cioè non incollata, in continuità del materiale incollato. Su quest'ultima viene quindi applicata l'azione radente, impiegando il suddetto spigolo come contrasto.

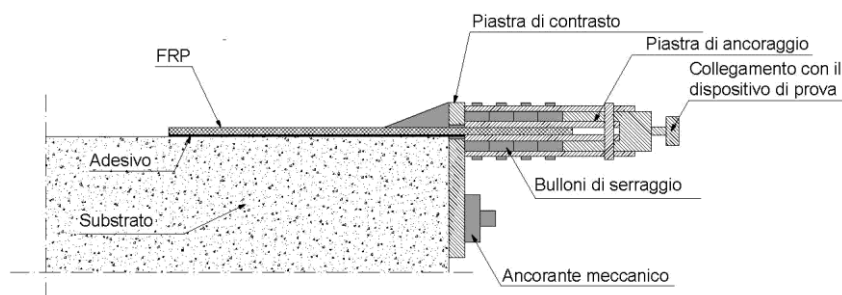


Figura 3: Prova di strappo a taglio di tipo diretto [3]

Nel caso di prova di tipo indiretto (Figura 4), in assenza di testimoni, la prova è eseguita direttamente su un rinforzo realizzato, in prossimità di uno spigolo della struttura. Preventivamente all'esecuzione della prova, il materiale composito è sezionato dalla parte rimanente e sulla faccia a vista è incollata una piastra metallica, caratterizzata dalla presenza di una parte aggettante rispetto allo spigolo, atta all'afferraggio da parte del dispositivo di prova. Generalmente la piastra presenta una larghezza non inferiore a 45 mm ed uno spessore non superiore a 6 mm. Al fine di assicurare una idonea aderenza, sulla faccia a contatto con il composito è consigliata la presenza di scanalature.

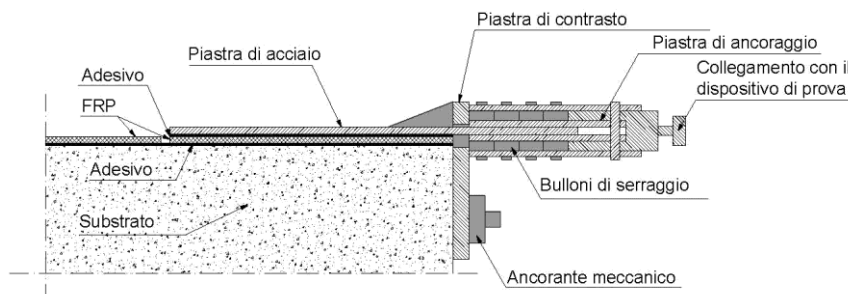


Figura 4: Prova di strappo a taglio di tipo indiretto [3]

Per entrambi i tipi di prova, la lunghezza della porzione di FRP incollata deve risultare non inferiore a 200 mm nel caso di strutture di c.a. e comunque superiore a 1.1 volte la lunghezza ottimale di ancoraggio del rinforzo di FRP.

10. Barre di materiale composito fibrorinforzato

Il presente paragrafo è dedicato all'impiego di barre di materiale composito fibrorinforzato come armatura in getti di calcestruzzo cementizio. Nel seguito si farà riferimento alla CNR-DT 203/2006 *"Istruzioni per la Progettazione,*

l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato”.

Le barre di FRP sono realizzate con resine termoindurenti e fibre di diverso materiale, vetro (GFRP), carbonio (CFRP) o arammide (AFRP). La loro sezione trasversale può essere di forma diversa, rettangolare, rotonda, piena o cava. Generalmente sono prodotte tramite processi di pultrusione, cui segue un successivo trattamento allo scopo di realizzare sistemi idonei a garantire una migliore aderenza tra la barra ed il conglomerato cementizio, quali ad esempio la realizzazione di nervature tramite avvolgimento in direzione elicoidale di filamenti di fibre attorno alla sezione, processi di smerigliatura o di sabbiatura delle superfici della barra o l'esecuzione di nervature in sola resina mediante stampaggio.

L'impiego di barre di materiale composito fibrorinforzato in sostituzione dell'acciaio trova un'ampia diffusione in virtù dei suoi molteplici vantaggi, tra cui la proprietà di non essere suscettibili ai fenomeni di corrosione. Ne consegue che il loro utilizzo si dimostra particolarmente vantaggioso in opere esposte ad ambienti molto aggressivi.

Una importante proprietà dei compositi a base di fibre di vetro (GFRP) consiste inoltre nel fatto di non essere conduttori, con conseguenti vantaggi nell'impiego in elementi esposti a correnti vaganti, come ad esempio strutture a servizio del trasporto su rotaia o anche le solette di ponti stradali, utilizzati come cavalcavia ferroviari.

Ulteriori campi in cui l'impiego di barre di materiale composito fibrorinforzato trova diffusione sono quelli della realizzazione di strutture provvisorie o di rivestimenti di gallerie.

10.1. Caratteristiche geometriche e proprietà meccaniche

Da un punto di vista geometrico, le barre, considerata la loro varietà di produzione, sono caratterizzate in termini di una sezione retta circolare equivalente o nominale, avente diametro ed area definiti in modo opportuno. Per maggiori dettagli riguardo la determinazione delle proprietà geometriche si rimanda all'Appendice B della CNR-DT 203/2006.

Per quanto concerne le proprietà meccaniche delle barre, è importante evidenziare la loro dipendenza dalla tipologia di matrice impiegata nonché dal

tipo e dalla frazione volumetrica delle fibre. Ai fini della determinazione del modulo elastico e della resistenza a rottura a trazione, considerata la disposizione monodirezionale delle fibre, può essere utilizzata la regola delle miscele. Tuttavia tale metodologia non tiene in considerazione importanti parametri legati al livello qualitativo della tecnica di produzione, quali l'aderenza tra fibre e matrice, la presenza di difetti di produzione e di vuoti o di imperfezioni nella distribuzione o nell'allineamento delle fibre. Una migliore valutazione delle proprietà meccaniche della barra in FRP è ottenuta mediante l'esecuzione di prove sperimentali. I valori del modulo elastico e della resistenza a rottura a trazione forniti dal Produttore sono riferiti all'area equivalente della barra.

Per uso strutturale possono essere impiegate barre caratterizzate da un valore caratteristico della resistenza non inferiore a 400 MPa ed un valore medio del modulo di elasticità a trazione in direzione longitudinale non inferiore a 100 GPa per le barre con fibre di carbonio, a 35 GPa per quelle con fibre di vetro ed a 65 GPa per quelle con fibre aramidiche.

Il coefficiente di dilatazione termica dipende dalla direzione considerata e dalle singole fasi – matrice e fibre – che costituiscono la barra. Valori tipici dei coefficienti di dilatazione termica longitudinale α_l e trasversale α_t sono riportati nella successiva Tabella 6, con riferimento a barre caratterizzate da una frazione volumetrica di fibre compresa tra il 50% ed il 70%.

Tabella 6: Coefficienti di dilatazione termica

Materiale	α_l [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	α_t [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]
AFRP	-6.0 ÷ -2.0	60.0 ÷ 80.0
CFRP	-2.0 ÷ 0.0	23.0 ÷ 32.0
GFRP	6.0 ÷ 10.0	21.0 ÷ 23.0

Come si può notare dai valori dei coefficienti di dilatazione termica riportati nella Tabella 6, a causa dell'entità delle dilatazioni termiche trasversali prevedibili e dell'effetto Poisson relativamente al caso di armature soggette a compressione, possono svilupparsi fessurazioni indotte dalle tensioni circonferenziali di trazione nel ricoprimento. Per tali ragioni, si suggerisce l'adozione di un idoneo spessore di ricoprimento.

Un ulteriore fenomeno che incide sulle proprietà meccaniche delle barre di materiale composito fibrorinforzato è quello della fatica statica o creep rupture, a causa del quale si verifica una progressiva diminuzione della resistenza in presenza di carichi di lunga durata. Fattori di tipo ambientale, quali temperatura e umidità, influenzano inoltre fortemente tale fenomeno.

10.2. Problemi speciali di progetto

Come evidenziato precedentemente al paragrafo 6, nei riguardi dei sistemi di rinforzo preformati, le proprietà meccaniche delle barre di FRP – resistenza a trazione, deformazione ultima e modulo di elasticità normale – presentano un degrado in presenza di determinate condizioni ambientali, quali ambiente alcalino ed umidità (acqua e soluzioni saline), oppure di fenomeni reologici, quali viscosità, rilassamento e fatica.

Nelle successive tabelle sono riportati, per diversi tipi di barre, i valori dei fattori di conversione ambientale η_a al variare della condizione di esposizione della struttura ed i valori dei fattori di conversione per effetti di lunga durata η_l .

Tabella 4: Fattori di conversione ambientale η_a

Condizione di esposizione	Fibra	Resina	η_a
Calcestruzzo non esposto ad ambiente umido	Carbonio	Vinilestere o epossidica	1.0
	Vetro	Vinilestere o epossidica	0.8
	Arammidica	Vinilestere o epossidica	0.9
Calcestruzzo esposto ad ambiente umido	Carbonio	Vinilestere o epossidica	0.9
	Vetro	Vinilestere o epossidica	0.7
	Arammidica	Vinilestere o epossidica	0.8

Tabella 5: Fattori di conversione per effetti di lunga durata

Modalità di carico	Fibra	Resina	η_a (SLE)	η_a (SLU)
Quasi permanente e/o ciclico (viscosità, rilassamento e fatica)	Vetro	Vinilestere o epossidica	0.30	1.00
	Arammidica	Vinilestere o epossidica	0.50	1.00
	Carbonio	Vinilestere o epossidica	0.90	1.00

Nel caso di strutture a carattere provvisoria è consentita l'adozione di un fattore di conversione ambientale η_a unitario. In tal caso è ammesso anche l'uso di resine poliestere.

10.3. Compiti degli operatori coinvolti

10.3.1. Compiti del Produttore

Al fine dell'utilizzo di barre di materiale composito fibrorinforzato per scopo strutturale, si richiedono una certificazione ed un controllo della produzione, in modo tale da assicurare il mantenimento di un livello adeguato delle proprietà geometriche, meccaniche e fisiche.

In particolare, il Produttore deve adottare un sistema di controllo della produzione in fabbrica ed utilizzare elementi base – fibre e resine – certificati dai relativi fornitori e quindi anch'essi soggetti a controlli continui della produzione. Al fine di assicurare la rispondenza di ogni lotto di fabbricazione con le specifiche dichiarate, il Produttore deve fornire i certificati di prova dei diversi prodotti. Per garantire la rintracciabilità, ogni prodotto deve riportare una marchiatura oppure essere accompagnato da etichette o cartellini riportanti tutte le informazioni necessarie per la loro identificazione.

Tutti i prodotti devono essere accompagnati da una Scheda Tecnica, predisposta dal Produttore. Un esempio di Scheda Tecnica per barre di materiale composito fibrorinforzato è contenuta nell'Appendice C della CNR-DT 203/2006, e riportata in Appendice al presente Quaderno Tecnico.

Attualmente non sono state ancora emanate Linee Guida da parte del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, per il rilascio del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego, necessario per l'uso strutturale di barre di FRP.

Il Produttore ha comunque la facoltà di richiedere al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici il rilascio del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego.

10.3.2. Compiti del Progettista

Il progettista deve indicare chiaramente nel progetto la qualità e le caratteristiche geometriche, meccaniche e fisiche delle barre di materiale composito fibrorinforzato. Deve inoltre specificare i criteri di accettazione delle barre di FRP,

inclusi i requisiti minimi di accettazione, indicando al Direttore dei Lavori i prelievi e le prove da effettuare. Può suggerire ad esempio l'esecuzione di prove finalizzate alla valutazione delle caratteristiche geometriche, meccaniche e fisiche, che devono essere in accordo con quelle riportate dal Produttore all'interno delle Schede Tecniche.

Per il calcolo di elementi con barre di FRP, occorre fare riferimento alla CNR-DT 203/2006. È importante sottolineare che il calcolo è svolto secondo i principi teorici della tradizionale teoria del calcestruzzo armato con barre di acciaio. La differenza sostanziale rispetto al caso di barre di acciaio consiste nel diverso comportamento meccanico delle barre di materiale composito fibrorinforzato, caratterizzate da un legame costitutivo essenzialmente elastico lineare fino a rottura.

10.3.3. Compiti del Direttore dei Lavori e del Collaudatore

Il Direttore dei Lavori svolge un ruolo di primaria importanza nei riguardi dell'accettazione dei prodotti, in quanto deve:

- **accertare il possesso ed il regime di validità del Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego;**
- verificare, sia in fase di appalto delle forniture sia al momento della consegna, la conformità del materiale fornito con le prescrizioni del Progettista;
- verificare la provenienza del materiale fornito, mediante controllo della marchiatura, delle etichette o dei cartellini;
- verificare le caratteristiche geometriche, meccaniche e fisiche delle barre di FRP, mediante analisi dei certificati di prova;
- richiedere l'esecuzione di eventuali prove sperimentali per la valutazione della qualità dei materiali e per la verifica della corrispondenza dei risultati con i valori forniti dal Produttore;
- nel caso non siano disponibili materiali con i requisiti indicati in fase progettuale, deve concordare possibili alternative con il Progettista.

Il Collaudatore deve:

- verificare la qualità dei materiali impiegati mediante i certificati di accompagnamento alle forniture;

- verificare l'accettazione dei materiali da parte del Direttore dei Lavori;
- verificare i risultati delle eventuali prove sperimentali di accettazione richieste dal Direttore dei Lavori.

Appendice A: Esempio di Scheda Tecnica per sistemi di rinforzo preformati

Il produttore deve riportare i valori statistici necessari per la valutazione delle resistenze caratteristiche (ad esempio media, scarto quadratico medio, popolazione, frattile, intervallo di confidenza).

Descrizione

Nome commerciale, tipo di fibra, tipo di resina, marcatura ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

Caratteristiche geometriche e fisiche

Proprietà		Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
Spessore (lamina/laminato)		[mm]	
Larghezza		[mm]	
Lunghezza		[mm]	
Colore			
Densità	Fibra	[g/cm ³]	ISO 1183-1:2004(E)
	Matrice	[g/cm ³]	
Contenuto di fibra	In peso	[%]	ISO 11667:1997(E)
	In volume	[%]	
Temperatura di transizione vetrosa della resina		[°C]	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E1640 (DMA)
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo		[°C]	
Resistenza e reazione al fuoco			

Proprietà meccaniche

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
Modulo di elasticità normale a trazione	[GPa]	UNI-EN 13706-1-2-3
Resistenza a trazione (valore medio e caratteristico)	[MPa]	
Deformazione a rottura a trazione	[%]	

Condizioni di stoccaggio

Descrizione

Precauzioni d'uso e sicurezza

Descrizione

Indicazioni sull'utilizzo del prodotto in un sistema di rinforzo

Descrizione

Appendice B: Esempio di Scheda Tecnica per barre di materiale composito fibrorinforzato

Il produttore deve riportare i valori statistici necessari per la valutazione delle resistenze caratteristiche (ad esempio media, scarto quadratico medio, popolazione, frattile, intervallo di confidenza).

Descrizione

Nome commerciale, tipo di fibra, tipo di resina, tecnologia di produzione, marchiatura ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

Caratteristiche geometriche e fisiche

Proprietà		Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento	Note
Geometria della sezione delle barre			CNR-DT 203/2006: Appendice B	
Area equivalente delle barre		[mm ²]	CNR-DT 203/2006: Appendice B	
Perimetro equivalente delle barre		[mm]	CNR-DT 203/2006: Appendice B	(1)
Colore				
Densità	Fibra	[g/cm ³]	ISO 1183-1:2004(E)	(2)
	Matrice	[g/cm ³]		
Contenuto di fibra	In peso	[%]	ISO 11667:1997(E)	
	In volume	[%]		
Temperatura di transizione vetrosa della resina		[°C]	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E1640 (DMA)	
Temperatura limite massima di utilizzo		[°C]		
Conducibilità elettrica		S/m		

(1) Valore utile per il calcolo della lunghezza di ancoraggio nel caso di barre di sezione non circolare.

(2) Valore utile per il calcolo della frazione in peso di fibra quando è nota quella in volume o viceversa.

Proprietà meccaniche

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento	Note
Modulo di elasticità normale a trazione	GPa	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
Resistenza a trazione (valore medio e caratteristico)	MPa	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
Deformazione a rottura a trazione	%	Appendice B / ISO 527-4,5:1997(E)	
Resistenza a creep		ISO 899-1:2003(E)	(3)
Rilassamento (barre, cavi)			(4)
Aderenza: tensione tangenziale (barre, cavi)		Prova di pull-out	(4)

3) La ISO 899-1:2003(E) è la Normativa di riferimento generale per la determinazione del comportamento a creep di materiali polimerici rinforzati (compositi) o non, mentre per le barre per armatura ed i cavi di precompressione è in preparazione una norma ISO (TC71/SC6N): "Non-conventional reinforcement of concrete - Test methods-Part 1: Fiber reinforced polymer (FRP) bars and grids" in cui è proposta una prova specifica per le barre di FRP ("Test Method for creep failure"). In alternativa esiste una prova proposta nel documento ACI 440.3R-04 "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures" dal titolo: "Test Method for creep rupture of FRP bars"

(4) Nella norma ISO (TC71/SC6N) riguardante barre e cavi di FRP sono proposte le due seguenti prove: "Test method for bond strength by pull-out testing" per l'aderenza e "Test Method for long-term relaxation" per il rilassamento. Prove analoghe sono previste nel documento ACI 440.3R-04.

Condizioni di stoccaggio

Descrizione

Precauzioni d'uso e sicurezza

Descrizione

Appendice C: Esempio di calcolo di rinforzo a flessione di una soletta in c.a.

Il calcolo della resistenza flessionale della sezione rinforzata è effettuato in accordo alla CNR-DT 200 R1/2013, utilizzando le equazioni di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e di equilibrio alla rotazione intorno all'asse baricentrico della sezione di solo calcestruzzo. In Figura 5 è mostrata la modalità di rottura della sezione in oggetto: si distinguono due zone, contrassegnate dai numeri 1 e 2, nelle quali la rottura viene attinta rispettivamente, per raggiungimento della deformazione massima del tessuto in FRP o della deformazione ultima del calcestruzzo.

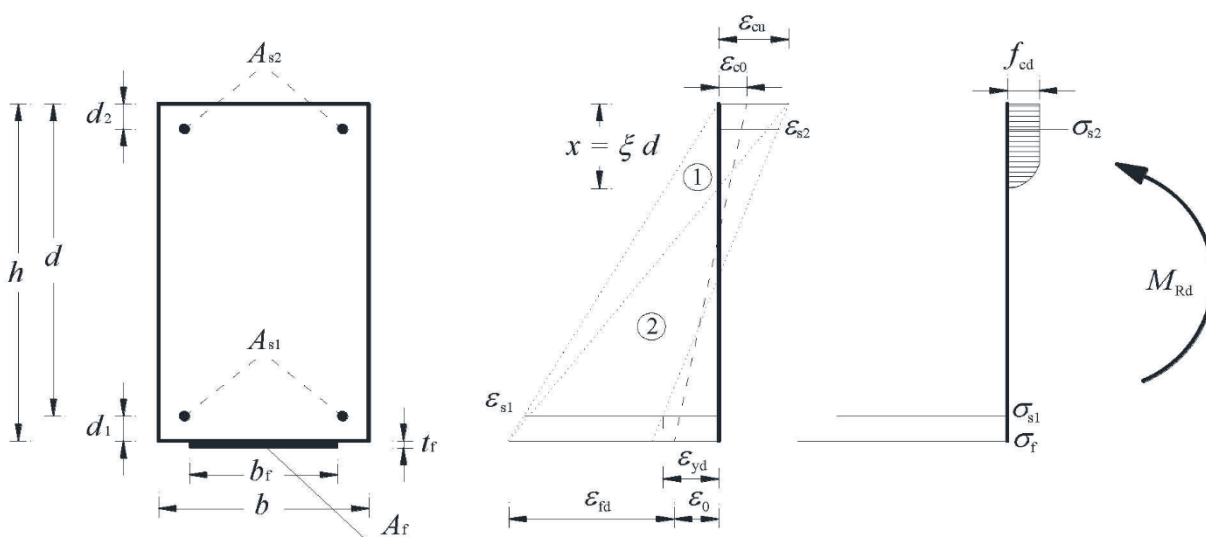


Figura 5: Modalità di rottura sezione in c.a. rinforzata con tessuti in FRP [3]

Il calcolo è effettuato ipotizzando una soletta in c.a. avente larghezza e altezza pari rispettivamente a 1000 mm e 200 mm, e due differenti disposizioni di barre di armatura, uguali a 5Ø14 sup. + inf. e 5Ø16 sup. + inf..

Nelle tabelle seguenti sono riportati i dati geometrici, le caratteristiche meccaniche dei diversi materiali – calcestruzzo, acciaio e FRP – ed i risultati delle verifiche effettuate.

Caso n.1: 5Ø14 sup. + inf.**Dati geometrici**

Base	b	1000 mm
Altezza	h	200 mm
Copriferro	δ	30 mm
Altezza utile	$d=h-\delta$	170 mm
Diametro barre superiori	$\varnothing_{sup}$	14 mm
Numero barre superiori	n_{sup}	5
Area barre superiori	$A_{sup} = n_{sup} \cdot \pi \varnothing_{sup}^2 / 4$	769 mm ²
Diametro barre inferiori	$\varnothing_{sup}$	14 mm
Numero barre inferiori	n_{inf}	5
Area barre inferiori	$A_{inf} = n_{inf} \cdot \pi \varnothing_{sup}^2 / 4$	769 mm ²
Spessore della lamina	t_{fb}	1.4 mm
Larghezza della lamina	b_l	100 mm
Numero di lamine	n_f	5
Larghezza del rinforzo	$b_f = b_l \cdot n_f$	500 mm
Area del rinforzo	$A_f = t_{fb} \cdot b_f$	700 mm ²

Materiali

Calcestruzzo		
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	f_{ck}	25 MPa
Resistenza media cilindrica a compressione	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$	33 MPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_c	1.5
Fattore di confidenza	FC	1.35
Resistenza di progetto cilindrica a compressione	$f_{cd} = f_{cm} / (\gamma_c \cdot FC)$	16.3 MPa
Resistenza media a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3}$	2.56 MPa
Deformazione ultima	ϵ_{cu}	0.0035

Acciaio		
Resistenza caratteristica di snervamento	f_{yk}	450 MPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_s	1.15
Fattore di confidenza	FC	1.35
Resistenza di progetto di snervamento	$f_{yd} = f_{yk} / (\gamma_s \cdot FC)$	289.8 MPa
Deformazione ultima	ϵ_{su}	0.1
Modulo elastico	E_s	210 GPa

Tessuto in fibra di carbonio (Classe 210C)		
Resistenza caratteristica a trazione nella direzione delle fibre	f_{fk}	1800 MPa
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	E_f	150 GPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_f	1.1
Deformazione a rottura	ε_{fk}	0.012
Coefficiente parziale per distacco dal supporto	$\gamma_{f,d}$	1.2
Fattore di conversione ambientale	η_a	0.85
Coefficiente geometrico	$k_b = [(2 \cdot b_f / b) / (1 + b_f / b)]^{0.5} \geq 1$	1
Coefficiente correttivo di tipo sperimentale	$k_{G,2}$	0.10 mm
Fattore di confidenza	FC	1.35
Coefficiente condizione di carico	$k_q = (1.25 \text{ per carichi distribuiti, 1 altri casi})$	1.25
Tensione massima per distacco intermedio	$f_{fdd,2} = k_q / \gamma_{f,d} \cdot [E_f \cdot 2 \cdot k_b \cdot k_{G,2} / (t_f \cdot FC) \cdot (f_{cm} \cdot f_{ctm})^{0.5}]^{0.5}$	398 MPa
Deformazione massima per distacco intermedio	$\varepsilon_{fdd} = f_{fdd,2} / E_f$	$2.654 \cdot 10^{-3}$
Deformazione massima	$\varepsilon_{fd} = \min(\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f, \varepsilon_{fdd})$	$2.654 \cdot 10^{-3}$

Calcolo del momento ultimo

Calcestruzzo		
Momento carichi SLE	M_o	2.5 kNm
Deformazione iniziale del calcestruzzo, lembo teso	$\varepsilon_o = M_o / (0.9 \cdot d \cdot E_s \cdot A_{sup})$	$1.01 \cdot 10^{-4}$
Momento ultimo	M_u	86 kNm
Momento agente SLU	M_{Sd}	85.0 kNm

Caso n.1: 5Ø16 sup. + inf.**Dati geometrici**

Base	b	1000 mm
Altezza	h	200 mm
Copriferro	δ	30 mm
Altezza utile	$d=h-\delta$	170 mm
Diametro barre superiori	$\varnothing_{sup}$	16 mm
Numero barre superiori	n_{sup}	5
Area barre superiori	$A_{sup} = n_{sup} \cdot \pi \varnothing_{sup}^2 / 4$	1005 mm ²
Diametro barre inferiori	$\varnothing_{sup}$	16 mm
Numero barre inferiori	n_{inf}	5
Area barre inferiori	$A_{inf} = n_{inf} \cdot \pi \varnothing_{sup}^2 / 4$	1005 mm ²
Spessore della lamina	t_{fb}	1.4 mm
Larghezza della lamina	b_l	100 mm
Numero di lamine	n_f	4
Larghezza del rinforzo	$b_f = b_l \cdot n_f$	400 mm
Area del rinforzo	$A_f = t_{fb} \cdot b_f$	560 mm ²

Materiali

Calcestruzzo		
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	f_{ck}	25 MPa
Resistenza media cilindrica a compressione	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$	33 MPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_c	1.5
Fattore di confidenza	FC	1.35
Resistenza di progetto cilindrica a compressione	$f_{cd} = f_{cm} / (\gamma_c \cdot FC)$	16.3 MPa
Resistenza media a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3}$	2.56 MPa
Deformazione ultima	ϵ_{cu}	0.0035

Acciaio		
Resistenza caratteristica di snervamento	f_{yk}	450 MPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_s	1.15
Fattore di confidenza	FC	1.35
Resistenza di progetto di snervamento	$f_{yd} = f_{yk} / (\gamma_s \cdot FC)$	289.8 MPa
Deformazione ultima	ϵ_{su}	0.1
Modulo elastico	E_s	210 GPa

Tessuto in fibra di carbonio (Classe 210C)		
Resistenza caratteristica a trazione nella direzione delle fibre	f_{fk}	1800 MPa
Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre	E_f	150 GPa
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	γ_f	1.1
Deformazione a rottura	ε_{fk}	0.012
Coefficiente parziale per distacco dal supporto	$\gamma_{f,d}$	1.2
Fattore di conversione ambientale	η_a	0.85
Coefficiente geometrico	$k_b = [(2 \cdot b_f / b) / (1 + b_f / b)]^{0.5} \geq 1$	1.069
Coefficiente correttivo di tipo sperimentale	$k_{G,2}$	0.10 mm
Fattore di confidenza	FC	1.35
Coefficiente condizione di carico	$k_q = (1.25 \text{ per carichi distribuiti, } 1 \text{ altri casi})$	1.25
Tensione massima per distacco intermedio	$f_{fdd,2} = k_q / \gamma_{f,d} \cdot [E_f \cdot 2 \cdot k_b \cdot k_{G,2} / (t_f \cdot FC) \cdot (f_{cm} \cdot f_{ctm})^{0.5}]^{0.5}$	411 MPa
Deformazione massima per distacco intermedio	$\varepsilon_{fdd} = f_{fdd,2} / E_f$	$2.744 \cdot 10^{-3}$
Deformazione massima	$\varepsilon_{fd} = \min(\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f, \varepsilon_{fdd})$	$2.744 \cdot 10^{-3}$

Calcolo del momento ultimo

Calcestruzzo		
Momento carichi SLE	M_o	2.5 kNm
Deformazione iniziale del calcestruzzo, lembo teso	$\varepsilon_o = M_o / (0.9 \cdot d \cdot E_s \cdot A_{sup})$	$7.74 \cdot 10^{-5}$
Momento ultimo	M_u	87.4 kNm
Momento agente SLU	M_{Sd}	85.0 kNm

Bibliografia

- [1] Decreto Ministeriale 14.01.2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008
- [2] Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 “Istruzioni per l’Applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008”, Gazzetta Ufficiale del 26 febbraio 2009
- [3] CNR-DT 200 R1/2013 “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati”
- [4] Linea Guida C.S.LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale “Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”, approvata con D.P.C.S.LL.PP. n. 220 del 09 luglio 2015
- [5] CNR-DT 203/2006 “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato”



“La redazione dei Quaderni Tecnici costituisce per Anas un cambiamento nel modo di approcciare al core business della propria attività, segnando l’avvio di un nuovo corso che intende portare la Società all’avanguardia nella gestione della rete stradale italiana”.

Gianni Vittorio Armani