

Indice

Introduzione.....	4
1 Cos'è il sisma.....	5
1.1.1 Pericolosità sismica.....	6
1.1.2 Azioni orizzontali.....	7
2 Cenni alla progettazione antisismica.....	9
2.1 Edifici esistenti.....	9
2.2 Progettazione per azioni sismiche.....	10
3 Muratura in laterizio	12
3.1 Effetti dell'azione sismica.....	12
4 Calcestruzzo armato	19
4.1 Effetti dell'azione sismica ⁷	19
5 Sistemi compositi.....	24
5.1 Quadro normativo	25
5.2 Composizione	26
5.3 Matrice.....	30
5.3.1 Matrice organica	30
5.3.2 Matrice inorganica	31
5.4 Fibre.....	32
5.4.1 Fibre di carbonio	32
5.4.2 Fibre aramidiche	33
5.4.3 Fibre di vetro.....	34
5.5 Classificazione dei sistemi	35
5.5.1 Sistemi impregnati in situ	35
5.5.2 Sistemi performanti.....	36
5.5.3 Sistemi preimpregnati	36
5.6 Tipologie di composito	37
5.6.1 Reti.....	37
5.6.2 Lamine	37
5.6.3 Barre.....	37
5.6.4 Tessuti.....	38
5.7 Produzione	39
5.7.1 Pultrusione	39
5.7.2 Tessitura.....	40
5.7.3 Termosaldatura.....	41
5.7.4 Laminazione.....	41
6 Caratteristiche fisiche e meccaniche	43
6.1 FRP	43

6.2	FRCM	45
7	Problematiche	49
7.1	Delaminazione	50
7.2	Ambiente alcalino	51
7.3	Effetti dell'umidità.....	51
7.4	Effetti di temperature estreme.....	52
7.5	Effetti di cicli di gelo e disgelo	53
7.6	Effetti di radiazioni ultraviolette (UV).....	53
7.7	Effetti deformazioni a lungo termine (viscosità e rilassamento).....	53
7.8	Effetti di fatica	53
8	Tipologie di interventi.....	54
8.1	Interventi su sistemi in cemento armato.....	55
8.2	Preparazione del substrato	56
	8.2.1 Rinforzo di pilastri in c.a.....	58
	8.2.2 Interventi per meccanismi di collasso di tipo fragile	60
	8.2.3 Interventi per meccanismi di collasso per piano sofficce	63
	8.2.4 Incremento della duttilità	63
	8.2.5 Rinforzo nodo trave-colonna	63
8.3	Interventi su sistemi in muratura.....	67
8.4	Preparazione del substrato	68
	8.4.1 Rinforzo pilastri	71
	8.4.2 Interventi per meccanismi di collasso per ribaltamento.....	71
	8.4.3 Interventi per meccanismi di tipo fragile	73
	8.4.4 Riparazione di lesioni in una muratura portante in laterizio	74
9	Stoccaggio, collaudo e smaltimento.....	75
10	Controllo sui materiali	78
10.1	Controlli per sistemi di rinforzo preformati	78
10.2	Controlli per sistemi di rinforzo in situ.....	81
11	Codifica.....	84
11.1	Impostazione tavole	85
11.2	Fasi di realizzazione della pagina web.....	86
12	Analisi dei costi.....	89
13	Matrice di confronto	90
	Conclusioni.....	92
	Bibliografia.....	93
	Sitografia	93
	Indice delle figure.....	94
	Indice delle Tabelle	95
	Ringraziamenti	96

resiliènza s.f. [der. di *resiliente*]. – **1.** Proprietà dei materiali di resistere agli urti senza spezzarsi. **2.** Capacità di resistere e di reagire di fronte a difficoltà, avversità, eventi negativi ecc.: *resiliènza sociale*.

Garzanti

Introduzione

Negli ultimi anni il tema della sicurezza antisismica da un punto di vista costruttivo è diventato sempre più importante. Le forti scosse che hanno colpito il nostro paese hanno ri-svegliato la necessità di realizzare un corpo normativo che tenesse conto delle azioni esterne accidentali e la ricerca di nuovi sistemi che permettano l'adeguamento antisismico di edifici antecedenti ai decreti normativi. La volontà di tutelare il patrimonio edilizio del territorio, mantenendo le sue peculiarità, ha fatto sì che lo sviluppo del fibrorinforzato rientrasse nell'ambito edilizio come tipologia di intervento strutturale, di adeguamento e miglioramento sismico.

Enea/Cresme ha elaborato un rapporto inerente alla pericolosità sismica del costruito nel territorio italiano, come è facile pensare questa è amplificata dall'inadeguatezza delle strutture abitative, circa il 60 % delle costruzioni sono antecedenti al 1971, anno dopo il quale la normativa edilizia ha subito delle modifiche sostanziali nell'ambito della prevenzione sismica e nella costruzione secondo determinati accorgimenti tecnici che tengano conto della pericolosità del sito.

Il presente lavoro si pone come obiettivo quello di fornire un valido strumento di informazione inerente all'utilizzo e all'applicazione di materiali compositi per prevenire i meccanismi di collasso soliti a manifestarsi in un edificio sottoposto ad azione sismica. Sono stati identificati, mediante lavoro di ricerca i principali meccanismi di collasso a sollecitazioni esterne, nel caso specifico il sisma, e per ognuna di esse è stata elaborata una o più metodologie di intervento.

Le nuove tecnologie messe a disposizione ed utilizzate nel campo dell'edilizia sono degli strumenti utili ma "delicati", come ogni applicazione, se non utilizzati in modo coerente e senza seguire le opportune indicazioni possono non esplicare al meglio la loro funzione. All'interno del documento è riportato il method statement in riferimento a strutture in calcestruzzo armato e muratura in laterizio.

1 Cos'è il sisma

La crosta terrestre è il sottile strato di superficie caratterizzato da rocce solide, questa si può dividere in:

- Continentale (30 – 70 km);
- Oceanica (5 – 10 km) che costituisce i fondali oceanici;

Lo strato immediatamente sotto la crosta terrestre è la litosfera, facente parte del mantello, dove avvengono gran parte dei terremoti. Il mantello è costituito da materiali semiliquidi che a contatto con il nucleo si riscaldano e assumono un comportamento simile a quello della bollitura dell'acqua. I movimenti convettivi del mantello fanno sì che le zolle costituenti la crosta siano in movimento e quindi sottoposta a grandi sforzi.

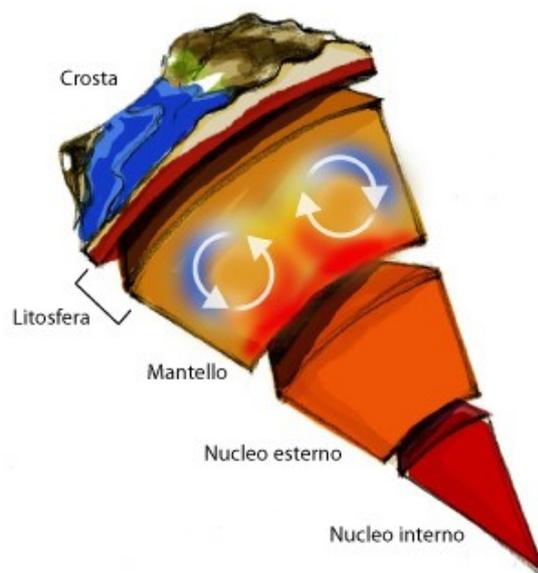


Figura 1- Stratigrafia (Fonte: www.pi.ingv.it)

Il terremoto è determinato dal rilascio della forte energia accumulata negli anni dalla lenta deformazione delle rocce dovuta ai movimenti prima citati. Nel momento in cui l'energia, accumulata all'interno della roccia supera il così detto punto critico di resistenza della roccia, viene rilasciata in tutte le direzioni a partire dall'epicentro sotto forma di onde sismiche che attraversano la crosta fino ad arrivare in superficie. Gli effetti della rottura delle rocce sono talvolta visibili sulla superficie e

prendono il nome di faglia, con lo stesso principio hanno origine le dorsali oceaniche.

1.1.1 Pericolosità sismica

«Con pericolosità sismica si intende lo scuotimento del suolo atteso in un sito a causa di un terremoto. Essendo prevalentemente un'analisi di tipo probabilistico, si può definire un certo scuotimento solo associato alla probabilità di accadimento nel prossimo futuro.»¹

Con l'introduzione del Decreto del 17 Gennaio 2018 è stato definitivamente eliminato il riferimento alle zone sismiche facendo riferimento alla sola accelerazione al suolo com'è possibile vedere nell'immagine sotto i diversi colori indicano differenti valori di accelerazione con una probabilità del 10% di essere superato in 50 anni. I valori di accelerazione al suolo vanno da 0 – 0,025 g (ex-zona 4 in grigio) fino ad arrivare a 0,275-0,3 (ex-zona 1 in viola).

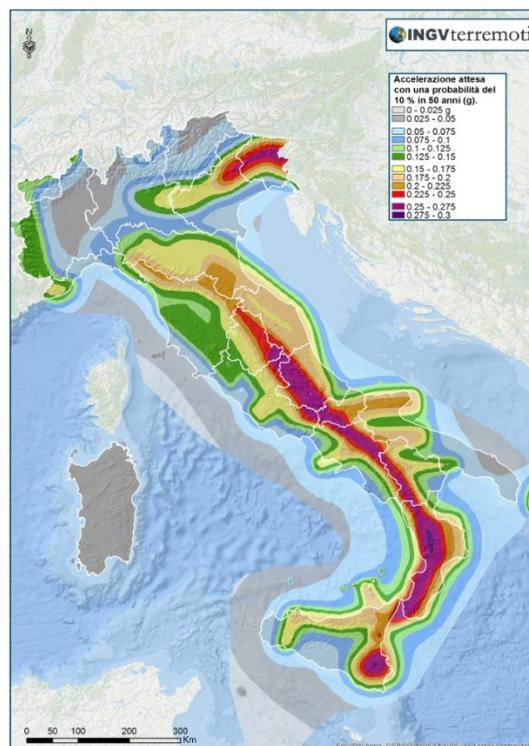


Figura 2 - Accelerazione al suolo (www.pi.ingv.it)

La pericolosità sismica è data dalla sismicità cioè frequenza e dalla forza dei terremoti che lo interessano.

1.1.2 Azioni orizzontali

La progettazione agli Stati Limite richiede che siano garantite l'incolumità delle persone all'interno della struttura. La struttura è caratterizzata da tre parametri:

- Massa;
- Rigidezza;
- Viscosità.

Conseguentemente le forze agenti sulla struttura saranno:

- **Forze di massa**, agisce sul traverso che rappresenta nella schematizzazione la massa dell'edificio, per il secondo principio della dinamica:

$$F = m \cdot a$$

Con m = massa; a = accelerazione

- **Forza di rigidezza**, agisce sull'impalcato, applicata dai pilastri per effetto dello spostamento relativo:

$$F = k \cdot x$$

Con k = rigidezza del ritto; x = spostamento relativo del ritto rispetto al terreno.

- **Forza viscosa**, rappresentata dalla dissipazione di energia visco-elastica caratteristica del materiale. All'effetto viscoso si deve la cessazione delle ondulazioni dovute al sisma.

$$F = c \cdot v$$

Con c = costante di viscosità; v = velocità relativa.

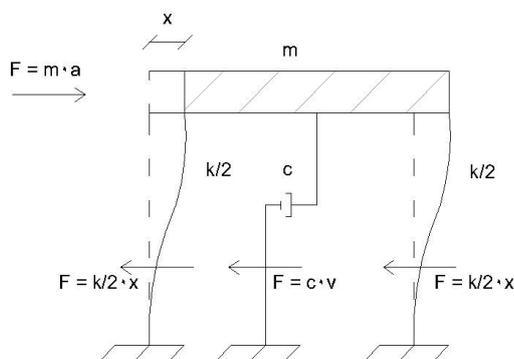


Figura 3 - Schematizzazione struttura

L'azione sismica non è valutata indifferentemente dalla situazione al contorno ma bensì è studiata sito per sito ed edificio per edificio.

All'interno del calcolo numerico entrano a far parte:

- La vita nominale dell'edificio (V_N) riferita al numero di anni nei quali la struttura deve esplicare la propria finzione senza alcun pericolo per cose o persone;
- La classe d'uso dell'edificio ne esistono 4 e sono definite in funzione della destinazione d'uso dell'edificio e del suo conseguente grado di affollamento;
- Il periodo di riferimento della struttura, definito dalla vita nominale e dalla classe d'uso, questo parametro sarà poi utilizzato per la determinazione del periodo della struttura.

Le azioni sismiche di progetto, cioè le azioni da applicare all'edificio per una valutazione sismica, sono definite da accelerazione attesa al sito, fatto di struttura e il periodo dell'edificio.

2 Cenni alla progettazione antisismica

2.1 Edifici esistenti

Come specificato all'interno delle Norme Tecniche delle Costruzioni² la progettazione di interventi ed eventuali valutazioni di sicurezza devono tener conto di diversi fattori quali:

- Eventuali modifiche subite nel corso degli anni, quindi variazioni rispetto allo stato di origine;
- Possibilità di difetti non palesi dovuti alle modalità di realizzazione dell'opera;
- Possibilità che la struttura abbia già subito delle azioni accidentali i cui effetti non sono palesi;
- Situazioni di degrado.

Saranno per questo necessarie, nel di strutture esistenti, indagini conoscitive al fine di progettare degli interventi adeguati alla struttura come ad esempio analisi storico-critiche, rilievi, caratterizzazione meccanica dei materiali.

Le *valutazioni di sicurezza* in costruzioni sottoposte ad azioni sismica vengono elaborate ad esempio nel caso in cui questa presenti evidenti riduzioni di capacità resistente o di deformazione dovute ad esempio ad azioni accidentali, un significativo degrado dei materiali e quindi delle loro caratteristiche meccaniche, una significativa variazione di destinazione d'uso. Particolare attenzione è posta alla *duttilità* della struttura: «si dovranno assumere le informazioni necessarie a valutare se i dettagli costruttivi, i materiali utilizzati e i meccanismi resistenti siano in grado di continuare a sostenere cicli di sollecitazioni o deformazioni anche dopo il superamento delle soglie di plasticizzazione o di frattura»³

Ovviamente la valutazione di sicurezza può essere confinata ad una porzione di costruzione oppure comprenderla tutta dipende dall'estensione delle considerazioni fatte in precedenza.

Alla fine della valutazione di sicurezza sarà possibile determinare se sia possibile usufruire della costruzione senza necessità di interventi o un declassamento della destinazione d'uso oppure ancora la necessità di effettuare un intervento per l'incremento della resistenza o della capacità

2. NTC Capitolo 8 –
“Costruzioni
esistenti”

3. NTC Capitolo 8.7
– “Valutazione e
progettazione in
presenza di azioni
sismiche”

portante. La valutazione di sicurezza va effettuata sia prima che dopo un intervento strutturale.

Mediante l'utilizzo di materiali compositi è possibile far fronte ad interventi di adeguamento⁴, miglioramento⁵ sismico e/o interventi di riparazione locale.

2.2 Progettazione per azioni sismiche

Con l'entrata in vigore della revisione delle Normative Tecniche delle Costruzioni con il Decreto 17 Gennaio 2018, è stato ufficialmente abbandonata la metodologia delle tensioni ammissibili a favore del metodo semiprobabilistico agli Stati Limite.

Nella maggior parte dei casi sono tenute in considerazione le sole componenti ortogonali della sollecitazione sismica e conseguentemente trascurate le sollecitazioni verticali ad eccezioni di alcuni casi quali ad esempio edifici con elementi a mensola con sporgenza superiore ai 4 m, edifici con piani sospesi ed altri casi specificati nel capitolo 7.2 delle Norme Tecniche delle Costruzioni.

Come già detto un ruolo importante nella progettazione antisismica è svolto dalla determinazione della duttilità della struttura, quest'ultima infatti, rientra all'interno della progettazione degli elementi resistenti (pilastri) attraverso l'inserimento di appositi coefficienti di sovrarresistenza γ_{RD} ad incremento delle sollecitazioni di momento agenti su di esso, si applica cioè la *gerarchia delle resistenze*.

Senza entrare nel merito dei calcoli della progettazione sismica, al di fuori del campo di interesse di questo elaborato, si vuole precisare però l'importanza di alcuni fattori nella trasmissione della sollecitazione sismica alla struttura.

Condizioni stratigrafiche

La stratigrafia del suolo influenza l'accelerazione sismica come si può vedere nella figura sotto riportata, infatti, i suoli poco consolidati (2) non sono efficienti nello smorzamento dell'azione sismica al contrario della zona rocciosa.

4. Per approfondire
NTC Cap.8.4.1.

5. Per approfondire
NTC Cap.8.4.2

Condizioni tipografiche

Il segnale, in funzione della topografia del terreno, può essere amplificato ad esempio nel caso di costruzioni poste in sommità di un ammasso roccioso (3) l'azione sismica proveniente dall'epicentro diffondendosi nella roccia subisce un'amplificazione fino a 4 volte il valore di accelerazione entrato nel "cono" roccioso.

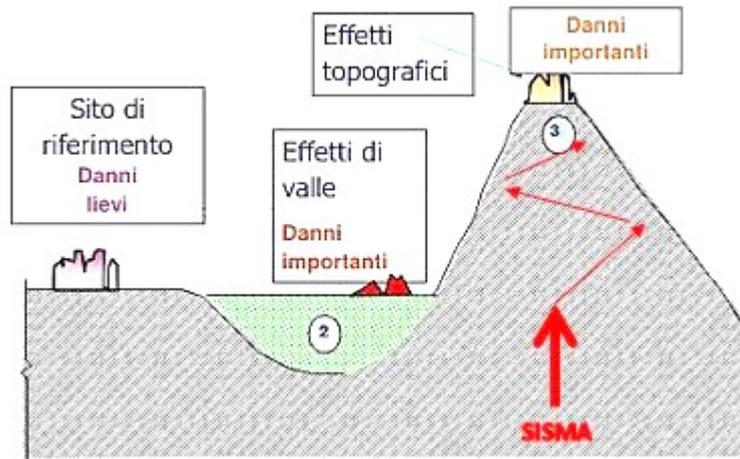


Figura 4 - Risposta sismica locale (<http://sismolab.dgt.uniud.it>)

3 Muratura in laterizio

Gli elementi che concorrono alla formazione di una muratura in laterizio sono due:

- i blocchi in laterizio;
- la malta di allettamento.

È quindi evidente che la resistenza meccanica di una muratura dipende innanzitutto dalle caratteristiche meccaniche dei singoli elementi costituenti la muratura stessa; solitamente l'elemento "debole" della muratura è rappresentato dalla malta e non va peraltro trascurata l'influenza delle modalità di posa in opera, come vedremo più avanti. Le conoscenze del comportamento della muratura richiede quindi in primo luogo la conoscenza delle caratteristiche meccaniche dei blocchi e della malta; esse vengono determinate tramite esecuzione di prove con modalità ben definite dalla normativa tecnica vigente (UNI EN 1052-1 per determinare la resistenza caratteristica a compressione della muratura).

Le dimensioni dei laterizi variano molto a seconda dell'epoca e delle zone in cui sono realizzati in funzione della materia prima disponibile e della tecnologia dell'epoca.

Il laterizio è caratterizzato da un comportamento elasto-fragile sia a trazione che a compressione: con l'aumentare del tempo di cottura, i laterizi sono più resistenti ma diventano fragili. Il comportamento della malta è, invece, fortemente influenzato dal legante impiegato e dal dosaggio.

3.1 Effetti dell'azione sismica

La risposta sismica di una struttura muraria dipende:

- dal materiale impiegato (natura e forma degli elementi);
- dalla tecnica di assemblaggio (a secco o con giunti di malta);
- dalla tessitura (disposizione geometrica);
- da dettagli costruttivi.

La disposizione degli elementi costituenti la muratura si costituisce come sovrapposizione di strati discontinui cioè interposti da letti di malta ed

opportunamente sfalsati. L'orientamento dei giunti principali è ortogonale alle sollecitazioni di compressione prevalenti, al fine di ottimizzare il comportamento della muratura sotto i carichi di esercizio. I giunti principali sono punti di discontinuità che compromettono la resistenza del complesso murario in presenza di sollecitazioni di trazione e taglio (azione sismica).

I giunti influiscono:

- sul comportamento a taglio;
- sulla resistenza a compressione.

Un ruolo importante, per la qualità della risposta sismica, è svolto dall'efficacia delle connessioni parete-parete, parete- solaio che svolgono un ruolo fondamentale nella trasmissione delle azioni tra tali elementi. Le pareti di una struttura in muratura possono essere considerate come sistemi bidimensionali, che con una scarsa resistenza a trazione presentano risposte molto diverse ad azioni orizzontali nel piano e fuori dal piano. I meccanismi fuori dal piano sono i più pericolosi in quanto danno luogo a rotture fragili e istantanee.

Com'è noto pervengono principalmente due tipi di onde: onde sussultorie ed onde ondulatorie.

Dalla base l'impulso si trasmette alla sovrastruttura tendendo ad imprimere oscillazioni generalmente discordanti. Come accennato le azioni sismiche possono provocare sugli elementi resistenti di una struttura, dissesti nel piano, fuori dal piano, localizzati o dissesti di insieme cioè quando si ha il coinvolgimento dell'intero organismo murario. I meccanismi di collasso nel piano rappresentano la prima risposta dell'edificio all'azione sismica insieme ad altri meccanismi locali. I meccanismi di collasso fuori dal piano si presentano in seguito ai meccanismi nel piano, diventano più frequenti in prossimità del collasso della struttura, ovvero quando la risposta alle azioni taglianti nei maschi murari è sensibilmente compromessa. «Si indaga sulle modalità con cui la capacità di spostamento delle pareti dipende dai vari parametri che ne governano il comportamento strutturale.»⁶

Si tengono in considerazione organismi edilizi 'coerenti' che possa presentare modalità di crisi per distacchi di blocchi rigidi

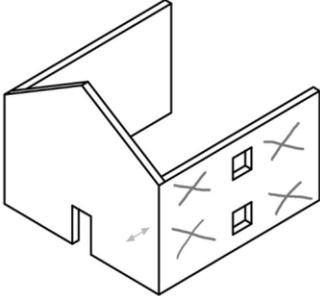
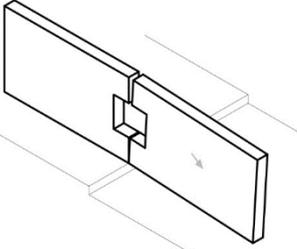
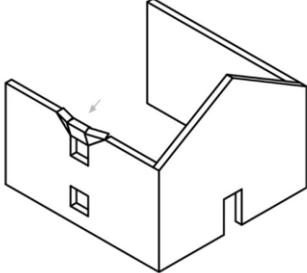
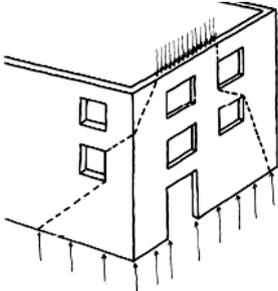
6. Massimo Mariani
– Effetti negativi del
sisma verticale sul
comportamento
delle pareti esistenti
in muratura.

(comportamento locale) o per collassi elasto-plastici dovuti al superamento dei limiti di resistenza o di deformazione (comportamento globale).

Di contro le murature poco coerenti, sotto sollecitazioni sismiche, tendono a disgregarsi e rovinare in crolli caotici che di fatto non sono prevedibili con i modelli a blocchi, in questi casi è necessaria una valutazione sulla qualità muraria che evidenziano le tipologie di intervento necessarie per restituire al materiale la capacità di comportamento d'insieme, l'obiettivo è ottenere un edificio che sia capace di una risposta complessiva che si esplicherà attraverso perdite di rigidità locali sempre più diffuse fino al raggiungimento della crisi generale, così da garantire dei segnali di danneggiamento prima del crollo.

Di seguito la classificazione di dissesti localizzati e di dissesti di insieme dovuti ad azioni esterne.

Dissesti localizzati

	<p>Rotture a taglio del maschio murario caratterizzata da lesioni a X;</p>
	<p>Scorrimento dei muri d'ambito sulle fondazioni e cedimento delle fondazioni;</p>
	<p>Espulsione della muratura a seguito dell'azione spingente su di essa esercitata;</p>
	<p>Lesioni in corrispondenza degli spigoli di muratura per l'azione concentrata di componenti di forze ortogonali con l'eventuale proseguimento della manifestazione fessurativa fino alle aperture;</p>

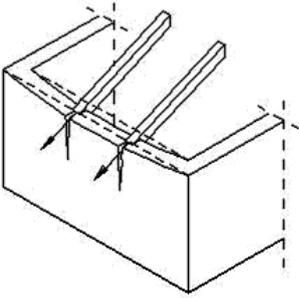
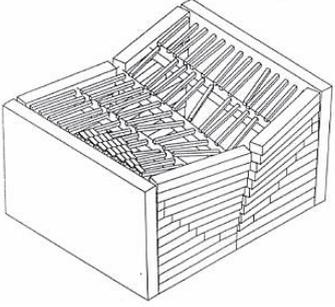
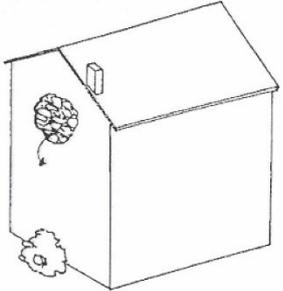
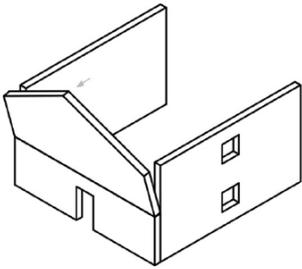
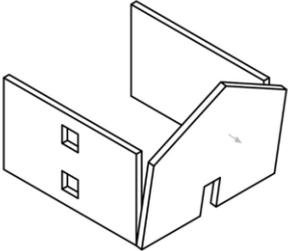
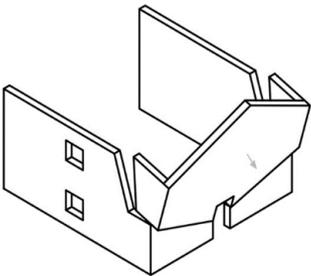
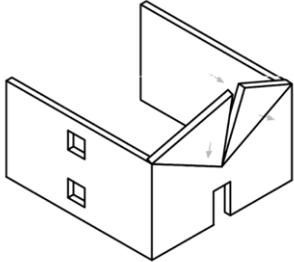
	<p>Scivolamento dei puntoni del tetto con effetto di spinta sulla parete;</p>
	<p>Scivolamento dei puntoni del tetto.</p>
	<p>Sfogliamento locale della muratura per scarso immorsamento del paramento esterno al nucleo interno</p>

Tabella 1 - Dissesti localizzati (immagini: Linee guida 9 Febbraio 2011, per gentile concessione del Prof. Grazzini)

Dissesti di insieme

In questo caso si ha il collasso del manufatto che può prodursi per perdita di equilibrio di porzioni strutturali o per il superamento di stati tensionali limite. I meccanismi di danno sismico ricorrenti possono essere:

	Ribaltamento della facciata
	Meccanismo di ribaltamento: Pareti sollecitate fuori dal loro piano
	Meccanismi nella sommità della facciata
	-

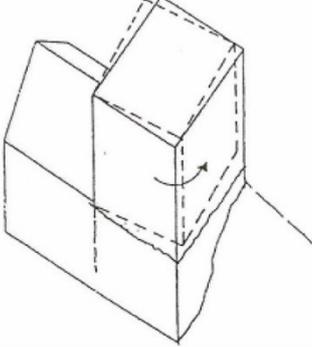
	Irregolarità in pianta
	Irregolarità in altezza

Tabella 2 - Dissesti di insieme (immagini: Linee guida 9 Febbraio 2011, per gentile concessione del Prof. Grazzini)

Si verifica spesso il ribaltamento verso l'esterno delle pareti perimetrali. Sono maggiormente esposti gli edifici privi di comportamento scatolare, cioè in cui mancano o sono deboli le connessioni tra le pareti esterne e quelle trasversali.

Oppure potrebbe verificarsi il distacco ma non il ribaltamento delle pareti, si ha il trasferimento del carico agli elementi paralleli all'azione sismica che garantiscono l'equilibrio globale della struttura; è il caso in cui le pareti esterne e quelle trasversali sono collegate con incatenamenti tanto efficaci da scongiurare il fenomeno di ribaltamento e flessione fuori dal piano.

Vi sono poi, più realisticamente, degli effetti combinati poiché il pannello murario è sollecitato contemporaneamente da azioni nel proprio piano e da azioni ortogonali al piano stesso, come è possibile vedere nella riga 4° e 5° della Tabella 2.

4 Calcestruzzo armato

Soprattutto in epoca recente l'attenzione dei progettisti deve essere rivolta alle diverse manifestazioni dei fenomeni di degrado e/o dissesti di strutture in conglomerato cementizio che hanno causato la perdita della funzionalità, totale o parziale, dell'opera. Uno stato fessurativo minimo è ammesso anche dalla normativa, il calcestruzzo è riconosciuto come un materiale non resistente alle sollecitazioni di trazione e quindi soggetto a fessurazioni. Nella teoria gli interventi manutentivi devono essere effettuati al fine di garantire la durata delle prestazioni meccaniche degli elementi strutturali al fine di garantire una durabilità pari alla vita utile prevista. Un classico edificio in calcestruzzo armato è costituito da due parti caratterizzate da un comportamento di risposta diverso nei confronti delle sollecitazioni: una portante in c.a. ed una portata costituita dalle tamponature principalmente in laterizio.

4.1 Effetti dell'azione sismica⁷

Si fa riferimento, in caso di azione sismica, all'innescarsi di meccanismi duttili o fragili. I meccanismi detti duttili, sono quei meccanismi per i quali il materiale tende a deformarsi oltre lo stato elastico lineare, cioè si deforma in campo plastico non avendo così un tipo di rottura di tipo fragile. I meccanismi fragili, invece, si instaurano in quei materiali che non possiedono la capacità di deformarsi oltre lo stato elastico lineare causando il collasso improvviso della struttura.

È necessario verificare da parte del progettista che la domanda non superi le prestazioni in termini di deformazione (duttilità) e in termini di resistenza (fragilità) della struttura.

Ovviamente nel caso delle strutture miste, ad esempio struttura verticale in calcestruzzo armato con tamponature in laterizio, è da tenere conto l'interazione tra i due differenti materiali in termini di rigidità.

La probabilità che la struttura, in conglomerato cementizio armato, subisca un danneggiamento a seguito dell'evento sismico è dovuta:

- Discontinuità di rigidità verticale ed orizzontale;
- Irregolarità delle masse;
- Trave forte e trave debole;
- Eccentricità marcate;
- Mancata duttilità: staffatura insufficiente quindi inadeguato confinamento, insufficiente lunghezza di ancoraggio.

I danni dovuti al sisma si verificano nelle zone di maggior concentrazione delle tensioni indotte dallo scuotimento e possono essere:

- Leggeri, che consentono l'utilizzo dell'edificio dopo l'evento;
- Danni medi gravi, che necessitano di interventi mirati;
- Di collasso.

Determinati meccanismi di collasso si ripetono frequentemente nel quadro delle costruzioni di civile abitazione. È necessario eliminare, mediante interventi mirati, le carenze originarie della progettazione degli anni passati che pregiudicano il corretto funzionamento in caso di sollecitazioni esterne.

Nella scelta degli interventi di rafforzamento locale non si può, comunque, prescindere da un'analisi qualitativa complessiva delle caratteristiche delle parti strutturali e delle parti non strutturali pericolose e del danneggiamento presente, per impostare un progetto di riparazione e rafforzamento locale volto ad eliminare o ridurre drasticamente le debolezze e le carenze che possano compromettere un corretto comportamento d'insieme della struttura. Dall'analisi qualitativa delle carenze deve derivare un'attenta definizione concettuale degli interventi locali da effettuare, cui deve seguire la scelta della tecnologia più idonea, scelta che può derivare da aspetti sia economici sia realizzativi, con riferimento alle caratteristiche geometriche degli elementi su cui occorre intervenire e di interazione con altri elementi costruttivi. Il progettista deve tener conto che gli interventi di rafforzamento locale, pur non richiedendo l'analisi quantitativa della sicurezza globale dell'opera, dovranno realizzare un miglioramento del comportamento sismico della struttura in c.a..

Distinguiamo:

Meccanismi di collasso globale

- Meccanismo di collasso per piano debole

Tipico edificio con tutti i piani rigidi tranne uno; è una situazione molto frequente nello scenario delle costruzioni di civile abitazione dove spesso si tende ad avere grandi vetrate al piano terreno (ad esempio le vetrate per negozi, parcheggi, ecc.) che diminuiscono la rigidità complessiva del piano;



Figura 5 - Meccanismo di collasso piano debole (Fonte:Linee guida Reluis)

- Meccanismo di collasso per pilastri deboli – travi forti

Sono tra i meccanismi di collasso più pericolosi e si manifestano per schiacciamento, pressoflessione o per taglio dei pilastri. L'assenza di un'adeguata staffatura trasversale fa sì che non vi sia un corretto confinamento delle armature longitudinali, l'instabilità dell'armatura longitudinale causa un'esplosione del copriferro e conseguentemente della stessa armatura longitudinale. Questa condizione può essere peggiorata da uno stato di ossidazione avanzata dei ferri con conseguente fessurazione da rigonfiamento del calcestruzzo.

Meccanismi di collasso locale

- Azione di spinta delle tamponature

La rottura del nodo, nel caso di nodi deboli, è dovuta alle azioni taglianti del puntone equivalente trasmessa dal pannello di tamponatura della maglia strutturale. L'azione di taglio può determinare danni significativi al nodo che, in funzione anche delle modalità di realizzazione e della sezione di ripresa del getto può presentare una fessurazione diagonale (a) sul pannello di nodo oppure una lesione pseudo-orizzontale (b) in corrispondenza della sezione di attacco pilastro-pannello di nodo, questo accade soprattutto nei nodi ad angolo dove la spinta della tamponatura da una parte non è compensata dalla presenza della tamponatura nella parte opposta;

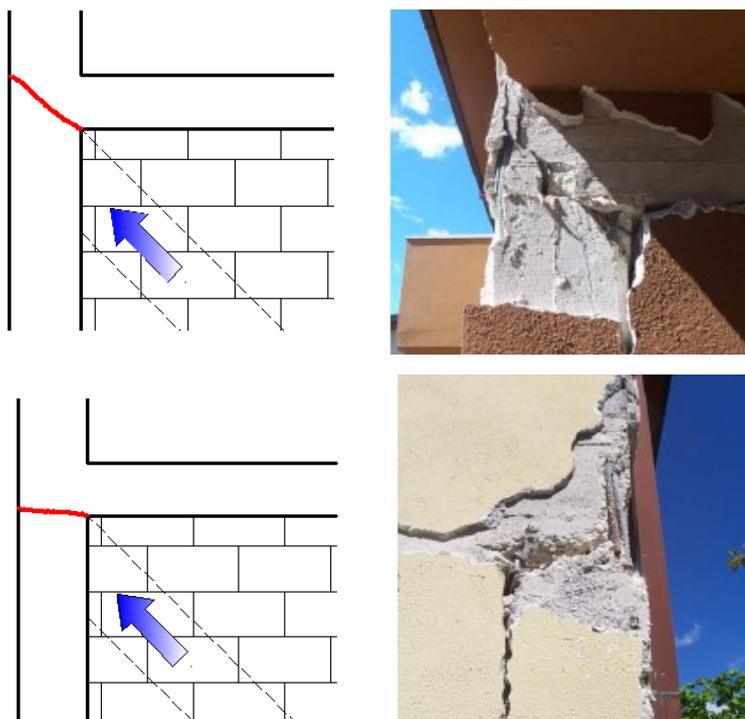


Figura 6 - Azione spinta tamponature (Fonte: Reluis linee guida)

- **Travi e piastrini snelli**

Per effetto della flessione ciclica i lembi opposti sono soggetti a lesioni e schiacciamento che possono provocare, soprattutto nei pilastri, un graduale sgretolamento del conglomerato con riduzione della sezione;

- **Numero insufficiente di staffe**

L'alternanza di trazione e schiacciamento porta una riduzione della sezione la mancanza di un numero adeguato di staffe alla base e alla sommità del pilastro porta lo snervamento delle armature longitudinali;

- **Pilastri tozzi**

Scarsa resistenza agli sforzi di taglio, questo accade quando le dimensioni della base non sono trascurabili rispetto all'altezza del pilastro.



Figura 7 - Pilastrino tozzo rottura a taglio (Fonte: Manuale AeDES)

- **Esplosione del copriferro**

A causa dello schiacciamento del calcestruzzo si potrebbe incorrere a fenomeni di espulsione del copriferro ed instabilità delle barre.



Figura 8 - Espulsione copriferro (Fonte: Manuale AeDES)

5 Sistemi compositi

Le fibre sono nate dall'interazione di diverse discipline come progetto strutturale, analisi dei materiali, meccanica dei materiali. Vengono utilizzate da molti anni in settori come quello, aeronautico, navale e militare.

Nella visione principalmente italiana del riutilizzo del patrimonio edilizio esistente, ha costituito terreno fertile per la diffusione dell'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati nel campo del recupero. Ovviamente il passaggio al settore edilizio non è stato immediato, sono state necessarie delle ricerche atte a capire come applicare alle costruzioni civili un materiale nato per tutt'altro scopo: prima di tutto era necessario capire come, i materiali compositi, potessero migliorare il comportamento delle strutture in termini di resistenza, in secondo luogo la verifica della durabilità dell'interventi.

Il miglioramento qualitativo dell'intervento, a parità di resistenza dei precedenti interventi è dovuto, tra i vari vantaggi, alla possibilità di intervenire non gravando sul peso della struttura questo per grazie sia al ridotto peso specifico delle fibre in sé, FRP e FRCM indifferentemente, sia per i ridotti spessori di applicazione (circa 2 mm per FRP e 1 cm per FRCM). Inoltre, si pensi alle facilitazioni di cantiere come l'eliminazione/riduzione dei problemi di stoccaggio, degli oneri di trasporto, la velocità delle operazioni di cantiere sia per la facilità di applicazione sia perché non è necessario l'utilizzo di macchinari complessi, il numero ridotto di operai necessario all'applicazione delle fibre. Si possono trovare dei risvolti positivi anche allontanandosi dalla sede del cantiere, infatti, la necessità di utilizzare quantità limitate di materiale significa un minore dispendio di energia per la produzione di quest'ultimo ed un risparmio di risorse materiali.

Tutt'oggi sono in corso ricerche atte a ridurre i problemi connessi all'applicazione dei sistemi compositi come la vulnerabilità in ambienti umidi o all'esposizione a raggi UV o alla temperatura ed eventuali attacchi chimici soprattutto nel sistema di incollaggio delle fibre. All'interno del documento DT 200 R1/2013 (revisione del precedente DT 200/2004) sono riportati i coefficienti di sicurezza da introdurre nel calcolo delle fibre per tenere conto del decadimento dovuto a fattori ambientali ed eventuali fenomeni di rilassamento.⁸

8. Vedi Cap.5
"Problematiche"

5.1 Quadro normativo

I materiali compositi, utilizzati nel campo del rinforzo strutturale non sono stati inseriti all'interno delle Norme Tecniche delle Costruzioni. Ma nel capitolo 12 di suddetta norma è ammesso l'utilizzo di materiali non tradizionali per interventi su strutture esistenti nel rispetto delle normative e di documenti riconosciuti come validi dalle stesse NTC.

Ciò che viene richiesto dalle Norme Tecniche delle Costruzioni è che i materiali utilizzati per il rinforzo strutturale debbano essere controllati in fase di accettazione e dotati di marchiatura idonea e provvisti di CIT (Certificato Idoneità Tecnica) rilasciato secondo quanto previsto nelle Linee Guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Nastri o lamine

- **Linea Guida del MIT** 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 (pubblicata il 9 luglio 2016);
- **CNR-DT 200/2004 e 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: Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie;
- **Linee Guida Reluis** per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sul documento stesso.
- **Linee Guida LL.PP. 24/07/2009** – “Linee guida per la progettazione. L'esecuzione ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP” sostituite da: “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”.
- **UNI EN ISO 25762:2012** linee guida per la valutazione delle caratteristiche delle prestazioni al fuoco dei sistemi FRP.
- **ISO 14484: 2013** fornisce principi generali per la verifica e la valutazione delle prestazioni delle strutture in calcestruzzo con applicazioni di diversi sistemi polimerici rinforzati con fibre (FRP)

Barre FRP

- **CNR-DT 203/2006** Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato;
- **ASTM D7957/D7957 M-17**, Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement (2017);
- **AASHTO LRFD** Bridge Design Guide Specifications for GFRP Reinforced Concrete -2° Edition (2018);
- **CSA Standard** - Specification for Fiber Reinforced Polymer (2017).

I documenti sopra citati fanno riferimento alle sole tecnologie FRP costituite da fibra in carbonio, vetro o aramide, non tengono conto di altre tipologie di fibre esistenti. Inoltre i sistemi FRCM non sono ancora in possesso di linee guida che ne regolamentino l'applicazione e le procedure di prove necessarie per il rilascio del CIT. In ogni caso i sistemi FRP ad oggi non hanno una normativa di riferimento con carattere di legge.

5.2 Composizione

Il materiale composito è definito tale in quanto costituito da due o più fasi progettate in modo tale da avere caratteristiche superiori rispetto a quelle degli stessi materiali che agiscono separatamente. Le proprietà di un materiale composito sono dipendenti dalle proprietà dei materiali di cui sono costituiti e dalla geometria. Sarà la distribuzione del di rinforzo a determinare le caratteristiche del sistema, meno la distribuzione è uniforme ed omogenea maggiori saranno le probabilità di una lesione dei punti più deboli. I ruoli dati al materiale composito sono differenti in funzione del tipo di composito e della messa in opera di quest'ultimo. Considerando un materiale con prestazioni medio-basse, costituito da fibre corte o particelle concede un irrigidimento del materiale ma solo localmente, nel caso opposto, quindi con materiale ad alte prestazioni formato da fibre continue, costituisce lo scheletro del materiale che agirà lungo la direzione delle fibre.

Generalmente le fibre sono costituite da due fasi:

- **Matrice:** componente che dà la protezione, il sostegno e il trasferimento degli sforzi da una fibra all'altra, agisce da legante e definisce il volume del composito;
- **Rinforzo:** componente resistente del composito presente in forma fibrosa, contribuisce per la massima parte alla resistenza del materiale, con rapporto $\frac{Lunghezza}{Diametro} > 3$;
- **Interfase:** talvolta necessaria a causa di interazioni chimiche o altri effetti, ha l'obiettivo di controllare il comportamento sforzi deformazioni, inoltre ha un ruolo molto importante nella resistenza alla frattura.

Un eventuale mancanza di aderenza tra fibra e matrice è una delle principali cause di cedimento del materiale composito.

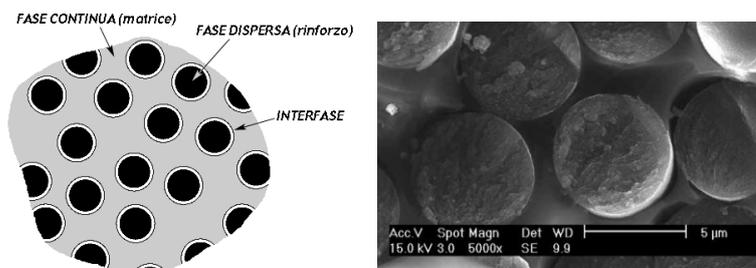


Figura 9-(A sinistra) Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito (DT200/2004); (A destra) Visualizzazione al microscopio (MAPEI)

Le fibre rappresentano un'ottima risposta alle esigenze di rinforzo strutturale diffuse soprattutto negli ultimi anni. Infatti, bisogna tener conto delle caratteristiche che rendono questo strumento un efficace alleato:

- Resistenza meccanica elevata;
- Modulo elastico alto;
- Peso specifico molto basso;
- Comportamento elastico lineare fino alla rottura.

Sono presenti molte tipologie di fibre di comune utilizzo nei compositi come vetro, carbonio, organiche e minerali. Le fibre sono ottenute, indipendentemente dal materiale con cui sono fatte dall'intreccio di sottili filamenti e rivestiti con un film protettivo. La scelta della fibra avviene non in funzione della sua resistenza ma del modulo di elasticità

o modulo di Young (E), è il contributo elastico a trazione a dare contributo di irrigidimento fornito alla struttura dal rinforzo. Vi devono essere delle compatibilità tra il modulo elastico della struttura ed il modulo elastico della tipologia di fibra scelta questo per non indurre la nascita di tensioni localizzate in prossimità dell'applicazione del rinforzo, ad esempio per strutture in c.a. si prediligono fibre più rigide come il carbonio, per la muratura si preferiscono fibre di vetro.

	<i>Elemento</i>	<i>Funzione</i>
<i>Sistemi FRP</i>	Primer	Elemento a base di resina epossidica a bassa viscosità, penetra nei pori della struttura da rinforzare.
	Stucco epossidico	Utilizzato per la regolarizzazione della superficie sulla quale applicare il rinforzo.
	Resina polimerica	Matrice del sistema composito impiegata per l'impregnatura delle fibre e come sistema di incollaggio tra il supporto ed il rinforzo.
	Adesivo epossidico	Altro sistema di incollaggio bicomponente a base epossidica. Maggiormente adatto per sistemi performanti.
	Tessuto	Applicabile a secco o preimpregnato, è un rinforzo fibroso adatto in situazioni richiedenti flessibilità geometrica e dimensionale.
	Lamina	Sistema di rinforzo preformato in forma di lamina. Incollato al supporto mediante adesivo.
	Barra	Sistema di rinforzo preformato in forma di barre spesso con aderenza migliorata attraverso scanatura o sabbiatura.
	Protettivo	A base di resina epossidica protegge il rinforzo azioni esterne come raggi UV, temperature, abrasione.

Tabella 3 - Sistemi FRP ("Fibro rinforzati in architettura – Bellomo, D'Ambrosio")

	<i>Elemento</i>	<i>Funzione</i>
<i>Sistemi FRCM</i>	Malta cementizia	Matrice inorganica del sistema di rinforzo.
	Tessuto	Sistema di rinforzo bassa densità così da permettere il massaggio della malta attraverso il tessuto.
	Rete	Sistema di rinforzo con maglia larga.

Tabella 4 - Sistemi FRCM ("Fibro rinforzati in architettura – Bellomo, D'Ambrosio")

5.3 Matrice

Come già specificato il precedente la matrice ha come obiettivo quello di garantire stabilità geometrica e fissare le fibre al supporto da rinforzare. Fornisce un'uniforme distribuzione di forze tra le fibre e le protegge da agenti esterni ai quali vedremo le fibre sono molto sensibili e ad eventuali azioni meccaniche quali taglio ecc., ha inoltre il compito di distribuire le forze tra le fibre uniformemente. Ovviamente, nel caso in cui le fibre siano sottoposte a compressione, la matrice fa sì che la fibra non svergoli. La matrice può essere di natura organica o inorganica in funzione delle prestazioni richieste al sistema di supporto, ulteriormente le matrici di natura organica sono distinte in termoindurenti e termoplastiche in funzione del comportamento nei confronti delle temperature.

5.3.1 Matrice organica

Gli FRP sono la combinazione tra fibre e matrice polimerica. Le resine possono essere distinte in due macro famiglie: termoplastiche e termoindurenti. Sostanzialmente, all'aumentare della temperatura, le termoplastiche fluidificano passando dallo stato solido a quello viscoso, viceversa accade per le resine termoindurenti, cioè solidificano all'aumentare della temperatura. I vantaggi o svantaggi nell'utilizzo di una o dell'altra sono diversi e sono riassunti nella tabella qui di seguito.

	<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
<i>Termoindurenti</i>	Creazione di reticoli a temperatura ambiente; Resistenza ad agenti chimici.	Comportamento fragile; Sensibile all'umidità.
<i>Termoplastiche</i>	Maggiormente duttili rispetto alle precedenti; Maggiore resistenza ai fattori ambientali.	Costi elevati; Viscosità elevata.

Tabella 4 - Matrice organica

Tra le termoindurenti riconosciamo la *resina epossidica* la più diffusa nel mercato dell'edilizia, è facile da applicare ed è caratterizzata da un fenomeno di ritiro ridotto. Maggiore sarà la densità di reticolazione della resina maggiori saranno le caratteristiche di stabilità chimica e termica, il modulo elastico e la temperatura di transizione vetrosa. È particolarmente sensibile all'umidità, infatti la presenza di acqua all'interno della resina diminuisce la temperatura di transizione ed impedisce la formazione di legami. Le temperature di transizione di aggirano tra i $50^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$.

5.3.2 Matrice inorganica

Le FRCM sono sistemi costituiti dall'unione di malta cementizia e fibre. L'utilizzo della malta cementizia è positivo soprattutto per la posa in opera, perché è molto più familiare alle maestranze l'utilizzo della malta piuttosto che l'utilizzo di resine. La malta cementizia però non è un sistema di adesione consigliato per tutti i tipi di rinforzi in fibre di fatti si preferiscono reti a maglia larga, l'apertura delle maglie permette alla matrice di penetrare tra le fibre i nuovi PBO, una tipologia di fibra organica dotata sia di notevoli proprietà meccaniche che di compatibilità chimica con i composti inorganici. Inoltre, le matrici inorganiche, rispetto alle polimeriche, hanno una maggiore resistenza all'umidità e alle temperature.

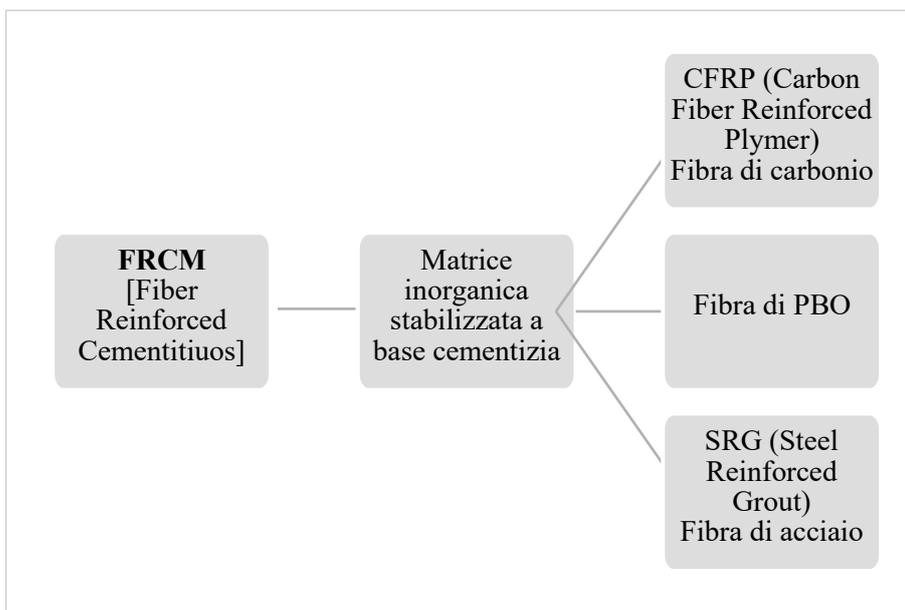


Figura 10 - Classificazione FRCM

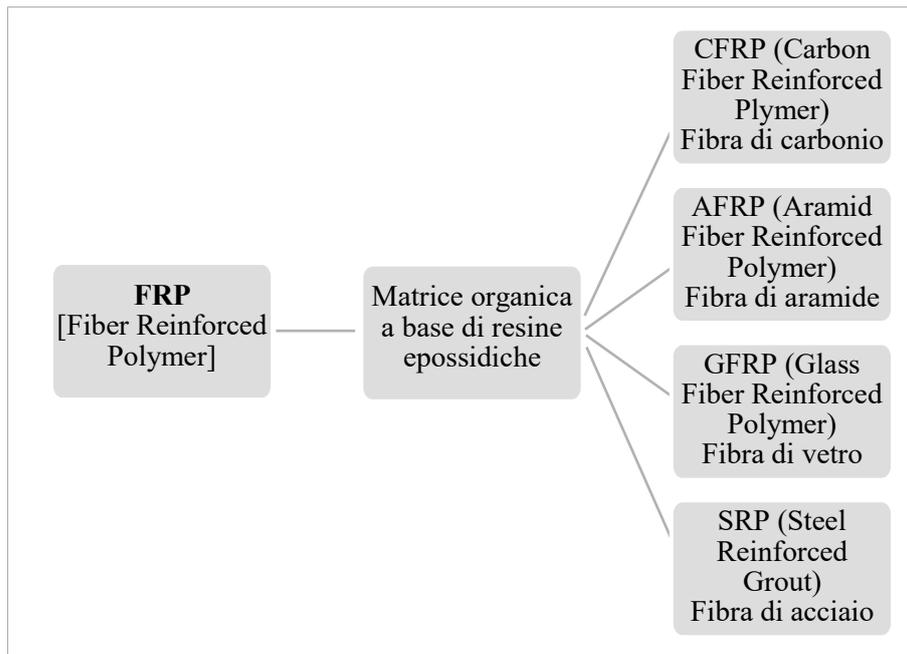


Figura 11 - Classificazioni FRP

5.4 Fibre

5.4.1 Fibre di carbonio

Le fibre di vetro sono state le più utilizzate per un lungo periodo, nonostante le ottime caratteristiche il modulo di elasticità è relativamente basso, da qui la sperimentazione verso nuove fibre come in tessuti di carbonio. Le fibre di carbonio si presentano sotto forma di fogli, tessuti e anche barre pretese.

Le fibre di carbonio sono di natura organica, maggiori sono i legami costituenti la struttura cristallina del carbonio maggiori saranno le caratteristiche meccaniche del materiale questo significa che le caratteristiche di elasticità sono fortemente dipendenti dalla quantità di carbonio grafittico presente nella composizione delle fibre. La produzione si basa sul processo di pirolisi, un processo di decomposizione di materiale organico in condizioni di vuoto, il materiale maggiormente utilizzato per la realizzazione del carbonio è la pece. Rispetto alle fibre di vetro e aramidiche, il carbonio ha una predisposizione ridotta ai fenomeni di scorrimento viscoso⁹ e a lungo termine presenta una perdita di resistenza minore. Uno degli aspetti maggiormente negativi è la rottura di tipo fragile (cioè senza fase di deformazione) ed inoltre soggette a corrosione galvanica¹⁰, cosa molto rilevante nel caso di rinforzi

9. Sottoposta ad alte temperature e a sforzo costante le fibre sono soggette a deformazione;

10. L'interposizione di uno strato isolante tra le fibre e l'acciaio riduce il rischio di corrosione.

strutturali di opere in c.a.. I sistemi FRP con base fibre di carbonio prendono il nome di CFRP.

<i>Fibre di carbonio</i>			
<i>Proprietà</i>	Unità di misura	Valori medi High Strengt	Valori medi High Modulus
<i>Densità</i>	g/cm ³	1,75	1,85-1,90
<i>Modulo elastico</i>	GPa	240-280	390-760
<i>Resistenza a trazione</i>	MPa	4100-5100	2400-3400
<i>Allungamento a rottura</i>	-	1,6-1,73	0,5-0,8
<i>Coefficiente di dilatazione termica</i>	10 ⁻⁶ /°C	-0,75	-1,45
<i>Resistenza al calore</i>	°C	350-400	350-400

Tabella 5 - Fibre di carbonio

5.4.2 Fibre aramidiche

Sono fibre di origine organica ottenute attraverso la lavorazione di poliammidi, caratterizzate dalla loro resistenza alla manipolazione, si pongono in una posizione intermedia tra le fibre di carbonio e di vetro per il loro valore di modulo elastico normale e resistenza a trazione. Sono soggette ad una notevole perdita della resistenza a trazione, oltre al 50 %, se esposte per un tempo prolungato alla luce solare. Inoltre, sono particolarmente sensibili all'umidità, infatti, assorbono circa il 6% di peso d'acqua in un ambiente saturo ad una temperatura di 25° e presentano un comportamento di rilassamento progressivo nel tempo e molto più marcato delle fibre di vetro.

<i>Fibre di aramidiche</i>		
<i>Proprietà</i>	Unità di misura	Valori medi
<i>Densità</i>	g/cm ³	1,45-1,47
<i>Modulo elastico</i>	GPa	62-179
<i>Resistenza a trazione</i>	MPa	3600-3800
<i>Allungamento a rottura</i>	-	1,9-5,5
<i>Coefficiente di dilatazione termica</i>	10 ⁻⁶ /°C	-2
<i>Resistenza al calore</i>	°C	300-350

Tabella 6 - *Fibre aramidiche*

5.4.3 Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono fra le fibre inorganiche con densità più alta. Nascono da un processo di filatura di sabbia, allumina e calcare con ossidi di alluminio. I vantaggi nell'utilizzo delle fibre di vetro sono:

- Alta resistenza agli incendi, infatti il tessuto non brucia, o comunque brucia senza dar luogo alla fiamma;
- Buone capacità isolanti;
- Basso assorbimento di umidità: il vetro è acellulare l'umidità non può penetrare nella superficie dei filamenti;
- Stabilità dimensionale, non subiscono cioè delle grandi variazioni di lunghezza a causa delle variazioni atmosferiche¹¹.

Grande contributo alla resistenza delle fibre di vetro è dato dal rivestimento impiegato per trattare la superficie della fibra.

Sono prodotte utilizzando vetro ad alto contenuto di alcalini per la loro minore sensibilità all'umidità.

Il materiale è particolarmente sensibile agli ambienti alcalini, infatti quest'ultimo, potrebbe portare ad un danneggiamento del rinforzo causando una riduzione delle proprietà meccaniche

Le fibre di vetro sono soggette a diversi meccanismi di degrado:

- Corrosione dei filamenti;
- Crescita dei difetti superficiali nati dalla procedura di produzione causando una rottura per fatica;

11. "Rinforzo strutturale con materiali compositi – Domenico brigante

- I cristalli potrebbero riempire gli spazi tra le fibre causando un infragilimento della stessa fino ad arrivare a rottura.

Ovviamente la nascita di uno di questi meccanismi, non solo questi elencati, causa un decadimento delle proprietà meccaniche.

Il rivestimento delle fibre, realizzato con trattamento chimico, può essere effettuato con diversi materiali ed ha lo scopo di proteggere le fibre dalle lavorazioni alle quali saranno sottoposte.

Sono due le tipologie di vetro comunemente utilizzati per la realizzazione di fibre:

- E (Elettric);
- (Silica), resistenza meccanica più elevata rispetto alla tipologia E.

<i>Fibre di vetro</i>			
<i>Proprietà</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori medi Vetro E</i>	<i>Valori medi Vetro S</i>
<i>Densità</i>	g/cm ³	2,54	2,49
<i>Modulo elastico</i>	GPa	70-80	85-90
<i>Resistenza a trazione</i>	MPa	2000-3500	3500-4800
<i>Allungamento a rottura</i>	-	3,5-4,5	4,5-5,5
<i>Coefficiente di dilatazione termica</i>	10 ⁻⁶ /°C	5,2	1,6-2,9
<i>Resistenza al calore</i>	°C	400	400

Tabella 7 - Fibre di vetro

5.5 Classificazione dei sistemi

All'interno del DT 200 R1/2013 è riportata una classificazione dei sistemi di rinforzo in funzione delle modalità di produzione e di messa in opera:

5.5.1 Sistemi impregnati in situ

Detti anche Wet-lay-up Systems sono sistemi caratterizzati da fogli o tessuti di fibre, sia queste unidirezionali che multidirezionali, e lo strato adesivo di resina. Il processo di laminazione (cioè la creazione dei diversi strati dell'intervento di rinforzo) è svolto manualmente direttamente in

cantiere. La fibra è trasportata “secca” e imbibita di resina in loco. È fondamentale che la disposizione delle fibre avvenga in maniera coerente con la distribuzione delle tensioni nell’elemento da rinforzare, è cioè necessario che le fibre siano orientate lungo la direzione delle tensioni, un errore di inclinazione delle fibre può comportare una riduzione dell’efficacia del 50% (per inclinazioni delle fibre diverse da quelle principali oltre i 30°);

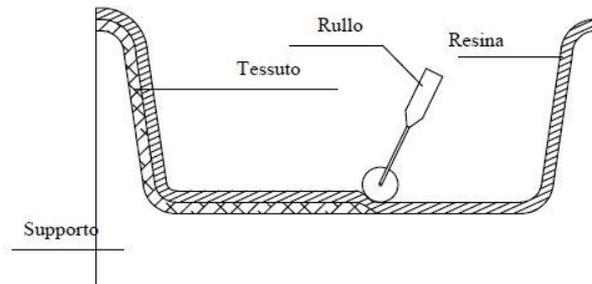


Figura 12 - Formatura in situ (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)

5.5.2 Sistemi performanti

Detti “Precured Systems” possono essere lamine o barre prodotti in stabilimento mediante pultrusione; Per l’incollaggio è utilizzato l’adesivo epossidico.

5.5.3 Sistemi preimpregnati

Detti “Prepreg System” sono fibre in fogli o tessuti unidirezionali o multi-direzionali impregnati di resina già in stabilimento e poi portate in cantiere, queste possono essere incollate senza l’aggiunta di ulteriore resina. Per un eventuale stoccaggio di pochi giorni (6/8 gg) è necessario un controllo delle temperature (circa 23°C), i materiali sono rivestiti di carta siliconata per il trasporto.

5.6 Tipologie di composito

Nelle diverse tipologie illustrate posso trovarsi in commercio più forme come:

5.6.1 Reti

Realizzate con intrecci di fasce ortogonali tra loro ed una maglia di circa 6-10 mm. Sono presenti sul mercato in rotoli di lunghezza 15-30 m e larghezza tra i 50 – 100 cm.

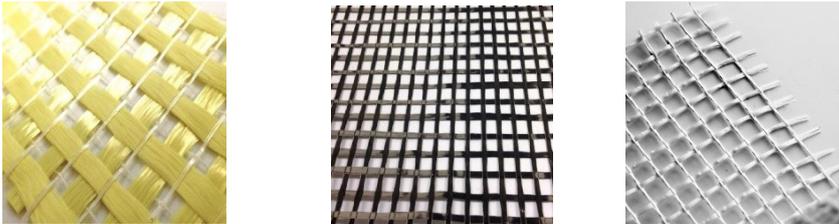


Figura 13- Da destra rete di vetro, rete in carbonio, rete in aramidiche (Fonte: edilportale)

5.6.2 Lamine

Sono unicamente unidirezionali e di sezione rettangolare, in fibra di carbonio con resina con un'alta percentuale di fibre tra il 65% e il 70%. Vendute in rotoli di lunghezza compresa tra i 50 e 150 m e larghezza tra 5 e 15 cm, spessore 1,2 -1,4 mm. Le lamine devono essere tagliate con strumenti appositi e spesso sono protette con pellicola protettiva su entrambe le facciate della lamina, caratterizzate spesso da una lavorazione diversa sulla faccia destinata all'incollaggio ad esempio irruvidita con sabbatura.

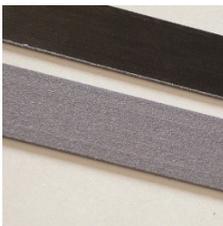


Figura 14 - Lamine in fibra di carbonio con faccia irruvidita (Fonte: edilportale)

5.6.3 Barre

Prevalentemente a sezione tonda, ma possono essere anche a sezione rettangolare, con un diametro tra gli 8 e i 12 mm con lunghezza massima

di 12 m. La matrice utilizzata può essere resina epossidica o resina poliesteri.



Figura 15 - Da destra barra in carbonio, vetro, aramidica (Fonte: edilportale)

5.6.4 Tessuti

Si distinguono in *unidirezionali* quando i filati o fasci sono orditi parallelamente l'uno all'altro e legati da filamenti. Sono definite tali se i filamenti utilizzati per la realizzazione della trama danno un contributo inferiore al 10% del peso totale. Il loro utilizzo è consigliato se la larghezza del supporto da rinforzare non supera i 10-50 cm. Spessore variabile tra 0,15 – 0,5 mm.

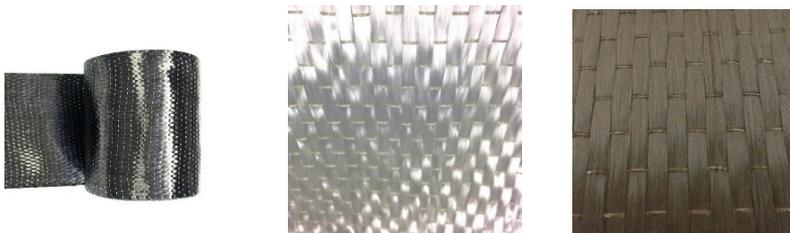


Figura 16 - Da destra tessuto unidirezionale in fibra di carbonio, vetro, aramidiche (Fonte: edilportale)

I tessuti *bidirezionali*, a differenza dei precedenti, presentano sia una trama che un ordito in due direzioni ossia $0^\circ - 90^\circ$.

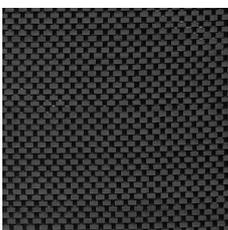


Figura 17 - Fibre di carbonio bidirezionali

I tessuti *multidirezionali*, come è possibile intuire dal nome stesso, sono costituiti da filati o fasci di fibre in diverse direzioni ad esempio esistono le fibre con disposizione triassiali cioè con un'inclinazione di 120° l'una

dall'altra oppure i quadriassiali con un'inclinazione di 135° una rispetto all'altra.



Figura 18 - Fibre multidirezionali (Fonte: edilporlate)

5.7 Produzione

Il sistema di produzione varia in funzione della tipologia di sistema composito si vuole realizzare.

5.7.1 Pultrusione

È un processo produttivo utilizzato per la produzione di lamine e barre fibrorinforzate. Il processo è schematizzabile in 3 fasi quali:

- Formatura;
- Impregnazione;
- Consolidamento.

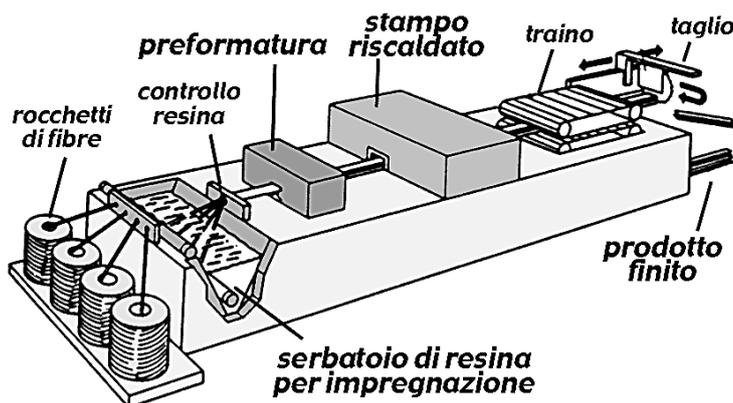


Figura 19 - Schema di funzionamento della pultrusione (Fonte: DT R1 200/2013)

Le fibre sono prelevate, mediante rastrelliera, dai rocchetti ed immerse nei serbatoi di resina per impregnazione. Convogliate all'interno dello stampo riscaldato, le fibre, si consolidano e si eliminano eventuali vuoti garantendo la continuità del sistema.

In uscita dallo stampo il prodotto della lavorazione viene trascinato dal meccanismo di traino fino ad arrivare al dispositivo di taglio, costituito da una sega circolare. Questo sistema prevede un processo quasi completamente meccanizzato, necessità cioè di un minimo intervento umano.

5.7.2 Tessitura

Le singole fibre sono difficili ma lavorare singolarmente per questo motivo sono disposte in fasci di varie forme. Il contributo di resistenza dato dalla geometria filiforme delle fibre che costituiscono il composito è maggiore rispetto alla rigidità posseduta dagli stessi nella loro forma tridimensionale. Infatti, la lavorazione delle fibre (carbonio, vetro, aramidiche) consente di ridurre la percentuale di difetti presente nel materiale. Le combinazioni più comuni disponibili in commercio sono:

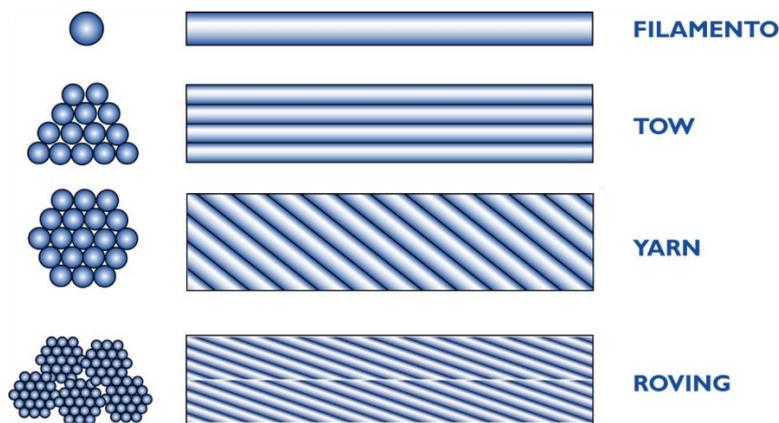


Figura 20 - Tipologie di fibre (Fonte: CNR DT R1 200/2013)

- Filamento: alla base della realizzazione dei fasci, ha dimensioni di circa 10 micron;
- Tow: costituito da un migliaio di filamenti, la sua destinazione è quella di essere utilizzato come fibre discontinue (o corte)¹²;
- Yarn: fascio di fibre assemblato con torsione caratterizzate da una maggior compattezza;
- Roving: assemblaggio di più fasci.

Secondo ISO 1144:1973 l'unità di misura della massa per unità di lunghezza è il **Tex = 1 kg per km** di fibra.

Con l'impiego di telai a pinza i filati di fibra sono trasformati in tessuti, il principio di funzionamento è lo stesso della produzione di un tessuto

12. Utilizzate ad esempio per la realizzazione di elementi pultrusi o per la realizzazione di malte fibrorinforzate

comune. Nel caso di tessuti unidirezionali, nella produzione, le fibre sono semplicemente disposte l'una parallela all'altra.



Figura 21 - Tessitura di fibre di vetro (Fonte: www.jeragofibers.it)

5.7.3 Termosaldatura

Attraverso questo processo è possibile produrre le reti bidirezionali. La giunzione delle varie fibre è ottenuta per termosaldatura, si ha quindi l'assenza di cuciture che rendono il rinforzo più resistente, inoltre il tipo di orditura scelto influisce sull'assorbimento da parte del tessuto della resina.

5.7.4 Laminazione

Mediante questa tipologia di lavorazione è possibile ottenere laminati compositi con strutture anche molto complesse. Infatti, a differenza della pultrusione, con il sistema della laminazione non vi sono limiti nell'orientazione delle fibre e consente di dare una curvatura al prodotto finale. Lo svantaggio di questa tecnica sta nella velocità di produzione, maggiore è la complessità del sistema composito maggiori saranno i tempi di lavorazione.

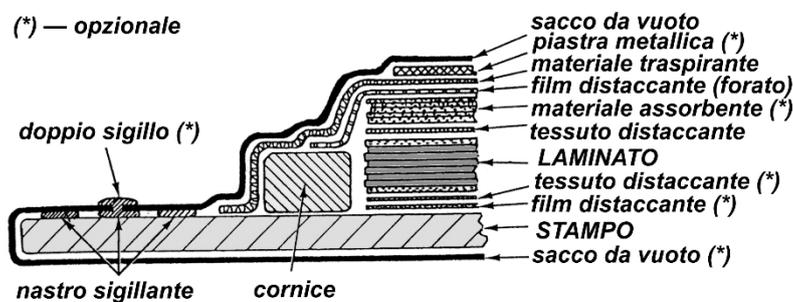


Figura 22 - Processo di laminazione (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)

Le fasi di sviluppo della lavorazione sono:

- Preparazione del materiale;
- Sovrapposizione degli strati di materiale e compattazione;
- Confezionamento¹³;
- Reticolazione a temperatura ambiente;
- Ispezioni sia visive che con ultrasuoni e raggi X;
- Finitura del composito con taglio dei bordi.

Questo sistema è utilizzato, ad esempio, per la realizzazione di opere di confinamento nelle colonne.

13. All'interno del sacco viene creato il vuoto mediante pompa ha lo scopo di eliminare l'eventuale presenza di aria nel laminato e di compattare gli strati

6 Caratteristiche fisiche e meccaniche

6.1 FRP

Fisiche

Una delle caratteristiche fisiche dei materiali compositi alla quale bisogna porre maggiore attenzione è la temperatura di transizione vetrosa della resina. Infatti, al superamento della T_g lo strato di adesione perde rigidità e resistenza, tende a rammollirsi¹⁴. Le temperature di cui si parla sono relativamente basse, facilmente raggiungibili da un edificio con esposizione diretta al sole. A conclusione di questo ragionamento possiamo dedurre che lo strato di adesione non è prestante in condizioni di incendio, l'aderenza alle superfici sarebbe persa causando il fenomeno della delaminazione, ovviamente possono essere introdotti additivi all'interno della resina in grado di rallentare la propagazione dell'incendio e la produzione di fumi.

Un'altra criticità delle caratteristiche fisiche è l'assorbimento dell'umidità soprattutto da parte dello strato di fissaggio. Infatti, nelle resine, l'assorbimento di umidità causa la diminuzione della temperatura di transizione, già sufficientemente bassa, e riduzione delle proprietà meccaniche di resistenza. Nel caso dell'assorbimento di umidità la fibra svolge un ruolo importante per esempio sia carbonio che vetro non contribuiscono al passaggio di acqua, non si imbibiscono. In ogni caso è necessaria una certa permeabilità al vapore dell'elemento rinforzato¹⁵, si potrebbe pensare di limitare l'intervento, ad esempio nel caso di rinforzo di un pilastro, alle sole zone maggiormente sollecitate oppure se l'elemento necessita di un confinamento completo si potrebbe differenziare la matrice utilizzata, la resina epossidica ha un'elevata resistenza meccanica ma una bassissima permeabilità al vapore, viceversa per le resine acriliche.

Meccaniche

Le caratteristiche meccaniche del sistema dipendono dalla tipologia di sistema considerato per esempio per i tessuti impregnati in situ le caratteristiche meccaniche considerate sono della sola fibra mentre quelle nei sistemi pre-impregnati le caratteristiche meccaniche sono

14. Vedi § 2.2.1 "Matrice organica".

15. Ad esempio per problemi di umidità di risalita.

quelle di tutto il sistema composito (matrice+fibre). Il calcolo effettuato non tiene conto dell'aderenza tra matrice e fibre andando così a sovrastimare i valori di resistenza meccanica, potrebbero inoltre esservi problemi relativi a difetti di produzione, di non perfetta distribuzione delle fibre.

Nel caso di sistemi impregnati in situ è difficile quantificare le volumetrie delle diverse fasi del composito essendo la resina posta in opera manualmente, la relazione tra percentuale volumetrica di resina e di fibre influenza le proprietà meccaniche del composito com'è possibile vedere dal grafico sotto riportato.

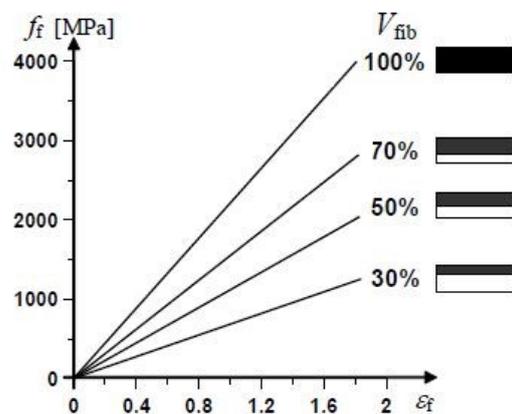


Figura 23 - Grafico influenza del contenuto di resina sulle proprietà meccaniche delle fibre (Fonte: DT 200 R1/2013)

Le proprietà meccaniche del composito sono date da:

$$f_f = \frac{F_{fu}}{A_f} \qquad E_f = \frac{F_{fu}}{(A_f \cdot \epsilon_{fu})}$$

Con f_f tensione di rottura; A_f area sezione trasversale del tessuto impiegato; F_{fu} forza ultima determinata sperimentalmente; ϵ_{fu} deformazione ultima determinata sperimentalmente; E_f modulo di elasticità normale.

Le fibre di vetro e le aramidiche, piuttosto che le fibre di carbonio, presentano una maggiore resistenza a fenomeni di impatto come possono essere ad esempio forti urti ed esplosioni, c'è comunque da tener conto

che i sistemi FRP sono deboli a fenomeni di incisioni o lacerazioni che possono essere prodotte da strumenti da taglio, diventa quindi importante proteggere i sistemi da atti vandalici in luoghi pubblici e/o affollati. Come detto precedentemente il DT 200 R1/2013 introduce i fattori di conversione cautelativi ai quali il progettista può fare riferimento per la progettazione distinti in:

- Fattore di conversione ambientale η_a , cioè esposizione alle condizioni ambientali come umidità, raggi UV, ecc. rientra all'interno del calcolo della deformazione massima del rinforzo FRP;
- Fattore di conversione per effetti di lunga durata η_1 come effetti viscosi, di rilassamento, ecc..

6.2 FRCM

Fisiche

Nel caso di compositi FRCM (ricordiamo essere composti da fibre di vario tipo e malta cementizia), la caratteristica fisica predominante non sarà la temperatura di transizione, come nel caso delle resine, ma la dilatazione termica. In funzione dell'aggregato presente all'interno della malta avremo un restringimento o un aumento di volume in funzione delle variazioni di temperatura ($\text{mm/m}^\circ\text{C}$), per questo si tende ad utilizzare inerti leggeri per i quali i valori di dilatazione termica sono più piccoli. Particolarmente per le applicazioni FRCM sono le fibre di vetro di silicio che presentano valore di dilatazione termica molto simile alla malta cementizia così, in caso di variazioni termiche, non si hanno conflitti di interazione tra matrice cementizia e fibra. Al contrario delle resine la malta cementizia permette il passaggio del vapore, è però sensibile alla presenza di umidità, infatti questa si restringe se esposta all'aria secca e rigonfia nuovamente in presenza di acqua, si generano degli sforzi di trazione che possono causare lesioni nello strato. Come mezzo di contrasto a questo fenomeno sono utilizzate sia gli additivi sia le fibre immerse nell'impasto.

L'acqua, che si deposita nei pori della malta, è soggetta a cicli di gelo e disgelo causando un aumento di pressione all'interno dei capillari, quando solidifica con conseguente aumento di volume, causando micro

lesioni. Anche in questo caso uno dei possibili interventi è l'utilizzo di additivi.

Meccaniche

Mediante sperimentazione è stato constatato che l'utilizzo di malta cementizia abbinato all'applicazione delle fibre, quindi la sostituzione della matrice resina all'interno del composito, ha portato dei risultati in termini di resistenza del tutto simili ai compositi con matrice di resina. Inoltre, la possibile presenza di fibre disperse all'interno della matrice cementizia porta un ulteriore contributo di duttilità e resistenza. Ad esempio, le fibre disperse all'interno della matrice inorganica conferiscono una riduzione degli effetti negativi dovuti alla riduzione di volume dello strato di malta cementizia a causa dell'evaporazione della componente acqua al suo interno. In questo caso la matrice assume anche una funzione portante, al contrario della debolezza delle resine anche per questo è complesso determinare il comportamento meccanico del sistema composito. Anche per questo il sistema è molto variabile in funzione della preparazione della malta, anche errori apparentemente banali possono causare grandi variazioni.

In generale, com'è possibile notare dalla figura sotto, sono riportate le caratteristiche di tensione di rottura e di deformazione a rottura, sia per le componenti separate (fibre e matrice) sia del sistema composito. Le caratteristiche di tensione a rottura di una fibra unidirezionale si riducono

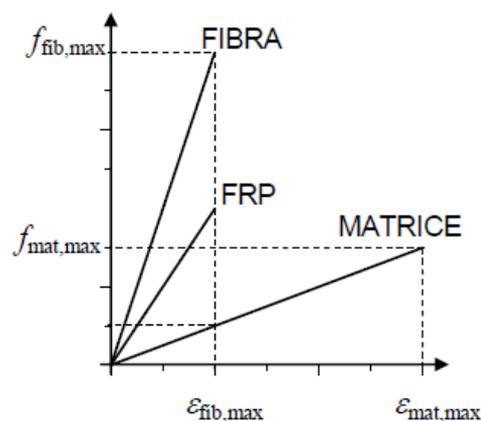


Figura 24 - Legame costitutivo fibra, matrice e composito (Fonte:DT 200 R1/2013)

notevolmente se unite alle prestazioni della resina, ma la deformazione a rottura del sistema composito è pari alla deformazione a rottura della fibra.

<i>Caratteristiche meccaniche e fisiche dei composti</i>		
<i>Proprietà meccaniche</i>	ISO	ASTM
<i>Modulo di elasticità normale a trazione</i>	527-4, 5:1993(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02
<i>Resistenza a trazione</i>	527-1, 4, 5:1993(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02
<i>Deformazione a rottura a trazione</i>	527-1, 4, 5:1993(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02
<i>Modulo di elasticità normale a compressione</i>	14126:1999(E)	D3410
<i>Resistenza a compressione</i>	14126:1999(E)	D3410
<i>Deformazione a rottura a compressione</i>	14126:1999(E)	D3410
<i>Resistenza a creep</i>	899- 1:2003(E)	D2990-01

Proprietà fisiche		
<i>Densità</i>	1183-1:2004(E)	D792-00
<i>Coefficiente di dilatazione termica</i>	11359-2:1999(E)	E831, D696
<i>Temperatura di transizione vetrosa (della matrice)</i>	11357-2:1999(E) (DSC) 11359-2:1999(E) (TMA)	E1356, E1640
<i>Contenuto di fibre</i>	11667:1997(E)	D3171, D2584

Proprietà meccaniche dei tessuti		
<i>Modulo di elasticità normale a trazione</i>	4606:1995(E), 13934-1:1999(E)	-
<i>Resistenza a trazione</i>	4606:1995(E), 13934-1:1999(E)	-
<i>Deformazione a rottura a trazione</i>	4606:1995(E), 13934-1:1999(E)	-

Tabella 8 – Normativo di riferimento per la determinazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei compositi

7 Problematiche

Il corretto funzionamento dell'intervento di rinforzo in strutture esistenti, sia queste in conglomerato cementizio armato normale o di muratura, è dipendente da alcuni fattori quali la competenza e la qualificazione dei progettisti, nonché il livello di capacità delle maestranze esecutrici del lavoro e dell'utilizzo dei materiali come specificato.

La prestazione dell'intervento di rinforzo non deve essere compromessa, al di sotto del limite prestabilito, dal normale degrado della struttura tenendo conto delle condizioni ambientali e tenendo conto del programma di manutenzione. Particolare attenzione è da porre alla prestazione dei materiali pre-esistenti e la loro interazione con i materiali nuovi introdotti dall'intervento.

In fase progettuale sono identificati le azioni ambientali, le modalità di carico della struttura rinforzata e ci si aspetta che queste non variano, in quanto da queste dipende la scelta di determinati fattori di conversione ed eventualmente la predisposizione di sistemi adeguati di protezione dei materiali compositi.

È da precisare che le possibili combinazioni di filamenti, orientamento degli strati e numero di strati sono infinite ma solo alcune di queste sono utilizzate nell'edilizia. Questo perché tra le diverse fibre esistono importanti differenze come il modulo elastico, la durabilità in relazione all'esposizione ambientale e il fenomeno del rilassamento. Per ogni fibra poi ne esistono qualità differenti, queste variazioni sono dovute al processo di produzione, ad esempio, piccole variazioni di temperatura nel processo nel caso del carbonio portano alla creazione di filamenti con diversi moduli elastici e resistenze. Analogamente, variazioni in percentuale della materia prima nella produzione delle fibre di vetro determina un aumento o una riduzione della sensibilità del filato di vetro all'ambiente alcalino e la sensibilità ai fenomeni di rilassamento.

All'interno dei calcoli sono introdotti dei coefficienti riduttivi di resistenza in funzione delle caratteristiche dell'ambiente, poco o molto aggressivo, che variano da 0.95 a 0.7 ed in funzione delle sollecitazioni permanenti che variano da 0.55 a 0.3.

Si approfondiscono di seguito le principali problematiche:

7.1 Delaminazione

La delaminazione è una rottura di tipo fragile, questa avviene a causa della perdita di aderenza tra calcestruzzo e materiale composito sotto forma di lamine o tessuti. Nello specifico la delaminazione può riguardare tessuti o lamine applicati per il rinforzo a flessione nell'intradosso delle travi in c.a. e i rinforzi, usualmente in tessuto, applicati sulle facce laterali per il rinforzo a taglio. Le cause possono essere¹:

- Delaminazione delle estremità del rinforzo;
- Delaminazione causata da fessure per flessioni nella trave;
- Delaminazione causata da fessure diagonali di taglio;
- Delaminazione causata da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo.

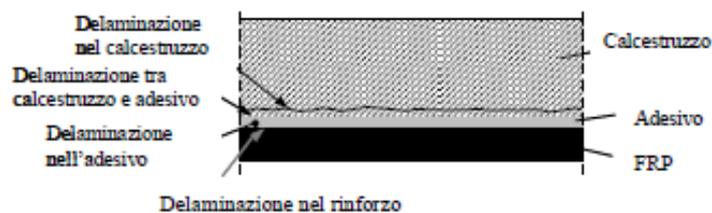


Figura 25- Perdita di aderenza tra rinforzo e calcestruzzo (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)

L'applicazione del tessuto o delle lamine necessita dell'utilizzo di un adesivo, la delaminazione può innescarsi in diversi modi:

- All'interno dell'adesivo
- Tra calcestruzzo e adesivo
- All'interno del rinforzo

Ipotizzando la messa in opera a regola d'arte dei rinforzi, la delaminazione avviene sempre all'interno del calcestruzzo con una conseguente asportazione di parte di materiale da quest'ultimo, l'asportazione può interessare pochi millimetri o una quantità importante di materiale cioè l'intero copriferro. Questo accade perché l'adesivo ha una resistenza maggiore a trazione rispetto alla resistenza a trazione del calcestruzzo. La presenza di umidità può inoltre spezzare i legami di idrogeno, responsabili della solidificazione della resina.

Nel caso in cui la resina è sufficientemente fluida riesce a penetrare nei fori superficiali ed indurendosi crea degli ancoraggi con il supporto, viceversa per una matrice viscosa potrebbe accadere che la penetrazione non sia sufficiente, così ad avvenuto indurimento non si creano ancoraggi sufficienti.

Possibili soluzioni²:

- Estensione del rinforzo fin verso gli appoggi;
- Utilizzo di piccoli spessori
- Impiego di fasce ad U trasversali di tessuto.

Ancoraggio

Per ottenere un adeguato ancoraggio del rinforzo è possibile integrare il sistema con meccanismi di ancoraggio quali ad esempio fiocchi. La realizzazione del foro viene effettuata mediante trapano elettrico, delle dimensioni secondo quanto riportato dal progettista ma non inferiori a 16 mm.

7.2 Ambiente alcalino

L'ambiente alcalino fornito dal calcestruzzo può causare dei danni di degrado sia nelle zone di interfaccia tra resina-fibra e/o resina-supporto, sia provocare un degrado nella resina tranne nelle resine epossidiche o di vinilestere che presentano una resistenza maggiore in ambiente alcalino. Sono da evitare, in ambiente alcalino, le fibre di vetro con basso contenuto di zirconia come ad esempio fibre costituite da materia prima di vetro E, viceversa è preferibile la fibra la cui materia prima sia ad elevato contenuto di zirconia come il vetro AR. Di contro il vetro AR presenta una resistenza inferiore rispetto alle compagne fibre utilizzate tradizionalmente nelle applicazioni strutturali.

7.3 Effetti dell'umidità

Tra i vari effetti dovuti all'assorbimento di umidità riconosciamo i principali quali:

- La riduzione di resistenza e di rigidità;
- La plasticizzazione.

Ovviamente l'assorbimento di umidità da parte del rinforzo è proporzionale alla composizione del rinforzo utilizzato, allo spessore e dalle condizioni di lavorazione.

7.4 Effetti di temperature estreme

Un ruolo molto importante per la resa dell'intervento è occupato dalla temperatura. Infatti, ogni resina avrà una propria temperatura di transizione, temperatura che determina il passaggio da uno stato plastico ad uno rigido. Al di sopra della temperatura di transizione vetrosa i legami tendono a indebolirsi così la prestazione del materiale si riduce notevolmente. Una soluzione è quella di scegliere, per i diversi interventi, una tipologia di resina con temperatura di transizione vetrosa superiore di almeno 15°C alla temperatura massima di esercizio, analogamente è possibile predisporre l'applicazione di protezioni termiche al sistema. I cicli di temperatura non danneggiano gravemente il sistema ma possono creare delle micro fratture all'interno delle resine ad alto modulo.

In riferimento al range di temperature nelle quali è possibile effettuare la posa in opera, le varie modalità di posa ed i limiti del sistema si fa riferimento al Manuale di preparazione e al Manuale di installazione.

Di particolare rilevanza è il comportamento al fuoco della resina, come già detto le matrici organiche sono particolarmente sensibili alle temperature. Infatti, al superamento della temperatura di transizione vetrosa il sistema FRP riduce drasticamente le sue capacità di resistenza e rigidità a causa di una perdita di aderenza tra il rinforzo ed il supporto, sia questo in laterizio che in calcestruzzo, a causa della fluidificazione della resina. Una soluzione a questo problema potrebbe essere l'incremento dello spessore dell'ultimo strato di rivestimento con materiali protettivi, cioè materiali certificati che limitino la propagazione delle fiamme e la propagazione di fumi (fumi tossici nel caso di resine).

La protezione all'incendio deve essere comunque garantita dai responsabili dell'opera, le informazioni riportate dai produttori in termini di resistenza al fuoco non hanno valenza di certificato, per questo è necessario utilizzare dei sistemi addizionali di protezione al fuoco in grado di garantire le prestazioni richieste. Le linee guida per la

valutazione delle caratteristiche delle prestazioni al fuoco dei sistemi FRP sono riportate nella **UNI EN ISO 25762:2012**.

7.5 Effetti di cicli di gelo e disgelo

Allo stesso modo dei cicli di temperatura, i cicli di gelo e disgelo, causano principalmente danni in presenza di umidità all'interno della resina causando micro fratture. In caso di applicazioni a basse temperature, al di sotto dello 0°C, sono consigliate le resine polimeriche i cui legami diventano particolarmente resistenti dando rigidità alla resina ma maggiore fragilità.

7.6 Effetti di radiazioni ultraviolette (UV)

L'esposizione ai raggi UV crea danni principalmente alle fibre, causando ad esempio erosioni superficiali. Dalla superficie danneggiata si introducono umidità ed altri componenti aggressivi. La soluzione a questo problema può essere data dall'aggiunta di adeguati additivi alla resina o la protezione dello strato di rinforzo.

7.7 Effetti deformazioni a lungo termine (viscosità e rilassamento)

La risposta delle fibre ai carichi agenti su di esse dipendono dal materiale da cui sono costituiti. La deformazione e la viscosità sono maggiormente presenti nei compositi caratterizzati da una bassa percentuale di fibre, generalmente le fibre di carbonio sono meno sensibili a carichi di lunga durata.

7.8 Effetti di fatica

È compito delle fibre contrastare la formazione delle fessure e ostacolarne la propagazione, da queste dipende l'efficacia del sistema. In linea di massima il comportamento dei materiali compositi è soddisfacente in termini di risposta alla fatica.

8 Tipologie di interventi

I sistemi compositi, in particolare si fa riferimento ai sistemi FRP i quali regolamentati dal CNR DT 200 R1/2013 al contrario dei sistemi FRCM i quali non sono anche stati regolamentati, sono particolarmente indicati per la realizzazione di rinforzo a taglio flessione e compressione e come già detto in precedenza per il miglioramento o adeguamento sismico, il miglioramento dei noti trave-pilastro come vedremo e incremento della duttilità.

Prima dell'applicazione delle fibre, quindi prima della realizzazione dell'intervento il progettista ha la responsabilità di controllare le condizioni del supporto nel quale effettuare l'intervento per verificare l'esistenza delle idonee condizioni di utilizzo del sistema.

Nella progettazione dei rinforzi strutturali, così come in qualunque intervento di rinforzo, la verifica deve essere effettuata allo Stato Limite Ultimo (SLU). Il risultato deve essere che:

$$E_d \leq R_d$$

Dove

E_d sono le sollecitazioni di progetto;

R_d è la capacità di progetto.

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

Dove

γ_{Rd} è il coefficiente parziale tiene conto delle incertezze del modello;

$a_{d,i}$ sono i parametri geometrici del modello

Il valore di resistenza o deformazione del materiale composito mi è dato dalla relazione:

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

Dove X_k è il valore caratteristico; γ_m è il coefficiente parziale del materiale, il suo valore è variabile assunto pari a 1,10 per le valutazioni

in SLU ma solo per caso di SLU di distacco dal supporto è possibile assumere il coefficiente parziale entro un range di valori, 1,20 e 1,50 a discrezione del progettista

Nel caso di valutazioni in stato limite di esercizio in cui devo considerare la coesistenza di fattori ambientali e di carichi statici avrò che η cioè il fattore di conversione è ottenuto dal prodotto tra il fattore di conversione ambientale η_a e il fattore di conversione connesso agli effetti di lunga durata η_1 .

<i>Modello di resistenza</i>	γ_{Rd}
<i>Flessione/Pressoflessione</i>	1
<i>Taglio/Torsione</i>	1.20
<i>Confinamento</i>	1.10

Tabella 9 - Coefficiente parziale (Fonte: DT 200 R1/2013)

Il Direttore dei Lavori può richiedere, al personale qualificato cioè in possesso di attestato di qualifica che si è occupato dell'installazione del sistema di rinforzo, un certificato di conformità dell'installazione all'interno allegata all'atto del Collaudo Tecnico e Statico e alla Relazione a Strutture Ultime.

8.1 Interventi su sistemi in cemento armato

Gli obiettivi dell'applicazione delle fibre, ai fini della messa in sicurezza dal punto di vista sismico di un edificio pre-esistente che non soddisfa i requisiti richiesti dalla vigente normativa sono:

- Riduzione e/o eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di tipo fragile
- Eliminazione del così detto "piano soffice"
- Incremento della duttilità del sistema globale.

Si premette che effetti dovuti ad irregolarità in pianta o in altezza non possono essere ridotti mediante questo sistema, ma è possibile introdurre una maggiore regolarità di rigidezze.

8.2 Preparazione del substrato

Molteplici sono i fattori che influenzano il funzionamento del rinforzo mediante FRP. Tra questi riconosciamo la procedura di preparazione del substrato. Nel caso del calcestruzzo è richiesto che questo non debba avere una resistenza a compressione inferiore a 15N/mm^2 se così non fosse sarà necessario intervenire con una tecnica di rinforzo differente. Prima dell'applicazione è inoltre necessaria la misurazione dell'umidità di sottofondo per le problematiche inerenti alla resina precedentemente descritti. Di seguito sono riportate le fasi di preparazione del substrato e applicazione della fibra, per approfondimenti fare riferimento al Cap. 4.8 del **CNR-DT 200 R1/2013**.

- (1) Si procede con la rimozione del calcestruzzo danneggiato da cause che possono essere di varia natura, ad esempio cause fisico-chimiche, sono caratterizzate da distacchi o fessurazioni e ovviamente ciò comprende anche la rimozione delle cause che hanno generato detti danni al conglomerato cementizio, vanno eliminate tutte le parti friabili soggette a distacco. Anche nel caso delle armature, se queste fossero corrose, sarà necessario avviare un trattamento di rimozione dello strato deteriorato e solo dopo procedere con la ricostruzione delle parti precedentemente rimosse. Questa fase può essere svolta sia manualmente che meccanicamente, tra le procedure più comuni riconosciamo: Carteggiatura (abrasione della superficie); Spazzolatura (pulizia della superficie in acciaio o utilizzata per la rimozioni di parti incoerenti nel calcestruzzo); Idrolavaggio (per l'eliminazione di parti incoerenti o inquinanti organici o inorganici con l'utilizzo di acqua ad alte pressioni); Idroscaffia (trattamento con acqua, più aggressivo del precedente, scabra la superficie); Sabbiatura (eliminazione di ruggine e parti incoerenti con inerte siliceo); Bocciardatura (martellinatura); Depolverizzazione (con aria compressa).
- (2) Reintegro delle parti mancanti con betoncino reoplastico e livellare con stucco epossidico o con un materiale che sia compatibile e che permetta di ottenere delle asperità di superficie superiori a 10mm. Le fessure superiori a 0.5 mm devono essere riempite con iniezioni.
- (3) Facoltativo: Sabbiatura che garantisca una ruvidezza di almeno 0.3 mm nella parte interessata dal rinforzo necessaria per garantire una migliore adesione tra il supporto e il sistema di rinforzo.

- (4) Arrotondamento degli spigoli, il posizionamento del composito in corrispondenza di bruschi variazioni di direzione, quali gli spigoli, potrebbe causare un'accelerazione del processo di usura della fibra a causa della concentrazione di tensioni. Il raggio di curvatura deve essere almeno pari a **20 mm**. Inoltre, la lunghezza di ancoraggio dovrà essere non inferiore ai **200 mm** se così non fosse sarà necessario l'utilizzo di ancoraggi meccanici.
- (5) Rimozione dei residui di lavorazione (polvere, detriti, ecc.).
- (6) Se la superficie non necessita di ripristino, ma comunque è di qualità scadente, potrebbe essere comunque necessaria l'applicazione di uno strato di primer mediante l'utilizzo di spatola, rullo o pennello. Se la superficie fosse eccessivamente assorbente predisporre il materiale necessario ad effettuare una seconda stesura.
- (7) Regolarizzazione della superficie, se necessario, a base di stucco epossidico su primer ancora fresco. È necessario che la superficie di applicazione del supporto sia liscia onde evitare punti di concentrazione delle sollecitazioni.
- (8) Particolare attenzione deve essere posta nella messa in opera del sistema di rinforzo è infatti necessario che le fibre siano orientate secondo la direzione prevista in fase di progetto e che non vi siano ondulazioni.
- (9) L'applicazione delle fibre deve avvenire nelle condizioni climatiche suggerite dal produttore. È consigliabile, nel caso di sistemi in situ, non applicarli in condizioni di forte umidità in quanto questa ritarda la solidificazione della resina.

Nel caso di esposizione diretta ai raggi UV:

- (7) Pulizia della superficie del composito con spugna satura di acqua e sapone
- (8) Applicazione di uno strato di vernice acrilica protettiva.

Oppure:

- (7) Applicazione di resina epossidica
- (8) Sabbiatura
- (9) Applicazione di uno strato di intonaco o malta cementizia di spessore consigliato dal produttore.

Protezione al fuoco:

- (10) Intonaco intumescente.

Applicazione a regola d'arte

«la qualità dell'esecuzione del rinforzo con materiali compositi dipende fortemente dalle condizioni di temperatura e di umidità ambientali, nonché da quelle del substrato su cui il rinforzo è applicato». (CNR DT 200 R1/2013).

È consigliabile che la temperatura esterna nella fase di applicazione del sistema di rinforzo FRP debba essere tra i 5°C e i 35°C una temperatura al di fuori di queste appena citate potrebbe compromettere la presa della resina sul sistema di supporto e sulle fibre. Il supporto non deve avere grado di umidità superiore al 4% , l'umidità infatti impedisce alla resina di creare dei legami resistenti.

Nel caso di rinforzo FRCM non sono richieste particolari attenzioni in termini di temperatura esterna, è per vero però che per intervalli più grandi di quelli citati pocanzi accade rispettivamente che la presa della malta rallenta o la lavorabilità della malta si riduce. Il supporto deve essere saturo d'acqua per impedire al supporto di assorbire la componente adesiva dello strato di adesione compromettendo l'incollaggio del sistema di rinforzo al supporto.

8.2.1 Rinforzo di pilastri in c.a.

Tra gli interventi più comuni riconosciamo il rinforzo in caso di armature deteriorate nei pilastri, o rinforzo della resistenza a compressione quali il confinamento. Come specificato nei paragrafi precedenti¹⁶ la duttilità degli elementi portanti è una caratteristica fondamentale nel caso di azioni sismiche, come vedremo più avanti l'utilizzo dei sistemi compositi è un efficiente metodo per l'incremento della duttilità. L'operazione di confinamento può essere continua, disponendo le fibre come una fasciatura oppure discontinua detta cerchiatura.

16. Par. 2.2
“Progettazioni per
azioni sismiche”.

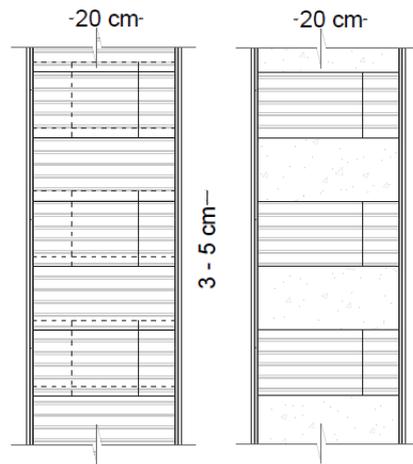


Figura 26 - Fasciatura continua (a sinistra), fasciatura discontinua (a destra)

La pressione applicata nel confinamento influisce sull'incremento di resistenza a compressione e sul valore di deformazione ultima.

La disposizione delle fibre avviene affinché la direzione del tessuto sia perpendicolare all'asse dell'elemento colonna. La verifica dell'elemento confinato è soddisfatta se:

$$N_{sd} \leq N_{Rcc,d}$$

Dove:

N_{sd} è l'azione assiale agente di progetto;

$N_{Rcc,d}$ è il valore di resistenza di progetto e si calcola come:

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}$$

Dove:

γ_{Rd} coefficiente parziale da assumersi pari a 1,10 (da Tab. 3.1 del CNR DT 200 R1/2013);

A_c è l'area della sezione trasversale dell'elemento;

f_{ccd} è la tensione di progetto del calcestruzzo confinato calcolato secondo quanto specificato nel §4.5.2.1 del CNR DT 200 R1/2013;

A_s è l'area di progetto dell'armatura metallica

f_{yd} è la tensione di progetto dell'armatura metallica calcolata secondo quanto specificato nel §3.3.3 del CNR DT 200 R1/2013;



Figura 27 – Confinamento discontinuo

Le fasi di preparazione sono quelle riportate nel capitolo precedente, è possibile vederne una rappresentazione grafica negli allegati C_StV_CFRP_01; C_StV_CFRP_02; C_StV_GFRP_03; C_StV_CFRP_04.

8.2.2 Interventi per meccanismi di collasso di tipo fragile

Le collassi di tipo fragile sono dovuti principalmente alle sollecitazioni di taglio, sarà per questo necessario eliminare:

- Collasso per sollecitazioni di taglio;
- Collasso per mancanza di adesione tra le barre longitudinali e il conglomerato cementizio;
- Collasso per compressione delle barre longitudinali (“svergolamento”);
- Crisi del nodo trave-pilastro.

Il rinforzo a taglio va predisposto nel caso in cui le sollecitazioni di taglio in condizioni di esercizio sono superiori alla resistenza a taglio dell’elemento e va verificato unicamente in SLU.

All’interno DT 200 R1/2013 sono indicate le procedure di rinforzo a taglio, le modalità di intervento non riportate all’interno del documento redatto dal CNR sono applicabili «purché sia dimostrata la loro efficacia e sia quantificato il contributo resistente a taglio»¹⁷

L'incremento della resistenza a taglio può essere realizzato applicando tessuti di composito con direzione delle fibre ortogonale all'asse o con orientamento compreso tra 0° e 180° come da figura sotto.

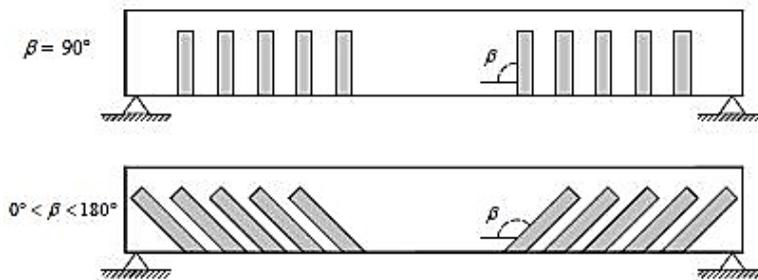


Figura 28 - Rinforzo a taglio trave (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)

Le fibre possono essere disposte avvolgendo totalmente la sezione e parzialmente, nel caso di avvolgimento parziale è possibile incrementare l'adesione delle estremità con barre lamine o strisce:

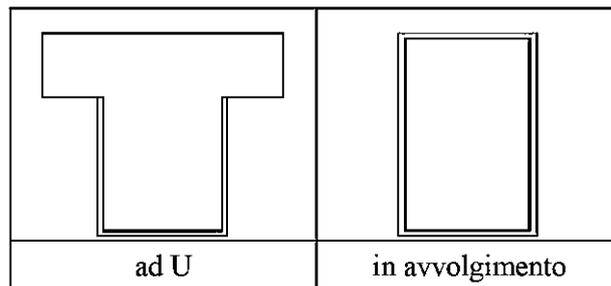


Figura 29 - Disposizione fibre trave (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)

Con l'introduzione del sistema di rinforzo l'incremento di resistenza a taglio di progetto è determinata come:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c} \}$$

Dove

$V_{Rd,s}$ capacità a taglio trazione dell'armatura trasversale di acciaio

$V_{Rd,f}$ capacità a taglio trazione dell'armatura trasversale del sistema

FRP

$V_{Rd,c}$ capacità taglio-compressione calcestruzzo

$V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,c}$ sono calcolati come richiesto da normativa vigente, mentre

$V_{Rd,c}$ è valutato come richiesto da DT 200 R1/2013:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{b_f}{p_f}$$

Dove

d altezza della sezione

f_{fed} resistenza efficace del sistema di rinforzo da determinare secondo quanto indicato nel § 4.3.3.2 del DT 200 R1/2013;

t_f è lo spessore del sistema di rinforzo FRP;

b_f larghezza delle fibre

p_f passo delle strisce

γ_{Rd} coefficiente parziale fornito nel §3.4.2 del DT 200 R11/2013 che nel caso del taglio/torsione è pari a 1.20

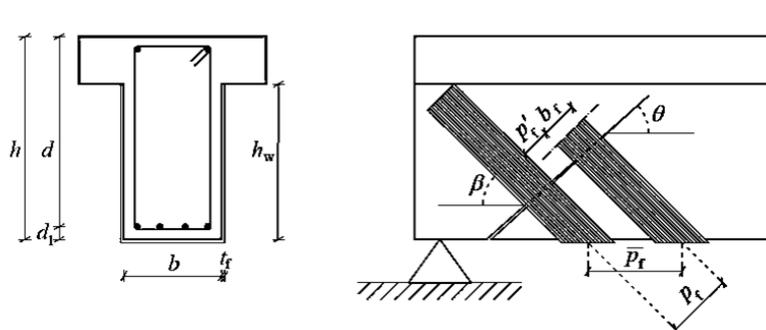


Figura 30 - Calcolo passo e larghezza fibre (Fonte CNR DT 200 R1/2013)

La larghezza ed il passo delle strisce per sistemi discontinui è calcolato con la seguente relazione:

$$b_f \leq p_f \leq \min \{ 0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm} \}$$

Con le seguenti limitazioni:

$$50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$$

Se risultasse $b_f > \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200mm\}$ sarà necessario utilizzare un sistema di rinforzo differente.

8.2.3 Interventi per meccanismi di collasso per piano soffice

Mediante l'utilizzo di fibre rinforzate è possibile intervenire nei punti di generazione delle cerniere plastiche, al piede ed in testa al pilastro, andando a rinforzare a flessione la specifica zona. La nascita delle cerniere plastiche è dovuta alla scarsità di elementi di confinamento, quali le staffe, causando uno schiacciamento del calcestruzzo e lo snervamento delle barre longitudinali.

8.2.4 Incremento della duttilità

Maggiore sarà la capacità della struttura a deformarsi in campo plastico maggiore sarà la sua duttilità da questo dipende l'attitudine della struttura a sopportare un'azione sismica. Il calcestruzzo non è celebre per il suo comportamento duttile, infatti, ha una capacità limitata di deformarsi prima della rottura a compressione ha cioè un comportamento di tipo fragile. L'applicazione dei sistemi FRP per il confinamento consente di ottenere un aumento della deformazione ultima e ottenere una maggiore duttilità dell'elemento compresso, principalmente pilastri.

L'obiettivo è quello di stabilire la "gerarchia delle resistenze" ottenendo una situazione in cui si ha pilastro forte – trave debole¹⁸.

8.2.5 Rinforzo nodo trave-colonna

L'obiettivo è quello di migliorare il punto di connessione delle componenti strutturali evitando meccanismi di collasso fragili come quelli analizzati nei capitoli precedenti.¹⁹

La fasciatura del nodo permette di ottenere un buon comportamento d'insieme alle sollecitazioni trasmesse dalla tamponatura in laterizio detto "puntone equivalente".

18. Vedi 2.2 § 2.2
"Progettazione per azioni sismiche".

19. Cap. 4
"Calcestruzzo armato".

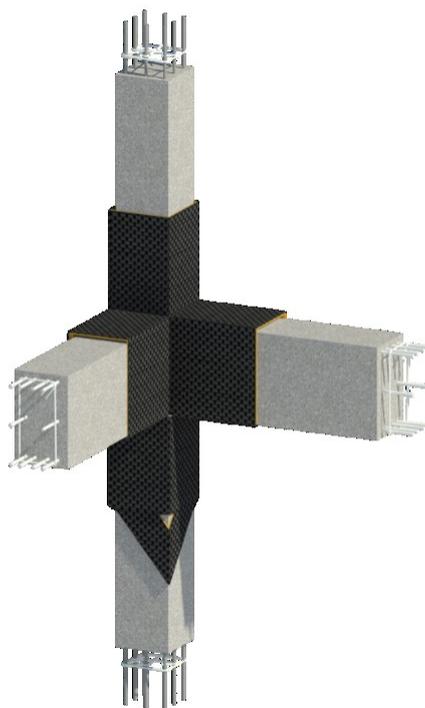


Figura 31 - Rinforzo nodo trave-colonna

La procedura di realizzazione del rinforzo del nodo si compone di più fasi, a partire dalla preparazione del substrato come descritto nel paragrafo precedente²⁰, si procede con la stesura di più strati di tessuto, per approfondimenti fare riferimento alle **Linee Guida Reluis**. Ricapitoliamo i passaggi principali per la preparazione del substrato:

1. Si procede con la rimozione del calcestruzzo danneggiato da cause che possono essere di varia natura;
2. Reintegro delle parti mancanti con betoncino reoplastico;
3. Facoltativo: Sabbiatura;
4. Arrotondamento degli spigoli con raggio di curvatura deve essere almeno pari a **20 mm**. Inoltre, la lunghezza di ancoraggio dovrà essere non inferiore ai **200 mm** se così non fosse sarà necessario l'utilizzo di ancoraggi meccanici;
5. Rimozione dei residui di lavorazione (polvere, detriti, ecc.).
6. Applicazione di uno strato di primer;

Da qui si procede con la disposizione degli strati di tessuto:

7. Regolarizzazione della superficie di applicazione del rinforzo con stucco epossidico di 1 - 1.5 mm con spatola piana o dentata;
8. Applicazione del primo strato omogeneo di resina epossidica sullo strato di stucco ancora fresco mediante l'utilizzo di rullo o pennello,

con spessore uniforme di 0,5 mm, utilizzo di appositi dispositivi di sicurezza (guanti, occhiali, mascherina);

9. Taglio delle fasce in fibra di carbonio secondo quanto riportato nelle tavole di progetto ed applicazione sullo strato ancora fresco di resina precedentemente applicato, è necessario orientare le fibre secondo la direzione delle tensioni previste da progetto con l'aiuto di un rullo, evitando ondulazioni e bolle d'aria. Nei punti di giunzione dei fogli è necessario sovrapporre orizzontalmente il tessuto per almeno 200 mm.

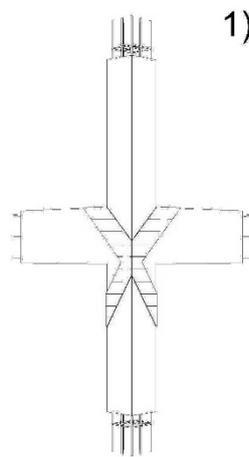


Figura 32- Stesura fibre Fase 1

Disposizione delle fibre in acciaio unidirezionali inclinati, impregnandolo con uno strato di resina al fine di assorbire l'azione esterna esercitata dalla tamponatura (Vedi fig.6).

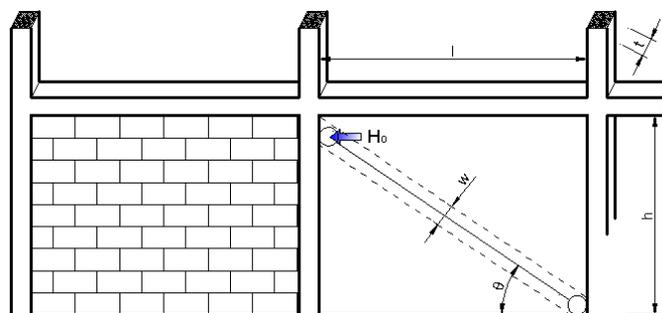


Figura 33- Puntone equivalente (Linee guida Relius)

Il dimensionamento di questo avviene mediante l'utilizzo del modello del "puntone equivalente" schematizzando l'azione della

tamponatura come una biella, si suppone quindi che le fibre debbano sopportare la componente orizzontale H_0 di tale azione.

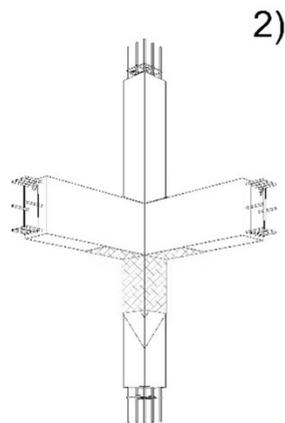


Figura 34 - Stesura fibre Fase 2

Disposizione di fasce quadriassiali di tessuto in corrispondenza del punto di giunzione trave pilastro come conclusione del rinforzo per sollecitazioni provenienti dal pannello murario

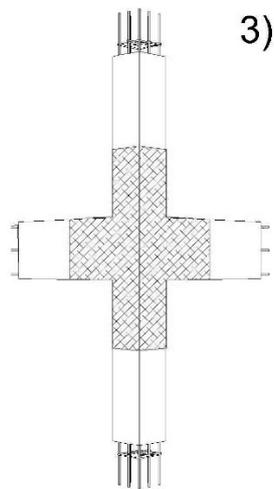


Figura 35 - Stesura fibre Fase 3

Disposizione di due fasce di fibra di carbonio (o vetro) quadriassiale al fine di rinforzare il pannello di nodo per le sollecitazioni di taglio.

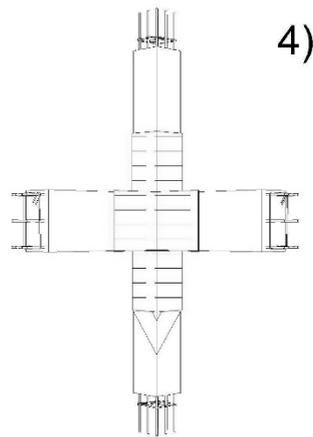


Figura 36 - Stesura fibre Fase 4

Fasciatura mediante fibre di carbonio (o vetro) unidirezionali delle estremità di trave e pilastro al fine di incrementare la resistenza a taglio e la duttilità del nodo. Questa fase è particolarmente consigliata nel caso di scarsa staffatura nelle zone critiche del nodo.

10. Applicazione del secondo strato di resina epossidica al fine di proteggere le fibre da agenti esterni, quali i raggi UV;
11. Sabbiatura;
12. Applicazione di uno strato di intonaco.

8.3 Interventi su sistemi in muratura

I sistemi FRP possono essere utilizzati per il rinforzo delle strutture murarie. Anche in questo caso, come detto in precedenza l'obiettivo è quello di garantire la sicurezza del manufatto in caso di azione esterna nel caso specifico di azione sismica. Essendo, la muratura ed il calcestruzzo, due principi costruttivi molto differenti, saranno differenti anche le modalità di intervento con i sistemi FRP.

La scelta del sistema di rinforzo avviene dopo la valutazione in termini di sicurezza sismica del manufatto, valutazione del rispetto dei limiti in SLU, intensità dell'azione sismica in funzione dell'intensità di accelerazione al suolo, caratteristiche dei materiali.

Nel caso di murature storiche è necessario fare riferimento alle Direttive del Presidente del Consiglio dei Ministri del 12/10/2007 nel quale è richiesta l'efficacia dell'intervento, la durabilità e la reversibilità di quest'ultimo.

Gli interventi mirano alla risoluzione dei diversi sistemi di collasso elencati nel paragrafo 3.1 come:

- Riparazione di lesioni dei maschi murari;
- Miglioramento delle connessioni murarie per evitare i fenomeni di ribaltamento;
- Contenimento delle spinte dovute ai sistemi di copertura, archi, volte;
- Eliminazione di elementi eccessivamente vulnerabili;
- I sistemi FRP non possono in alcun modo correggere eventuali disomogeneità di rigidità della struttura, ma è possibile andare ad applicare il sistema di rinforzo per migliorare la distribuzione delle rigidità.
- Miglioramento della duttilità locale con confinamento dei pilastri
- Nel caso delle murature, molto più che nelle strutture in conglomerato, il sistema di rinforzo può essere soggetto a fenomeni di instabilità locale e conseguente distacco dal supporto, la sollecitazione sismica aumenta la possibilità di deterioramento dell'adesione tra muratura e FRP.

Distacco dal supporto

Il distacco del rinforzo dall'elemento murario può seguire due differenti meccanismi: *End debonding*, il distacco avviene a partire dall'estremità; *Intermediate crack debonding*, il distacco avviene a partire dalla zona intermedia in presenza dei letti di malta o lesioni. Considerando una disposizione di fibre ortogonale rispetto all'andamento della lesione la forza di contrasto all'allargamento della lesione esercitata dal sistema composito è massima.

Per ovviare al problema del distacco è necessario inserire all'interno del sistema di rinforzo degli ancoraggi meccanici, questi possono essere: fiocchi, barre o corde introdotte ortogonalmente al sistema da rinforzare.

8.4 Preparazione del substrato

Come detto in precedenza le prestazioni del sistema di rinforzo sono influenzate dalla procedura di preparazione del supporto da rinforzare.

- (a) Rilievo del degrado strutturale e periodo di osservazione non inferiore ai 6 mesi.
- (b) Prove meccaniche effettuate per 100 m² di area da rinforzare con almeno 2 prove per aree omogenee:
 - Prova di compressione;

- Prova di taglio (su campione e con martinetto);
 - Prova con martinetti piatti;
 - Prove con ultrasuoni;
- (c) Prove di verifica di omogeneità della struttura sulla quale si ha intenzione di applicare il rinforzo. Queste possono essere:
- Battitura;
 - Radiografica;
 - Ultrasuoni;
 - Utilizzo del Penetrometro;
 - Termografia.
- (d) Rimozione degli strati ammalorati e delle cause di degrado fisico-chimico, quali umidità, microvegetazione, ecc.. Per processi di esfoliazione, fessurazione o attacco chimico è possibile utilizzare ad esempio sabbiatura o spazzolatura per la rimozione degli effetti e successivamente applicare elementi in grado di inibire il processo.
- (e) Reintegro delle parti rimosse con materiali compatibili con la muratura oggetto d'esame ad esempio stucco epossidico. Il reintegro deve fornire alla muratura un'asperità superiore a 10 mm, eventuali lesioni di larghezza superiore ai 0.5 mm vanno riempite mediante iniezioni ed eventuali lacune con profondità superiore ai 20 mm vanno colmate con materiale d'apporto;
- (f) Sabbiatura (facoltativa) per ottenere una ruvidezza almeno pari a 0.3 mm necessaria per garantire una migliore adesione tra il supporto e il sistema di rinforzo.
- (g) Se la superficie non necessita di ripristino, ma comunque è di qualità scadente, potrebbe essere comunque necessaria l'applicazione di uno strato di primer.
- (h) Ripulire accuratamente la superficie da eventuali residui di lavorazione, mediante utilizzo di spugna intrisa d'acqua o aria compressa.
- (i) L'applicazione delle fibre deve avvenire nelle condizioni climatiche suggerite dal produttore. È consigliabile, nel caso di sistemi in situ, non applicarli in condizioni di forte umidità in quanto questa ritarda la solidificazione della resina.
- (j) Arrotondamento degli spigoli, il posizionamento del composito in corrispondenza di bruschi variazioni di direzione, quali gli spigoli, potrebbe causare un'accelerazione del processo di usura della fibra a causa della concentrazione di tensioni. Il raggio di curvatura deve

essere almeno pari a 20 mm. Inoltre, la lunghezza di ancoraggio dovrà essere non inferiore ai 150 mm se così non fosse sarà necessario l'utilizzo di ancoraggi meccanici.

- (k) Realizzazione dei fori necessario per il passaggio dei connettori e pulizia del foro, dai residui di lavorazione, con aria compressa.
- (l) Particolare attenzione deve essere posta nella messa in opera del sistema di rinforzo è infatti necessario che le fibre siano orientate secondo la direzione prevista in fase di progetto e che non vi siano ondulazioni.
- (m) Inserimento dei connettori negli appositi fori e riempimento di questi, mediante apposita pistola, con resina epossidica fino al riempimento parziale del foro.
- (n) Impregnatura della parte finale del connettore.
- (o) Sabbiatura per garantire la ruvidezza necessaria al fine di un adeguata adesione dello strato di finitura.
- (p) Applicazione di uno strato di intonaco o malta cementizia o intonaco intumescente di spessore consigliato dal produttore.

Applicazione a regola d'arte

«la qualità dell'esecuzione del rinforzo con materiali compositi dipende fortemente dalle condizioni di temperatura e di umidità ambientali, nonché da quelle del substrato su cui il rinforzo è applicato». (CNR DT 200 R1/2013).

È consigliabile che la temperatura esterna nella fase di applicazione del sistema di rinforzo FRP debba essere tra i 5°C e i 35°C una temperatura al di fuori di queste appena citate potrebbe compromettere la presa della resina sul sistema di supporto e sulle fibre. Il supporto non deve avere grado di umidità superiore al 4% , l'umidità infatti impedisce alla resina di creare dei legami resistenti.

Nel caso di rinforzo FRCM non sono richieste particolari attenzioni in termini di temperatura esterna, è per vero però che per intervalli più grandi di quelli citati pocanzi accade rispettivamente che la presa della malta rallenta o la lavorabilità della malta si riduce. Il supporto deve essere saturo d'acqua per impedire al supporto di assorbire la componente adesiva dello strato di adesione compromettendo l'incollaggio del sistema di rinforzo al supporto.

8.4.1 Rinforzo pilastri

Il confinamento di un pilastro si attua attraverso l'applicazione di elementi, come appunto tessuti, barre o lamine, che contrastino la dilatazione trasversale. Come nel caso del calcestruzzo la fasciatura esterna può avvenire come fasciatura continua o cerchiatura.

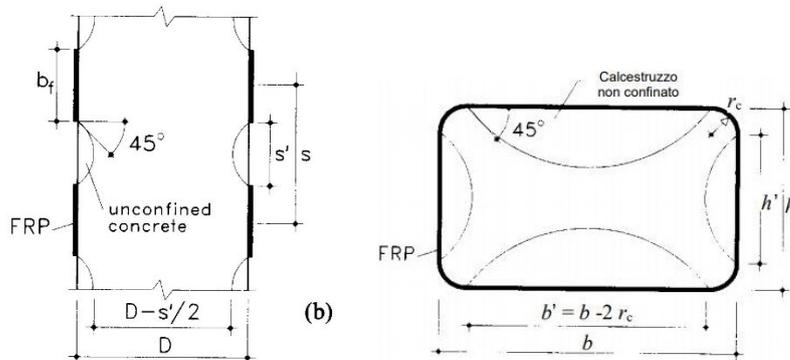


Figura 37 - Fasciatura discontinua di una sezione circolare (a sinistra); Fasciatura di sezione rettangolare (a destra) (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)

Nel caso di fasciatura solo esterna l'effettiva area confinata è solo una parte di quella complessiva, infatti si instaura il così detto "effetto arco" all'interno della sezione rettangolare, l'angolatura dell'arco dipende dal raggio di curvatura dell'arrotondamento degli angoli.

La verifica dell'elemento confinato è soddisfatta se:

$$N_{Rmc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_m \cdot f_{mcd} \geq A_m \cdot f_{md}$$

γ_{Rd} è il coefficiente parziale ricavabile dalla Tab.3-1 dal §3.4.2 del CNR DT 200 R1/2013;

A_m area della sezione trasversale dell'elemento rinforzato;

f_{mcd} è il valore della resistenza di progetto dell'elemento confinato;

f_{md} rappresenta la resistenza a compressione della muratura non confinata.

8.4.2 Interventi per meccanismi di collasso per ribaltamento

La muratura, come risaputo, ha una scarsa resistenza a trazione spesso per questo motivo si generano alla base di questa delle cerniere intorno alla quale avviene il ribaltamento. Questo accade quando non vi sono delle adeguate connessioni tra la muratura esterna ed elementi ortogonali

ad essa, oppure inadeguati ammorsamenti tra le pareti esterne. Mediante FRP è possibile intervenire effettuando delle cerchiature della struttura (se possibile).

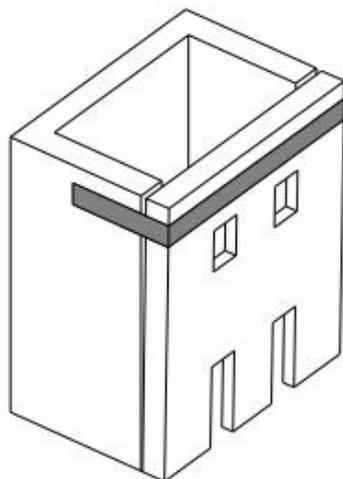


Figura 38 - Ribaltamento semplice (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)

Deve verificarsi che:

$$F_d \leq F_{Rd}$$

Cioè la forza esplicita dal rinforzo F_d deve essere minore o uguale alla massima forza esplicabile dal rinforzo F_{Rd} affinché la verifica a trazione sia soddisfatta. Nel caso di cerchiatura parziale come in (figura 24) è necessario effettuare una verifica al distacco, inoltre la lunghezza di sovrapposizione deve essere sufficiente al fine di evitare fenomeni come quello in figura 25

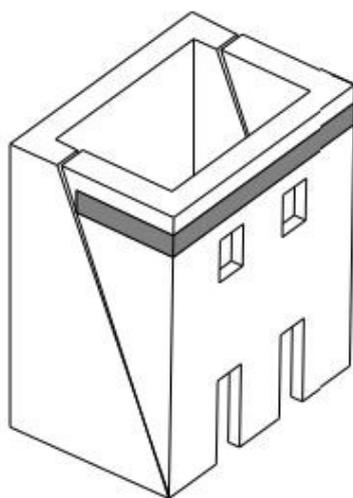


Figura 39 Meccanismo a cuneo (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)

Nel caso di fasciatura completa è possibile trascurare il fenomeno di distacco ed il meccanismo di cuneo.

8.4.3 Interventi per meccanismi di tipo fragile

Come detto nel caso dei sistemi costruttivi in calcestruzzo armato, i principali meccanismi di tipo fragile sono connessi alle azioni di taglio.

Il rinforzo del pannello murario per le sollecitazioni taglianti è effettuato disponendo i sistemi compositi nella direzione delle azioni taglianti, effettuando questa disposizione su entrambi i lati del pannello. Tendenzialmente alla disposizione delle fibre per il rinforzo a taglio si abbina il rinforzo a pressoflessione realizzato mediante la disposizione di strisce di tessuto o lamine verticalmente.

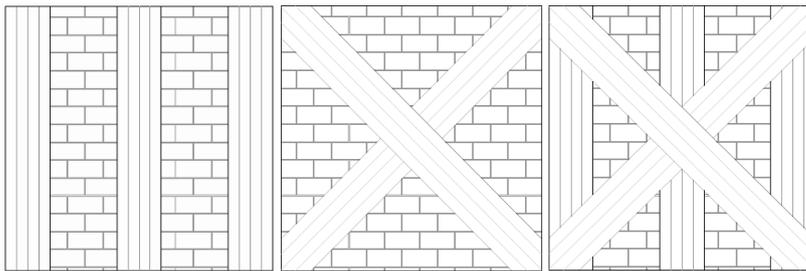


Figura 40 - Rinforzo per pressoflessione (a sinistra); rinforzo a taglio (al centro); unione dei precedenti (a sinistra)

8.4.4 Riparazione di lesioni in una muratura portante in laterizio

In questo caso la fase di preparazione del substrato come suggerito dal § 3.2.4.4 delle Linee Guida Reluis necessita delle fasi aggiuntive rispetto alla procedura precedentemente elencata come di seguito illustrato:

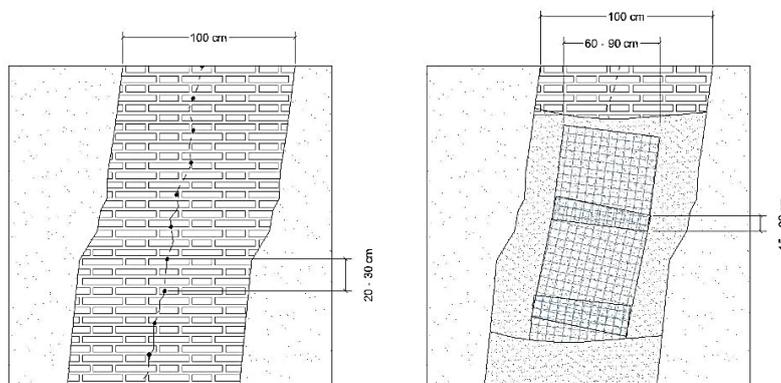


Figura 41 - Estratto Tavola M_PtV_FRCM_10

1. Messa a nudo della muratura esistente a cavallo della lesione per uno spessore di almeno 100 cm a cavallo della lesione;
2. Pulizia accurata mediante getto d'acqua per eliminare i residui di lavorazione come polvere e detriti;
3. Selezionare i punti di iniezione con un interasse di circa 20 - 30 cm dipendente dalla gravità della lesione. I punti saranno localizzati in corrispondenza dei corsi di malta mediante utensile meccanico e non battente con un diametro di 32 mm;
4. Pulizia del foro con aria compressa;
5. Inserimento di tubicini per l'impregnazione interna della muratura mediante acqua così che la pietra non assorba il materiale di riempimento della lesione. Questo processo permette l'individuazione di eventuali altre lesioni a causa della fuori uscita di acqua. Tutta l'operazione va eseguita 24 ore prima delle iniezioni;
6. Eventuale sigillatura mediante malta da risanamento che abbia caratteristiche fisico chimiche simili a quella esistente dei punti che potrebbero causare la fuoriuscita dell'impasto di cemento e calce (boiaccia) che sarà iniettata;
7. Inserire gli ugelli ad una profondità di almeno 10 - 15cm ed iniettare l'impasto;

8. Dal basso verso l'alto procedere all'iniezione della boiaccia²¹ con bassa pressione, non oltre i 2 atm, onde evitare pressione all'interno del paramento murario. Deve possedere delle specifiche caratteristiche:
 - elevata fluidità;
 - caratteristiche meccaniche compatibili con la muratura in esame;
 - traspirabilità;
 - ridotto ritiro idraulico;
9. Bagnare la superficie fino a saturazione prima dell'applicazione della malta così da evitare l'assorbimento del lattice da parte del laterizio e pregiudicare così l'adesione del sistema di rinforzo;
10. Applicazione del primo strato omogeneo di malta bicomponente con spessore uniforme massimo di 6 mm. Se fosse necessario livellare alcune parti anche di alcuni centimetri è necessario applicare la malta i più strati;
11. Taglio della rete in fibra di vetro a maglie quadrate secondo quanto riportato nelle tavole di progetto ed applicazione sullo strato ancora fresco di malta precedentemente applicato esercitando una leggera pressione con la spatola metallica per far sì che la rete possa aderire. Lo spessore delle strisce tagliate dovrà essere tra i 60 - 90 cm da disporre a cavallo della lesione. La superficie di sovrapposizione tra le diverse strisce deve essere tra i 15 - 20 cm;
12. Applicazione del secondo strato di malta fino ad uno spessore di 4mm;
13. Nel caso di lesione passante per l'intero spessore murario l'operazione di applicazione della rete di fibra di vetro sarà eseguita per entrambi i lati, invece nel caso di lesioni simili su entrambe le facciate dal punto (1) al punto (6) per la faccia della parete meno danneggiata e dal punto (1) al punto (12) per la faccia di parete maggiormente danneggiata. Nel caso di lesioni dissimili l'intero procedimento sarà eseguito per entrambe le superfici. La rappresentazione grafica è riportata nell'allegato M_PtV_FRCM_10.

9 Stoccaggio, collaudo e smaltimento

Al fine di tutelare le proprietà meccaniche dei materiali e nel rispetto delle norme di sicurezza vi sono alcune accortezze da tenere in considerazione nello stoccaggio del materiale, del collaudo degli interventi ai fini della verifica del raggiungimento dell'obiettivo prefissato in fase di progetto e la manutenzione dell'intervento al fine di garantirne un'adeguata durabilità.

21. Impasto molto liquido di calce o cemento con inerti fini.

Stoccaggio²²

Sarà il Produttore a fornire le informazioni necessarie per lo stoccaggio degli elementi di rinforzo. Tenendo conto delle proprietà finché sia delle fibre sia delle resine è necessario tenere conto dell'intervallo di temperatura nelle quali avviene lo stoccaggio, si consiglia generalmente un range di temperature comprese tra 10°C – 24°C con una percentuale di umidità non superiore a 20. Inoltre, è consigliabile conservare i tessuti e le resine all'interno dell'imballaggio originale non danneggiato in questo caso la durata del prodotto è stimata dai 6 ai 12 mesi. È opportuno proteggere le fasi dall'irraggiamento diretto.

Collaudo²³

Al fine di verificare il raggiungimento delle caratteristiche meccaniche dell'intervento e la verifica del raggiungimento delle prestazioni previste da progettista è possibile ricorrere a due tipologie di prove condotte sui testimoni²⁴: semi-distruttive e non distruttive.

- **Prove semi-distruttive:** consistono nell'esecuzione di prove di strappo a taglio e prove di strappo normale. Eseguite nell'ordine di una prova ogni 30 m² nel caso di costruzioni in conglomerato cementizio e di 50 m² nel caso di opere murarie con un minimo di 3 prove per tipologia di prova effettuata ritenuta significativa. Nel caso di prova di strappo normale viene utilizzato un macchinario che effettua dei tagli circolari nel rinforzo misurandone la tensione al taglio, il taglio dovrà avere un diametro minimo di 50 mm e lo spessore della lama di 20 mm. La tensione allo strappo non deve essere inferiore a 0.9 MPa nel caso di rinforzi applicati a calcestruzzo e nel caso delle murature non dovrà essere inferiore al 10% della resistenza a compressione. Nel caso di prova di strappo a taglio consiste nella verifica della bontà dell'incollaggio e della fase di preparazione del substrato.
- **Prove non distruttive:** Consistono in una serie di prove che non intaccano lo strato resistente ad esempio prove acustiche permette di individuare eventuali discontinuità nell'adesione del composito; Prove ultrasoniche per la localizzazione di difetti simile alla precedente; Prove termografiche maggiormente adatte per fibre di vetro e aramidiche in quanto caratterizzate da bassa conducibilità

22. § 2.4 Del CNR
DT 200 R1/2013.

23. Cap. 6 del CNR
DT 200 R1/2013.

24. Zone aggiuntive
di rinforzo delle
parti strutturali
studiate
opportunamente

termica, meno consigliate per le fibre di carbonio, in questa particolare prova bisogna prestare attenzione alle temperature utilizzate in modo da non danneggiare il sistema di incollaggio raggiungendo la temperatura di transizione vetrosa; Prove di emissione acustica anche in questo caso rilevano l'efficacia dell'adesione ed eventuali distacchi.

Durabilità

La durabilità rappresenta l'attitudine del materiale di sopportare le sollecitazioni derivanti da condizioni esterne, quali ad esempio urti, senza comportare decadimenti prestazionali inammissibili.

La durabilità è fortemente influenzata dall'eventuale presenza di vuoti, i quali causano una riduzione delle caratteristiche ad esempio una presenza di vuoti superiore al 2% incrementano la possibilità di ingresso di acqua all'interno dell'interfaccia matrice-fibre.

Un altro fattore fondamentale nel caso dei sistemi compositi per la valutazione della durabilità del sistema è la corretta valutazione delle condizioni climatiche e chimiche alle quali viene esposto. Questo influenza principalmente la matrice del componente che le fibre in sé, infatti le tipologie di degrado che intaccano le fibre sono dovute: corrosione (nel caso di fibre di carbonio); attacco dei raggi UV (principalmente nel caso di fibre aramidiche); fenomeni di creep (cioè fenomeno di deformazione a carico costante maggiormente frequente nelle fibre di vetro e di aramide). Le resine presenta invece molto più punti deboli

Riciclabilità

Una delle metodologie possibili per il riutilizzo delle fibre è la triturazione del materiale per la realizzazione di fibre differenti non utilizzabili per il rinforzo strutturale. Sono ancora in atto ricerche che permettano lo smaltimento di questi sistemi, la difficoltà è anche nella separazione della resina con la matrice.

10 Controllo sui materiali

Nel caso in cui si utilizzano materiali o sistemi differenti da quelli disciplinati all'interno delle normative tecniche è necessario comprovare la loro validità mediante una dichiarazione rilasciata dal Presidente del consiglio Superiore dei lavori pubblici. L'art.52 del DPR n.380/2001 introduce l'obbligo della certificazione di idoneità tecnica.

Nel caso dei sistemi compositi il CIT è rilasciato solo per sistemi compositi FRP costituiti da tessuti e resine. Al contrario per i sistemi FRCM costituiti da matrice cementizia e fibre rinforzate non esiste una certificazione. Ovviamente la mancanza di certificazione non corrisponde con l'impossibilità di utilizzo del sistema. Nel caso dei sistemi FRP sono presenti le Linee Guida emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici che identifica e definisce le modalità di intervento di dette fibre, questo però non avviene per i sistemi FRCM.

Esistono degli studi che hanno comprovato l'efficacia dei sistemi FRCM ma per il loro utilizzo in caso di rinforzi strutturali è necessaria l'accettazione da parte sia del direttore dei lavori che del collaudo strutturale, la responsabilità è a carico del progettista.

Per l'ottenimento del rilascio del CIT sono richieste una serie di prove da effettuare in laboratori aventi una serie di macchinari adatti autorizzati dall'art. 59 del DPR 380/2001.

«Le prove devono essere condotte da personale qualificato con comprovata esperienza nella caratterizzazione dei materiali compositi e devono essere eseguite utilizzando attrezzature di prova idonee ed opportunamente tarate.»²⁵

Eventuali variazioni effettuate sul processo di produzione dei sistemi compositi devono essere comunicate al Servizio Tecnico Centrale (STC) il quale valuterà se tali variazioni possano avere effetto sul CIT, prima che queste siano attuate, in tal caso sarà necessario effettuare le dovute prove per modificare o apportare i dovuti cambiamenti al CIT.

10.1 Controlli per sistemi di rinforzo preformati

Le prove di seguito considerate fanno riferimento a sistemi compositi FRP nel loro complesso cioè costituiti dall'unione di fibre e matrice. I valori minimi da rispettare di modulo elastico a trazione e resistenza a trazione delle fibre variano in funzione della classe considerata, i valori

di resistenza oscillano da 170 MPa per le fibre di vetro a 1200 MPa per le fibre aramidiche mentre i valori di modulo elastico oscillano tra i 17GPa e 55 GPa.

Le prove da condurre sono di diverso tipo:

- **Di tipo meccanico:** il numero di campioni da prelevare è pari a 5 per 3 lotti di produzione per un totale di 15 prodotti, nelle prove meccaniche sono valutati i valori di modulo elastico e tensione di rottura nella direzione delle fibre, i valori determinati non devono essere al di sotto dei valori stabiliti nel Par. 4.1 delle Linee Guida e riportati nel presente elaborato, nel caso in cui la valutazione dovesse essere negativa sarà necessario ri-prelevare 5 campioni di quel lotto e ri-effettuare le prove;

- **Prove cicliche di gelo-disgelo:** come detto in precedenza dai 4 lotti di produzione vengono prelevati 2 campioni. All'interno di una camera apposita, con umidità al 100% e temperatura di 38°C, è disposto il campione e sottoposto a 20 cicli di gelo e disgelo ognuno della durata di 4 ore. Sia i campioni sottoposti a questa prova sia i campioni non testati sono sottoposti a prove di trazione nella direzione delle fibre, le alterazioni delle caratteristiche di resistenza subite dal campione sottoposto alla prova non devono essere, al fine del soddisfacimento della prova, inferiori all'85% dei corrispondenti campioni non sottoposti al ciclo di gelo e disgelo. Inoltre, in questa fase sono analizzate le alterazioni superficiali infatti il tessuto non deve risultare eroso, fessurato o desquamato. Come nella prova descritta in precedente se il risultato dovesse risultare negativo si prelevano ulteriori 4 campioni dal lotto che ha portato a esito negativo e si ri-effettuano le prove.

- **Prove di invecchiamento artificiale:** Si prelevano 12 coppie di campioni così divise: 4 coppie per testare la resistenza all'umidità, 4 coppie per la resistenza agli ambienti salini ed altre 4 coppie per testare la resistenza agli ambienti alcalini, la durata dell'invecchiamento è scelta dal produttore. Si analizzano, durante il processo di invecchiamento artificiale, le alterazioni superficiali. La prova di trazione effettuata sui campioni sottoposti ad invecchiamento artificiale sia a campioni non sottoposti ad invecchiamento deve

riportare che i valori di tensione e il modulo elastico non siano inferiori all'85% dei campioni non invecchiati. Come nella prova descritta in precedente se il risultato dovesse risultare negativo si prelevano ulteriori 4 campioni dal lotto che ha portato a esito negativo e si ri effettuano le prove.

26. Vedi Par. 4.5
"Procedure per il
rilascio del
Certificato di
Idoneità Tecnica
(CIT)" del LG -
FRP

Tipo di prova		Numero campioni	Numero di lotti di produzione coinvolti
<i>Resistenza meccanica</i>	Determinazione modulo elastico e tensione di rottura	15	3
<i>Resistenza a cicli di gelo-disgelo</i>	Verifica di alterazioni superficiali e determinazione del modulo elastico e della tensione di rottura	4 sottoposti alla prova + 4 di controllo	2
<i>Resistenza all'umidità</i>		4 sottoposti alla prova + 4 di controllo	2
<i>Resistenza agli ambienti salini</i>		4 sottoposti alla prova + 4 di controllo	2
<i>Resistenza agli ambienti alcalini</i>		4 sottoposti alla prova + 4 di controllo	2
Numero totale di prove		47	

Tabella 10 - Riassunto prove su sistemi preformati (Fonte: LG - FRP)

Ottenuto il rilascio del CIT la fabbrica di produzione dovrà sottoporsi a delle prove periodiche, con intervalli non superiori ai 12 mesi, effettuando prove di trazione nella direzione delle fibre determinando le caratteristiche meccaniche del sistema in fibre. A seguito della produzione della dovuta documentazione²⁶ da fornire, l'Istruttoria del Servizio Tecnico Centrale analizza la veridicità e completezza dei documenti, in seguito ad una perlustrazione del luogo di produzione, il STC provvede al rilascio (o eventualmente alla negazione) del CIT

firmato dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. La durata di validità del CIT è pari a 5 anni con possibilità di rinnovo.

All'interno del cantiere l'accettazione dei materiali è sotto la responsabilità del direttore dei lavori il quale è obbligato ad effettuare i dovuti controlli di accettazione. Ogni lotto di spedizione deve essere campionato e sottoposto a prove meccaniche per la verifica della qualità e validità del prodotto. Inoltre, il direttore dei lavori è tenuto, prima della messa in opera, a verificare che tutti i prodotti siano conformi ed eventualmente ha il diritto di rifiutare lotti non conformi o eventuali marchi non registrati al STC non possono essere ammessi in cantiere.

10.2 Controlli per sistemi di rinforzo in situ

Le prove di seguito considerate fanno riferimento a sistemi compositi FRP costituiti da una specifica resina e da uno specifico tessuto fornite da una stessa ditta. I valori minimi da rispettare di modulo elastico a trazione e resistenza a trazione delle fibre variano in funzione della classe considerata, i valori di resistenza oscillano tra 1300 MPa per le fibre di vetro a 2200 MPa per le fibre aramidiche mentre i valori di modulo elastico oscilla tra i 60 GPa per le fibre di vetro ed i 100 GPa per le fibre aramidiche. A differenza dei sistemi preformati i valori appena citati sono da riferirsi alla sola fibra non tenendo conto della resina di impregnatura.

- **Prove di tipo meccanico:** L'azienda produttrice dovrà fornire 18 campioni per la realizzazione delle prove di trazione lungo la direzione delle fibre. I 18 provini saranno suddivisi in due gruppi da 9: un gruppo A caratterizzato da 3 laminati formati dalla sovrapposizione di tre strati di tessuto di dimensioni abbastanza grandi da realizzare 3 provini per un totale di 9 provini; Gruppo B caratterizzato da tre provini con spessore variabile di dimensioni abbastanza grandi da realizzare 3 provini per un totale di 9 provini. Le prove sono svolte alla temperatura standard di 20°C. Nelle prove meccaniche viene valutato il valor medio del modulo elastico e il valore caratteristico della tensione di rottura²⁷ nella direzione delle fibre, i valori determinati non devono essere al di sotto dei valori stabiliti nel Par. 4.1 delle Linee Guida, nel caso in cui la valutazione dovesse essere

27. Si calcola sottraendo dal valore medio del modulo elastico due volte la deviazione standard (o scarto quadratico medio cioè la stima della variabilità)

negativa sarà necessario ri-prelevare 3 campioni di quel lotto e ri-effettuare le prove.

Laminato	Tipo di prova		Numero campioni
Gruppo (A)	<i>Resistenza meccanica</i>	Determinazione modulo elastico e tensione di rottura	9
	<i>Resistenza a cicli di gelo-disgelo</i>	Verifica di alterazioni superficiali e determinazione del modulo elastico e della tensione di rottura	4 sottoposti alla prova + 4 di controllo
	<i>Resistenza all'umidità</i>		4x4 sottoposti alla prova + 4 di controllo
	<i>Resistenza agli ambienti salini</i>		4 sottoposti alla prova + 4 di controllo
	<i>Resistenza agli ambienti alcalini</i>		4 sottoposti alla prova + 4 di controllo
Gruppo (B)	<i>Resistenza meccanica</i>	Determinazione modulo elastico e tensione di rottura	9
Tabella 11 - Riassunto dei requisiti di prova in situ (Fonte: LG - F50)			

- **Prove per la verifica della durabilità ambientale:** il fornitore deve garantire un campione appartenente al gruppo A (sopra descritto) dal quale è possibile ricavare 32 campioni. La procedura della prova è analoga a quella descritta per i sistemi preformati nel caso di prove di gelo e disgelo, prova di resistenza all'umidità, agli ambienti alcalini e salini. Nel caso in cui la valutazione dovesse essere negativa sarà necessario ri-prelevare 3 campioni di quel lotto e ri-effettuare le prove;

I sistemi di rinforzo in fibre non possono essere forniti al cantiere se non accompagnati dal CIT. Anche in questo caso i lotti pervenuti in cantiere

sono sotto la responsabilità del Direttore dei Lavori che dovrà verificarne la validità e affidabilità mediante prove meccaniche presso un laboratorio riconosciuto dall'art. 59 del DPR 380/2001 in un tempo non superiore ai 30 gg. Il Direttore dei Lavori fornisce al laboratorio le fibre e la resina da testare con il manuale di installazione dato dal fornitore.

11 Codifica

Al fine di facilitare la catalogazione degli elaborati allegati è stato definito un sistema di codifica che permette attraverso un codice alfanumerico il riconoscimento univoco di ogni intervento.

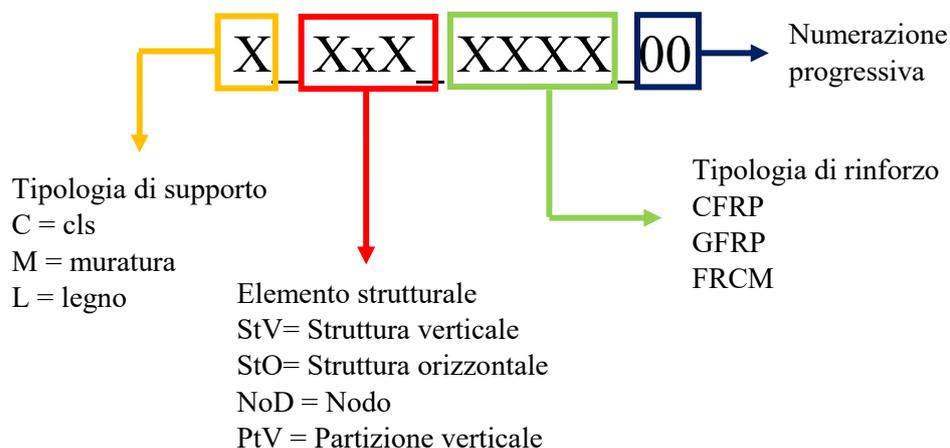
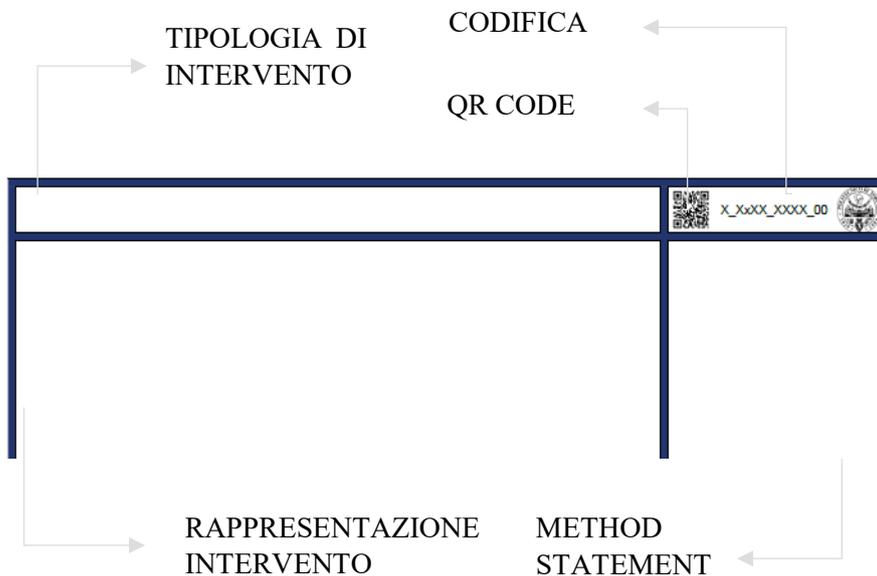


Tabella 12 - Codifica

CODICE	INTERVENTO
C_StV_CFRP_01	Confinamento continuo di un pilastro in calcestruzzo ben conservato con sistema CFRP
C_StV_CFRP_02	Confinamento continuo di un pilastro in calcestruzzo ammalorato con sistema CFRP
C_StV_GFRP_03	Confinamento continuo di un pilastro in calcestruzzo ben conservato con sistema GFRP
C_StV_GFRP_04	Confinamento discontinuo di un pilastro in calcestruzzo ben conservato con sistema GFRP
C_NoD_CFRP_05	Rinforzo nodo d'angolo trave-pilastro con sistema CFRP
C_NoD_CFRP_06	Rinforzo nodo d'angolo trave-pilastro con sistema GFRP
M_PtV_CFRP_07	Rinforzo a taglio di una partizione verticale in muratura con sistema CFRP
M_PtV_GFRP_08	Rinforzo a taglio di una partizione verticale in muratura con sistema GFRP
M_PtV_FRCM_09	Rinforzo di muratura portante in laterizio con sistema FRCM
M_PtV_FRCM_10	Riparazione di lesione in una muratura portante in laterizio con sistema FRCM
M_PtV_GFRP_11	Interventi di collegamento delle pareti perimetrali a pilastri e travi

11.1 Impostazione tavole

Nelle pagine a seguire saranno presentate una serie di soluzioni progettuali al fine di dare un contributo pratico e visivo di ciò che è stato descritto in precedenza. Le tavole saranno così organizzate:



Tipologia di intervento: titolo descrittivo dell'intervento riportato all'interno della tavola;

Codifica: come descritta nel capitolo precedente;

Rappresentazione grafica: è riportata la stratigrafia, piante e sezioni dell'elemento in scala opportuna e quando necessario particolare costruttivo 1:1;

Method statement: all'interno delle tavole per ogni soluzione proposta vi è la descrizione delle modalità di intervento necessarie al fine della realizzazione dell'opera a regola d'arte;

QR CODE: gli elaborati qui prodotti sono affiancati da un codice digitale la cui lettura porta all'interno del sito Amagpag nello specifico nella sezione Regola e Arte. Qui di seguito la descrizione delle fasi di realizzazione del sito.

11.2 Fasi di realizzazione della pagina web

«Regola & Arte è una divisione del gruppo AMAGPAG che si prefigge di individuare delle opportunità nuove nel settore della progettazione e della costruzione di edifici e opere complesse.

In sinergia con il Politecnico di Torino cura la redazione di un manuale di architettura tecnica e dettagli costruttivi, dalla fondazione al tetto, realizzato con la collaborazione di giovani ingegneri che, a partire dal lavoro di tesi, si prefiggono l'obiettivo di passare dal generale al particolare alla massima scala di dettaglio, definendo dei veri e propri manuali di istruzioni per gli attori coinvolti nel settore edilizio.»²⁸

Regola e arte è uno spin off di Amagpag che si prefigge l'obiettivo di tessere delle relazioni tra il mondo delle aziende e il mondo accademico del politecnico riuscendo a costruire un data base di soluzioni, di stratigrafie di dettagli del costruito dalla fondazione al tetto cercando di porre particolare attenzione alle tematiche dell'architettura tecnica facendo dialogare il mondo del passato quindi semplici piante prospetti e sezioni con il mondo della normativa e dell'innovazione attraverso le tecnologie della realtà aumentata del BIM e della renderizzazione in modo tale da creare una realtà immersiva all'interno della quale l'utente attraverso un'interfaccia grafica molto semplice abbia la possibilità di comprendere in modo semplice dei concetti particolarmente complessi l'utilizzo di piattaforme informatiche contente rispetto alla carta stampata la possibilità di avere un upgrade quotidiano in funzione della variazione di normativa e di tecnologie e di tutto il mondo delle aziende che attraverso un percorso di ricerca offre conoscenze a disposizione del progettista, dell'utente finale e ovviamente dello studente.

Si è pensato di inserire all'interno della pagina dedicata a regola e arte alcuni tools che consentono di rendere il lavoro, precedentemente presentato da altri studenti solo in forma cartacea, interattivo e quindi creare uno spazio di dialogo dove quello che normalmente rimane statico è in grado di mostrarci un'autopsia delle proprie stratigrafie e anche una serie di contenuti informativi circa le caratteristiche del sistema.

28. www.amagpag.com



Figura 42 - Estratto 1 sito "www.amagpag.com/laurasantoro"

All'interno del tirocinio ho elaborato una pagina web dove ho organizzato, sia graficamente che attraverso testi estratti dal presente elaborato, le conoscenze acquisite con la compilazione della tesi. Lo strumento cartaceo è stato trasformato in un mezzo interattivo facilitando la comprensione di meccanismi anche complessi. Le tipologie analizzate sono Muratura in laterizio e Calcestruzzo come si può notare nella Fig. 42, la pressione di uno di quei tasti porta direttamente alla tipologia costruttiva desiderata.

Alcuni degli interventi proposti sono stati elaborati attraverso programmi di grafica 3D come Sketchup e Revit e poi visualizzati mediante l'utilizzo di A360.

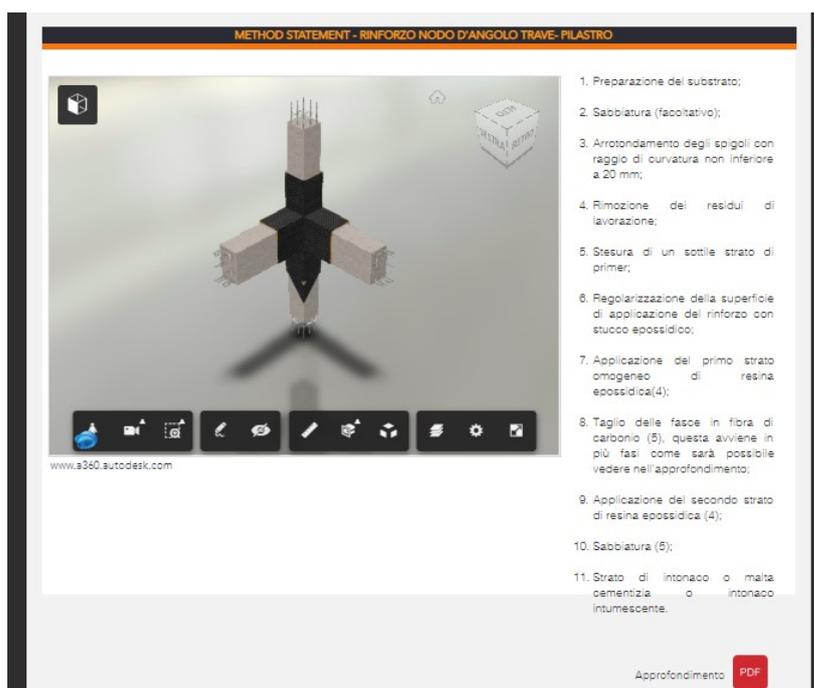


Figura 43 - Estratto 2 sito "www.amagpag.com/laurasantoro"

Com'è possibile notare dalla Fig. 43 la pagina web in questione è stata organizzata seguendo una procedura standard per ogni intervento. Gli elementi utilizzati per la descrizione dell'intervento sono una rappresentazione grafica 3D con visualizzatore A360 accompagnata dal Method Statement dell'intervento in questione, con un approfondimento annesso (come è possibile vedere in basso a destra "Approfondimento PDF") il quale permette di aprire un pdf in una pagina annessa nel quale vengono riportate delle specifiche inerenti l'applicazione delle fibre che per ovvi motivi non era possibile riportare interamente in un'unica pagina. La visualizzazione grafica, la quale ci dà la possibilità di manipolare il "pezzo" di intervento a nostro piacimento ad esempio tramite esplosioni, analisi delle singole parti, nomenclatura di queste ultime. In sequenza a questo stralcio, contenente quindi visualizzazione 3D e Method Statement, vi è la stratificazione del supporto ed un particolare costruttivo in scala reale.

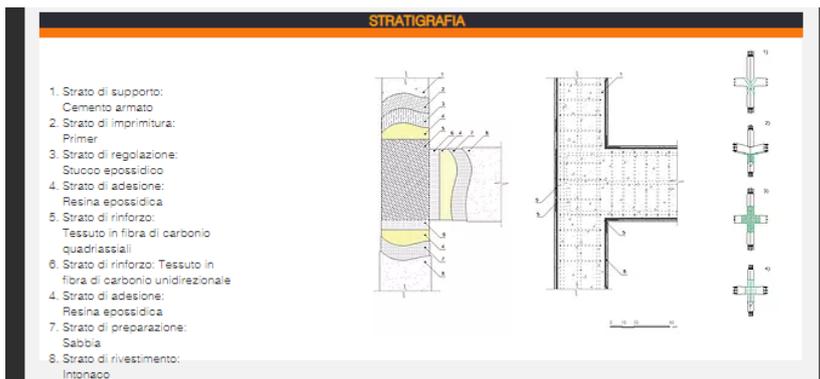


Figura 44 - Estratto 2 sito "www.amagpag.com/laurasantoro"

La stratigrafia dell'elemento con annessa legenda, e nel caso portato ad esempio nella Fig.44, una schematizzazione cronologica delle fasi di intervento.

12 Analisi dei costi

Volendo analizzare i sistemi compositi nel loro insieme non è possibile trascendere dalla valutazione economica degli interventi riportati in questo elaborato come allegati. L'obiettivo di questa analisi è quello di fornire un'indicazione sull'incidenza economica degli interventi tenendo conto della mutevolezza dei prezzi di riferimento utilizzati in questo capitolo. Per il computo è stato fatto riferimento al Prezziario per Opere e Lavori Pubblici della Regione Piemonte, listini prezzi di diverse case produttrici ed analisi prezzi.

Ai prezzi ricavati dal Prezziario sopra citato sarà necessario aggiungere il costo della manodopera fornito dalla Regione Piemonte.

I prezzi orari indicati NON sono comprensivi delle spese generali e utili d'impresa				
DATA RETRIBUZIONE	OPERAI IV LIVELLO	OPERAI SPECIALIZZATO	OPERAI QUALIFICATO	OPERAI COMUNE
Costo medio orario per il personale dipendente da imprese del settore dell'edilizia e attività affini				
OPERAI				
Decreto Ministero del lavoro e delle politiche sociali 3 aprile 2017				
Ministero del Lavoro – Provincia Torino				
Costo medio orario	30,50	28,89	26,83	24,14

Figura 45 - Estratto Regione Piemonte

Il risultato di questa operazione sarà il costo tecnico di costruzione €/m², al quale sono aggiunte:

- Le spese generali (Sg) pari al 15% del costo tecnico di costruzione;
- L'utile d'impresa (Ui) pari al 10% del costo tecnico più spese generali;

Il costo di costruzione (Cc) sarà pari a:

$$Cc = Ctk + Sg + Ui$$

A questo vanno applicate due percentuali di costo relative agli oneri di progettazione e di sicurezza pari rispettivamente all'10% e 2%.

13 Matrice di confronto

In conclusione, di questo elaborato è doveroso riportare un sistema di matrici che permetta di confrontare i diversi interventi in funzione delle loro caratteristiche consentendo di individuare la tipologia di intervento risponde in modo migliore alle caratteristiche attese.



Le matrici sono organizzate considerando 2 grandi famiglie di interventi in funzione del substrato considerato, ovvero, calcestruzzo e muratura in laterizio.

Le caratteristiche considerate sono:

- **Impatto economico:** valutato nei capitoli precedenti²⁸;
- **Caratteristiche meccaniche:** riferito al sistema composito nel suo complesso cioè FRP e FRCM e non alle sole fibre, perché pur essendo la fibra la parte resistente del composito, il comportamento meccanico del sistema è dato dall'interazione tra matrice e fibre, le due cose sono inscindibili;
- **Comportamento al fuoco:** in funzione del tempo di mantenimento delle caratteristiche meccaniche del sistema sottoposto a incendio e la non produzione di fumi o gas;
- **Permeabilità al vapore acqueo:** ad esempio le resine non permettono la permeabilità del supporto ma è consigliabile effettuare degli interventi localizzati così non è per le malte inorganiche;
- **Durabilità:** la capacità del sistema composito a mantenere le proprietà meccaniche e le caratteristiche di resistenza anche sottoposto ad agenti atmosferici, variazioni di temperatura ed umidità;
- **Tempo di realizzazione dell'intervento:** facendo una stima approssimativa tenendo conto non solo del tempo di realizzazione.

28. Cap.12 "analisi dei costi"

Confronto per gli interventi in strutture in calcestruzzo armato:

CONFINAMENTO CONTINUO DI UN PILASTRO IN CALCESTRUZZO						
	Impatto economico	Caratteristiche meccaniche	Comportamento al fuoco	Permeabilità al vapore	Durabilità	Facilità di posa
C_StV_CFRP_01	Yellow	Green	Red	Yellow	Yellow	Yellow
C_StV_GFRP_03	Green	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow

Confronto per gli elementi in strutture muratura:

RINFORZO A TAGLIO DI UNA PARTIZIONE VERTICALE IN MURATURA						
	Impatto economico	Caratteristiche meccaniche	Comportamento al fuoco	Permeabilità al vapore	Durabilità	Facilità di posa
M_PtV_CFRP_04	Red	Green	Red	Red	Yellow	Yellow
M_PtV_GFRP_05	Yellow	Red	Red	Red	Yellow	Yellow
M_PtV_FRCM_06	Green	Red	Yellow	Yellow	Green	Green

Com'è possibile evincere le fibre di carbonio presentano delle caratteristiche meccaniche elevate rispetto alle fibre di vetro ma al contempo più dispendiose. La scarsità della corrispondenza di caratteristiche di resistenza al fuoco nei sistemi FRP (cioè CFRP e GFRP) è da ricondursi al comportamento della resina ad alte temperature, questa infatti come detto più volte tende a fluidificare al raggiungimento della temperatura di transizione vetrosa la quale si aggira tra i 60°C - 70°C, oltre alla produzione di fumi nocivi da parte della matrice. Lo stesso non vale per la malta cementizia dei sistemi FRCM che al contrario ha un comportamento simile alla muratura o calcestruzzo e non produce fumi tossici per l'uomo. La differenza nella qualità del comportamento in presenza di umidità tra calcestruzzo e muratura è dovuta al fatto che la muratura rispetto al conglomerato cementizio necessita di particolari attenzioni la resina non permette la traspirabilità del substrato, al contrario la malta sì.

In termini di durabilità le differenze sono dovute si diversi punti deboli del sistema si incollaggio nel caso dei sistemi FRP, ovvero la resina, soprattutto nel caso di applicazione a sistemi umidi o ad applicazioni in zone di diretta esposizione al sole. La mala cementizia di contro non garantisce la stessa resistenza di adesione della resina, anzi presenta delle problematiche nell'impregnazione e quindi nell'aderenze matrice-fibra mentre la resina è soggetta a fenomeni di delaminazione.

Per ultimo analizziamo la complessità di posa del sistema di rinforzo, la semplicità nel caso di malte cementizie è dovuta a due fattori fondamentali: - è un materiale ben conosciuto dalle maestranze, non è richiesta la presenza di un operaio specializzato; - al contrario della resina la malta non richiede particolari condizioni di temperatura esterna per la sua applicazione.

Conclusioni

La metodologia con la quale questo lavoro di tesi è stato elaborato mira alla comprensione dell'applicazione dei sistemi compositi a 360°. Volutamente non si è posta l'attenzione su un unico caso studio con l'obiettivo di trattare l'argomento in maniera metodica andando ad acquisire le conoscenze necessarie per elaborare una soluzione conforme ad ogni situazione riscontrabile nella vita professionale. L'inserimento dell'elaborato all'interno di un database ha come obiettivo la condivisione pubblica di un metodo univoco di applicazione dell'intervento e condivisione delle conoscenze necessarie per la determinazione della tipologia di composito idoneo al sistema sul quale si vuole intervenire. Inoltre, in vista di uno sviluppo tecnologico diventa interessante potersi interfacciare con il cliente in vista di una vendita o delle maestranze in cantiere attraverso strumenti differenti dalla carta.

Bibliografia

- ANCE/CRESME. «Lo stato del territorio italiano 2012, Rischio sismico e edifici industriali.» 2012.
- Assemblea Generale del Consiglio. «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.» s.d.
- . *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni.* 2006.
- Brigante, Domenico. *Rinforzo strutturale con materiali compositi.* Palermo: GRAFILL, 2013.
- CNR. *Istruzioni per la Progettazione, L'esecuzione ed il Collaudo di interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi ibrorinforzati.* 2013.
- Consiglio superiore dei lavori pubblici. «Linee 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.» s.d.
- Francesco Micelli, Maria Antonietta Aiello. «Durabilità in ambiente alcalino dei rinforzi fibrosi per il consolidamento strutturale.» s.d.
- Giacomo Crivellari, Elia Grassi. *CREPA!* Milano, 2013.
- Grosso, Luigi. «Prezziario delle opere di ristrutturazione e recupero.» s.d.
- Mariangela Bellomo, Valeria D'Ambrosio. *Fibrorinforzati in architettura.* Napoli, 2009.
- Massimo Mariani, Francesco Pugi. *Effeti negativi del sisma verticale sul comportamento delle pareti esisenti in muratura.* 2017.
- Norme Tecniche per le Costruzioni. 2018.
- Reluis. «Linee Guida per riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni.» 2011.

Sitografia

www.ingenio-web.it

www.kimia.it

www.ingv.com

Indice delle figure

Figura 1 - Stratigrafia (Fonte:/www.pi.ingv.it)	5
Figura 2 - Accelerazione al suolo (www.pi.ingv.it)	6
Figura 3 - Schematizzazione struttura	7
Figura 4 - Risposta sismica locale (http://sismolab.dgt.uniud.it)	11
Figura 5 - Meccanismo di collasso piano debole (Fonte:Linee guida Reluis).....	21
Figura 6 - Azione spinta tamponature (Fonte: Reluis linee guida).....	22
Figura 7 - Pilastro tozzo rottura a taglio (Fonte: Manuale AeDES)	23
Figura 8 - Espulsione copriferro (Fonte: Manuale AeDES).....	23
Figura 9-(A sinistra) Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito (DT200/2004); (A destra) Visualizzazione al microscopio (MAPEI).....	27
Figura 10 - Classificazione FRCM.....	31
Figura 11 - Classificazioni FRP.....	32
Figura 12 - Formatura in situ (Fonte: CNR DT 200 R1/2013).....	36
Figura 13- Da destra rete di vetro, rete in carbonio, rete in aramidiche (Fonte: edilportale)	37
Figura 14 - Lamine in fibra di carbonio con faccia irruvidita (Fonte: edilportale).....	37
Figura 15 - Da destra barra in carbonio, vetro, aramidica (Fonte: edilportale)	38
Figura 16 - Da destra tessuto unidirezionale in fibra di carbonio, vetro, aramidiche (Fonte: edilportale).....	38
Figura 17 - Fibre di carbonio bidirezionali.....	38
Figura 18 - Fibre multidirezionali (Fonte:edilporlate).....	39
Figura 19 - Schema di funzionamento della pultrusione (Fonte: DT R1 200/2013)	39
Figura 20 - Tipologie di fibre (Fonte: CNR DT R1 200/2013)	40
Figura 21 -Tessitura di fibre di vetro (Fonte:www.jeragofibers.it)	41
Figura 22 - Processo di laminazione(Fonte: CNR DT 200 R1/2013)	41
Figura 23 - Grafico influenza del contenuto di resina sulle proprietà meccaniche delle fibre (Fonte: DT 200 R1/2013).....	44
Figura 24 - Legame costitutivo fibra, matrice e composito (Fonte:DT 200 R1/2013)	46
Figura 25- Perdita di aderenza tra rinforzo e calcestruzzo (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)	50
Figura 26 - Fasciatura continua (a sinistra), fasciatura discontinua (a destra)	59
Figura 27 – Confinamento discontinuo	60
Figura 28 - Rinforzo a taglio trave (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)	61
Figura 29 - Disposizione fibre trave (Fonte: CNR DT 200 R1/2013).....	61
Figura 30 - Calcolo passo e larghezza fibre (Fonte CNR DT 200 R1/2013).....	62
Figura 31 - Rinforzo nodo trave-colonna	64
Figura 32- Stesura fibre Fase 1	65
Figura 33- Puntone equivalente (Linee guida Relius).....	65
Figura 34 - Stesura fibre Fase 2.....	66
Figura 35 - Stesura fibre Fase 3.....	66
Figura 36 - Stesura fibre Fase 4.....	67
Figura 37 - Fasciatura discontinua di una sezione circolare (a sinistra); Fasciatura di sezione rettangolare (a destra) (Fonte: CNR DT 200 R1/2013)	71
Figura 38 - Ribaltamento semplice (Fonte: CNR DT 200 R1/2013).....	72
Figura 39 Meccanismo a cuneo (Fonte: CNR DT 200 R1/2013).....	72
Figura 40 - Rinforzo per pressoflessione (a sinistra); rinforzo a taglio (al centro); unione dei precedenti (a sinistra)	73
Figura 41 - Estratto Tavola M_PtV_FRCM_10	74
Figura 42 - Estratto 1 sito "www.amagpag.com/laurasantoro"	87
Figura 43 - Estratto 2 sito "www.amagpag.com/laurasantoro"	87
Figura 44 - Estratto 2 sito "www.amagpag.com/laurasantoro"	88
Figura 45 - Estratto Regione Piemonte.....	89

Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Dissesti localizzati (immagini: Linee guida 9 Febbraio 2011, per gentile concessione del Prof. Grazzini).....	16
Tabella 2 - Dissesti di insieme (immagini: Linee guida 9 Febbraio 2011, per gentile concessione del Prof. Grazzini).....	18
Tabella 3 - Sistemi FRP (“Fibro rinforzati in architettura – Bellomo, D’Ambrosio”).....	29
Tabella 4 - Matrice organica.....	30
Tabella 5 - Fibre di carbonio	33
Tabella 6 - Fibre aramidiche.....	34
Tabella 7 - Fibre di vetro	35
Tabella 8 – Normativo di riferimento per la determinazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei compositi	48
Tabella 9 - Coefficiente parziale (Fonte: DT 200 R1/2013).....	55
Tabella 10 - Riassunto prove su sistemi preformati (Fonte: LG - FRP).....	80
Tabella 11 - Riassunto prove per sistemi di rinforzo in situ (Fonte: LG - FRP)	82
Tabella 12 - Codifica	84

Ringraziamenti

Un ringraziamento all'Arch. Zerbinatti, l'Ing. Caldera e il Dott. Roffina per le conoscenze che ogni giorno trasferiscono a noi studenti e per avermi guidata nella realizzazione di questa tesi.

All'Ing. Grazzini per aver contribuito alla stesura della tesi e alla sua infinita disponibilità.

Nuovamente grazie a Paolo per avermi accolta nella famiglia di "Regola e arte" in particolare modo per avermi sostenuta e consigliato in questo percorso.

Un grande ringraziamento ai miei genitori, Giacomo e Marisa, instancabili sostenitori del mio percorso vorrei che questo traguardo fosse anche vostro ripagandovi, almeno in parte, dei sacrifici fatti per me, vi voglio bene.

Ai miei Amici, quelli con la A maiuscola, che mi hanno accompagnata in questo cammino fatto anche di distanza e lunghe assenze avendo sempre pronto un "dai che ce la fai".

Ed infine, solo per chiudere in bellezza, grazie a te Claudio che in questi anni sei stato un punto di riferimento, anche quando lo meritavo meno sei stato al mio fianco, non importa dove finiremo sei tu la mia casa.