



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile ambientale

**Analisi di elementi in cemento armato rinforzati con  
materiali innovativi**

**Analyses of RC elements strengthened with new innovative  
materials**

Relatore:

Prof. Ing. Roberto Capozucca

Tesi di Laurea di:

Patryk Babicki Antoni

A.A. 2020 / 2021



# Abstract

In tempi recenti si sono sviluppate nuove tecnologie e materiali compositi, i quali dotati di ottime caratteristiche meccaniche, hanno trovato ampi campi di utilizzo, tra cui il rinforzo strutturale dei fabbricati. CFRP, GFRP, AFRP, sono i materiali fibrorinforzati a matrice polimerica di cui tratteremo nella prima parte. Focalizzandoci sui CFRP, composto da fibre in carbonio ad altissima resistenza e da una matrice polimerica, si può facilmente dedurre che il materiale è adatto all' applicazione su elementi in cemento armato, sia per le elevatissime resistenze a trazione offerte, sia per una compatibilità in termini di rigidità. Essendo un materiale relativamente recente, fondamentale è la definizione delle problematiche del progetto: il decadimento delle resistenze in funzione dell' umidità, dell' ambiente alcalino, dell' esposizione al fuoco, temperature e cicli gelo e disgelo, oltre alle modalità del carico ed i conseguenti fenomeni di "Creep". Quindi con un' analisi allo stato limite elastico e ultimo, definiremo le resistenze flessionali e l' applicazione longitudinale del rinforzo, come le resistenze taglianti e le applicazioni avvolgenti sull' elemento. Alla luce di un' esame di un fabbricato esistente, il quale dovrà effettuare un cambio di destinazione d' uso, si definirà una tipologia di rinforzo innovativa con la tecnica NSM, la quale per la facilità di esecuzione, l' efficacia, la poca invadenza e la maggior protezione del rinforzo sarà la miglior candidata per l' applicazione strutturale presa in esame.

# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduzione</b>  | <b>I</b>  |
| <b>1 Materiali</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 <i>Introduzione</i> .....  | 1         |
| 1.2 <i>Classificazione dei sistemi di rinforzo</i> .....                 | 2         |
| 1.3 <i>Proprietà meccaniche dei materiali</i> .....                      | 3         |
| 1.4 <i>Istallazione e particolari costruttivi su c.a. e c.a.p.</i> ..... | 11        |
| <b>2 Concetti del progetto di rinforzo di strutture in c.a.</b>          | <b>14</b> |
| 2.1 <i>Requisiti fondamentali</i> .....                                  | 14        |
| 2.2 <i>Requisiti di durabilità</i> .....                                 | 14        |
| 2.3 <i>Principi della progettazione</i> .....                            | 15        |
| 2.3.1 <i>Generalità</i> .....  | 15        |
| 2.3.2 <i>Vita utile ed azioni di calcolo</i> .....                       | 15        |
| 2.3.3 <i>Proprietà dei materiali e relativi valori di calcolo</i> .....  | 16        |
| 2.3.4 <i>Capacità di calcolo</i> .....                                   | 16        |
| 2.3.5 <i>Coefficienti parziali</i> .....                                 | 17        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.4      | <i>Problematiche del progetto</i> .....                              | 17        |
| 2.4.1    | <i>Azioni ambientali</i> .....                                       | 17        |
| 2.4.2    | <i>Modalità di carico a lunga durata</i> .....                       | 19        |
| 2.4.3    | <i>Resistenza alle azioni causate da impatti ed esplosioni</i> ..... | 19        |
| 2.4.4    | <i>Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco</i> .....    | 20        |
| <b>3</b> | <b>Rinforzo a flessione</b>  | <b>21</b> |
| 3.1      | <i>Generalità</i> .....  | 21        |
| 3.2      | <i>Analisi del comportamento allo Stato Limite Ultimo</i> .....      | 21        |
| 3.2.1    | <i>Resistenza di progetto a flessione</i> .....                      | 22        |
| 3.2.2    | <i>Collasso per distacco di estremità</i> .....                      | 24        |
| 3.3      | <i>Analisi del comportamento allo Stato Limite Elastico</i> .....    | 25        |
| 3.3.1    | <i>Verifica delle tensioni</i> .....                                 | 26        |
| 3.3.2    | <i>Verifica delle frecce</i> .....                                   | 27        |
| 3.3.3    | <i>Verifica dell' apertura delle fessure</i> .....                   | 27        |
| 3.3.4    | <i>Duttilità</i> .....   | 28        |
| <b>4</b> | <b>Rinforzo a taglio</b>   | <b>29</b> |
| 4.1      | <i>Generalità</i> .....  | 29        |
| 4.2      | <i>Resistenza di progetto a taglio</i> .....                         | 30        |
| 4.3      | <i>Resistenza efficace</i> .....                                     | 31        |

**5 Esempio di edificio esistente in cemento armato** **32**

*5.1 Generalità.....32*

*5.2 Analisi del fabbricato.....33*

*5.3 Definizione del terreno di fondazione.....43*

*5.4 Analisi dei carichi pre e post cambio di destinazione.....45*

*5.5 Rinforzo degli elementi in c.a. con la tecnica NSM.....46*

**Bibliografia** **II**

# Introduzione

L'industria edilizia ha fatto un utilizzo smodato del calcestruzzo armato, fin dai primi del Novecento, a tal punto da diventare uno dei materiali più utilizzati per le costruzioni. Sistemi edilizi realizzati con un "ossatura strutturale" in c.a., sono dimensionati in funzione del loro compito e della destinazione d'uso, da figure professioniste quali gli Ingegneri Civili ed Edili. Cambi d'uso, incrementi di carico, o errori di progettazione hanno fatto sì che queste tipologie edilizie necessitino di interventi di ripristino e miglioramento strutturale. Sviluppati in tempi recenti, entrano nel mercato edilizio i "materiali fibrorinforzati": una nuova tipologia di materiali, che offrono dei rapporti resistenza/ peso ottimi, a seconda delle varie esigenze. CFRP, GFRP, AFRP, sono le sigle dei materiali fibrorinforzati più utilizzati in edilizia, i quali si compongono da una matrice polimerica e da fibre ad altissima resistenza come il carbonio. Quest'ultimo date le sue proprietà e resistenze è un buon materiale per i rinforzi strutturali di edifici in c.a. . Nelle seguenti pagine verranno trattati i principali materiali FRP, dei quali verranno esaminate le caratteristiche, problematiche, e metodi progettuali. Ponendo particolare attenzione ad i rinforzi di edifici in c.a. ed effettuando un'analisi di un edificio sviluppato in fase di tirocinio, si ipotizzerà un intervento specifico con la innovativa tecnica NSM per il caso in esame, valutando l'applicazione, ed i principali vantaggi e svantaggi .

# Capitolo 1

## Materiali

### 1.1 Introduzione

I Fiber Reinforced Polymers (materiali fibrorinforzati a matrice polimerica) più propriamente CFRP nel caso delle fibre di carbonio, GFRP nel caso delle fibre di vetro, AFRP in quello delle fibre di arammide, costituiscono una vasta gamma di materiali compositi, costituiti da una matrice polimerica (fase continua) di natura organica con la quale viene impregnato un rinforzo in fibra (fase discontinua) con elevate proprietà meccaniche. L'unione dei materiali costituenti il composito offre prestazioni migliori di quelle che si possono ottenere dai singoli materiali, e i campi di utilizzo sono molteplici: dall' edilizia civile e industriale, ovvero per ripristini e rinforzi di strutture in c.a. , muratura e legno, fino a adeguamenti sismici, ponti e viadotti [1].

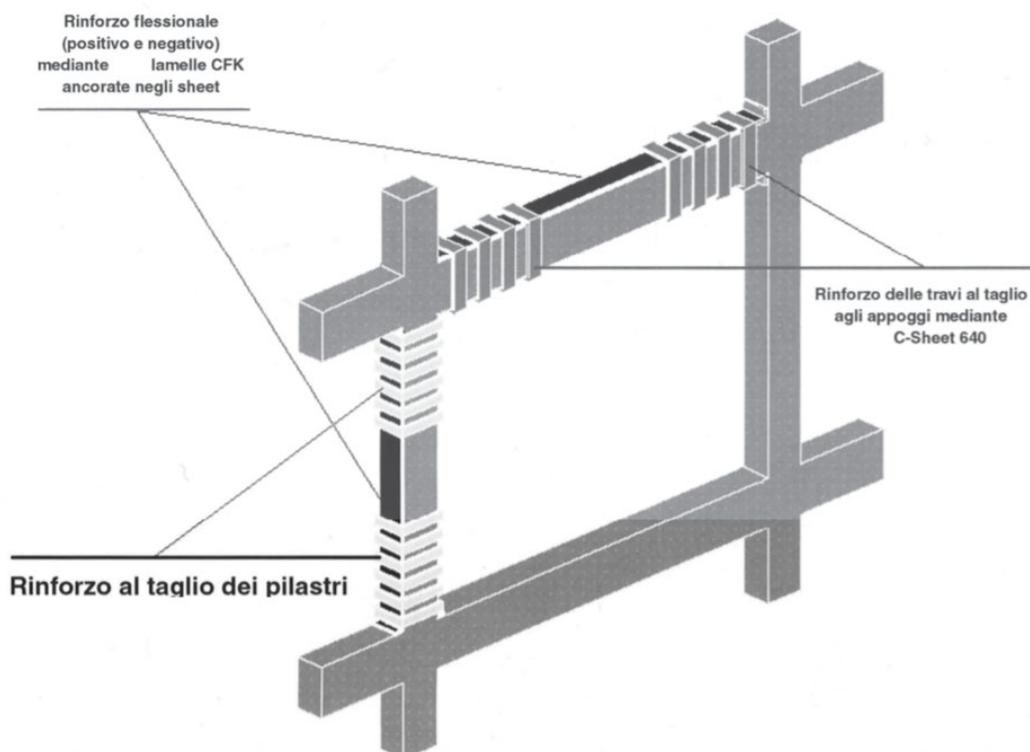


Figura 1.1. Esempio di applicazione dei rinforzi FRP.

I vantaggi principali sono dovuti all' elevata resistenza/peso, alla resistenza chimica, facilità di trasporto, e l' assenza di ulteriore apporto di carico sulla struttura.

## 1.2 Classificazione dei sistemi di rinforzo

Gli FRP nell' ambito strutturale vengono prodotti in:

- *Fasce e tessuti*: Nei tessuti le fibre possono essere solo affiancate o intrecciate e quindi resistono a sollecitazioni in una o più direzioni, mostrando una isotropia più o meno accentuata a seconda della tipologia di tessitura.

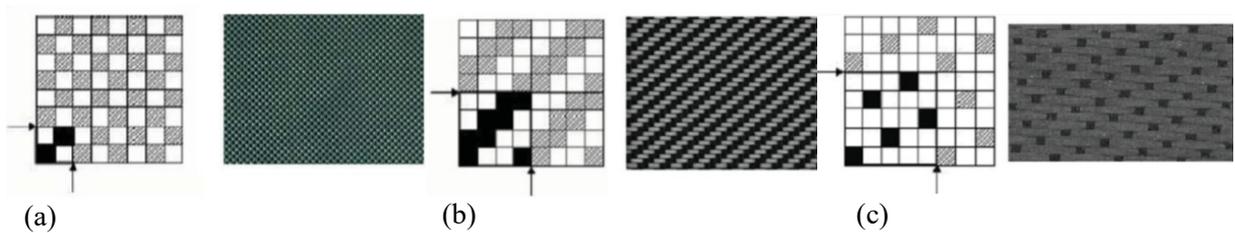


Figura 1.2. Tipologie di tessuti: (a) a tela; (b) batavia; (c) raso.

- *Lamine e barre*: Nelle lamine le fibre sono disposte secondo un' unica direzione e quindi il materiale presenta forti indici di anisotropia

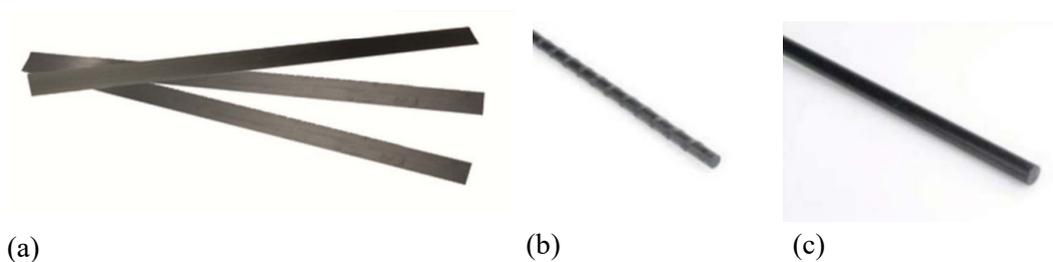


Figura 1.3. Esempi di: (a) lamelle; (b) barre ad aderenza migliorata; (c) barre lisce.

Dal punto di vista morfologico, i sistemi di rinforzo FRP sono distinti in [1]:

- *Sistemi preformati:* Preparati in stabilimento mediante pultrusione, o altri processi produttivi, ed incollati all'elemento strutturale da rinforzare;
- *Sistemi impregnati in situ :* costituiti da fogli o tessuti di fibre uni o multi-direzionali impregnati con una resina che può fungere anche da adesivo con il substrato interessato;
- *Sistemi preimpregnati :* costituiti da fogli o tessuti di fibre uni o multi-direzionali preimpregnati con resina parzialmente polimerizzata ed incollati al substrato da rinforzare con (o senza) l'uso di resine aggiuntive.

Le tipologie di fibre più utilizzate sono la fibra di carbonio, vetro e arramide, formanti rispettivamente i sistemi di rinforzo CFRP, GFRP, AFRP; queste sono poi utilizzate in funzione delle resistenze offerte e dalla tipologia di struttura interessata dall'intervento

### **1.3 Proprietà meccaniche dei materiali**

Nei compositi fibrorinforzati le fibre svolgono il ruolo di elementi portanti sia in termini di resistenza che di rigidità. La matrice, oltre a proteggere le fibre, funge da mezzo di trasferimento degli sforzi tra fibra e fibra ed eventualmente tra queste e l'elemento strutturale da rinforzare. Nella maggioranza dei casi i compositi sono costituiti da fibre caratterizzate da resistenza e rigidità elevate, nonché da valori della deformazione a rottura inferiori a quelli della matrice.

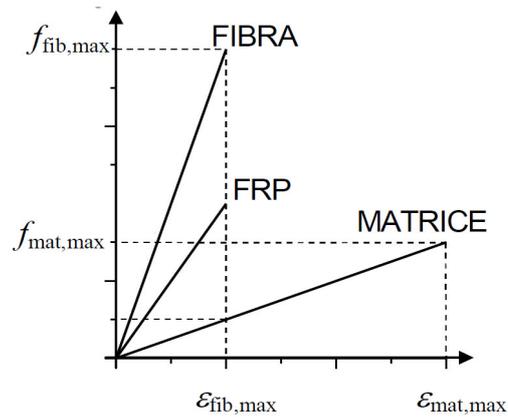


Figura 1.4. Legami costitutivi “sforzo-deformazione” di fibre, matrice e composito, relativamente a sforzo e deformazione a rottura di ogni elemento.

Si può notare come le fibre hanno un elevato modulo elastico, quindi elevati sforzi di rottura con basse deformazioni, mentre la matrice è caratterizzata da ampie deformazioni e minori resistenze a rottura. Il composito ha una rigidezza minore rispetto alla fibra, ma ha la stessa rottura a deformazione, di conseguenza è fondamentale restare al di sotto della deformazione massima delle fibre.[3]

Nel caso di compositi unidirezionali è possibile, con ragionevole approssimazione, stimare il loro comportamento mediante una media pesata in funzione delle frazioni volumetriche  $V$ ; stima del modulo elastico  $E$  e della tensione di rottura  $f$  :

$$E_f = V_{fib} \cdot E_{fib} + (1 - V_{fib}) \cdot E_{mat}, \quad (1.1)$$

$$f_f \cong V_{fib} \cdot f_{fib} + (1 - V_{fib}) \cdot f_{mat},$$

Le caratteristiche del composito variano anche in funzione della frazione volumetrica dei singoli elementi: ovvero all' aumentare della frazione volumetrica della fibra  $V_{fib}$ , si ha un aumento della sollecitazione massima a rottura del composito  $f_f$ . Da notare che la deformazione ultima a rottura del composito  $\epsilon_{fu}$ , e la forza ultima a rottura  $F_{fu}$ , come la rigidezza assiale  $EA$  rimangono pressochè costanti.

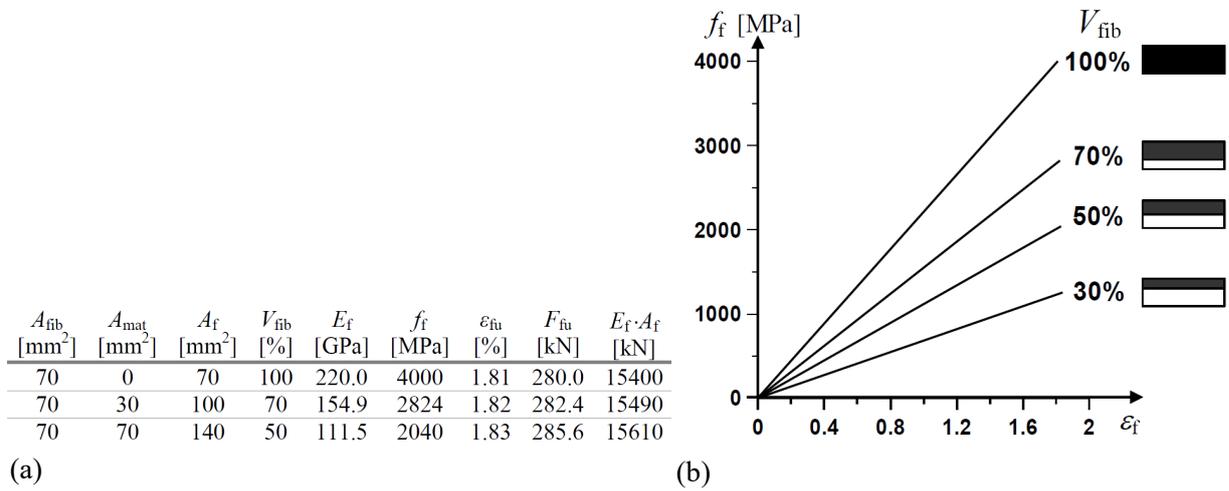


Figura 1.5. (a) Influenza della frazione volumetrica sulle caratteristiche meccaniche;  
(b) Influenza della frazione volumetrica sul legame costitutivo.

Negli FRP la matrice polimerica è normalmente costituita da resine polimeriche di tipo termoindurente, le più utilizzate sono le resine epossidiche. Essendo un polimero sono caratterizzate oltre da una temperatura di fusione non ben definita, anche da una temperatura di cristallizzazione vetrosa, la quale una volta superata, fa assumere all'elemento un comportamento visco-elastico visco-plastico, con conseguente decadimento del modulo elastico.

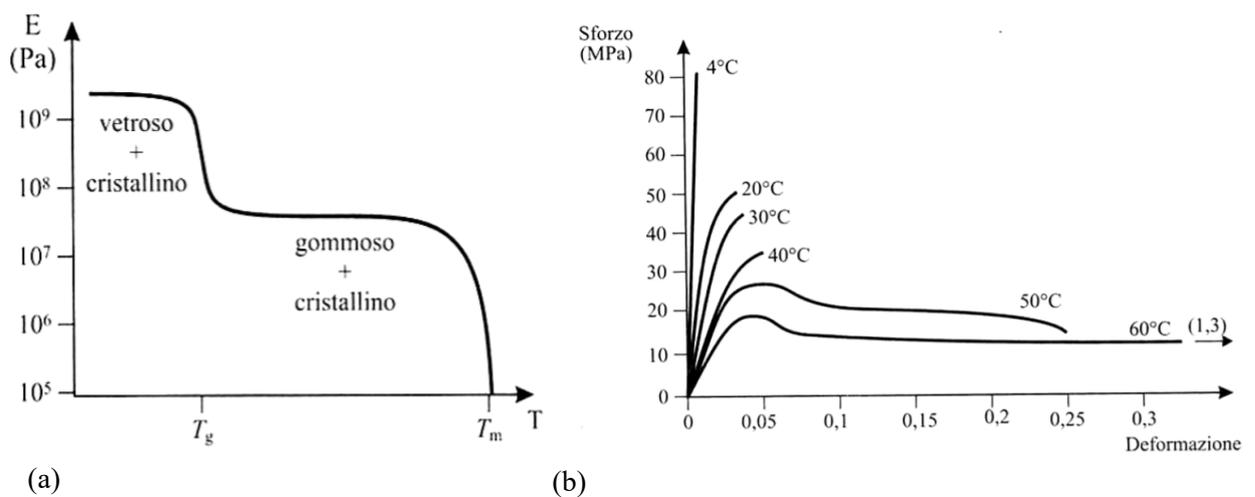


Figura 1.6. (a) Modulo elastico in funzione della temperatura; (b) Legame costitutivo in funzione della temperatura [1].

Le resine epossidiche sono caratterizzate da una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre presentano ottime proprietà adesive. La temperatura massima di esercizio dipende dalla formulazione e dalla temperatura di reticolazione. Per temperature di esercizio superiori a 60 °C, la resina deve essere selezionata tenendo conto delle competenti variazioni delle sue caratteristiche meccaniche. Non ci sono limiti significativi per la temperatura minima di esercizio. In generale si consiglia di garantire l'impiego di materiali FRP considerando temperature di esercizio minori di almeno 15 °C della temperatura di cristallizzazione vetrosa della matrice.[3]

Le fibre più utilizzate per i compositi in FRP devono garantire o elevata rigidità o elevate resistenze meccaniche a rottura, in funzione della problematica e della tipologia strutturale. Le più comuni sono:

➤ *Fibra di carbonio*: Il composito è conosciuto come CFRP, e le fibre possono essere:

- Ad alto modulo elastico :  $f_{fib} = 2400-3400 \text{ MPa}$

$$E_{fib} = 390-760 \text{ GPa}$$

- Ad alta resistenza :  $f_{fib} = 4100-5100 \text{ MPa}$

$$E_{fib} = 240-280 \text{ GPa}$$

Le fibre di carbonio sono quindi poco deformabili, leggere e sono dotate di un coefficiente di dilatabilità termica anche molto basso. Il loro comportamento a rottura è di tipo fragile, ovvero non subiscono deformazioni sensibili fino alla tensione di rottura, soglia dopo la quale si rompono di schianto. Inoltre risultano anche poco sensibili ai fenomeni di "creep" o deformazione viscosa a sforzo costante, e resistono altrettanto bene anche a fatica, ovvero all'azione di carichi ciclici, come ad esempio può essere il passaggio dei carichi di traffico. Quindi le ottime proprietà del carbonio lo rende particolarmente adatto ad interventi sul cemento armato, ma con cautela e i giusti accorgimenti è utilizzato anche

sulla muratura.

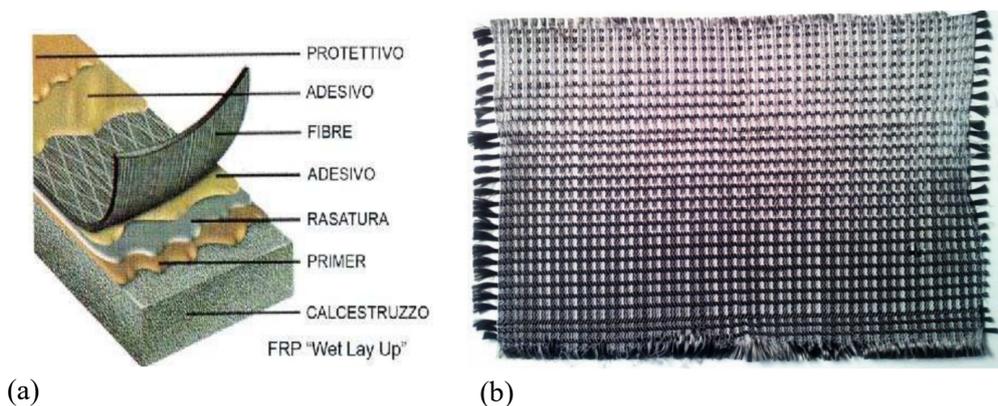


Figura 1.7. (a) Applicazione del tessuto in fibra di carbonio; (b) Particolare della trama.

La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite. Il termine “fibre di grafite” viene tuttavia utilizzato, anche se in modo improprio, per indicare fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99%; il termine “fibre di carbonio” indica, invece, fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l’80 ed il 95%. La moderna tecnologia di produzione delle fibre di carbonio si basa essenzialmente sulla pirolisi, cioè la decomposizione termica in assenza di ossigeno di sostanze organiche, dette precursori, tra le quali le più usate sono le fibre di poliacrilonitrile (PAN). Quest’ ultime vengono “stabilizzate”, cioè sottoposte ad un trattamento termico a 200-240 °C per 24 h in aria, affinché la loro struttura molecolare subisca un’orientazione preferenziale nella direzione del carico applicato. In seguito subiscono un trattamento di carbonizzazione a 1500 °C, durante il quale tutta la sostanza organica presente viene eliminata. Le fibre carbonizzate possono quindi essere sottoposte ad un trattamento di grafitizzazione a 3000 °C durante il quale la struttura cristallina delle fibre può svilupparsi completamente.[3]

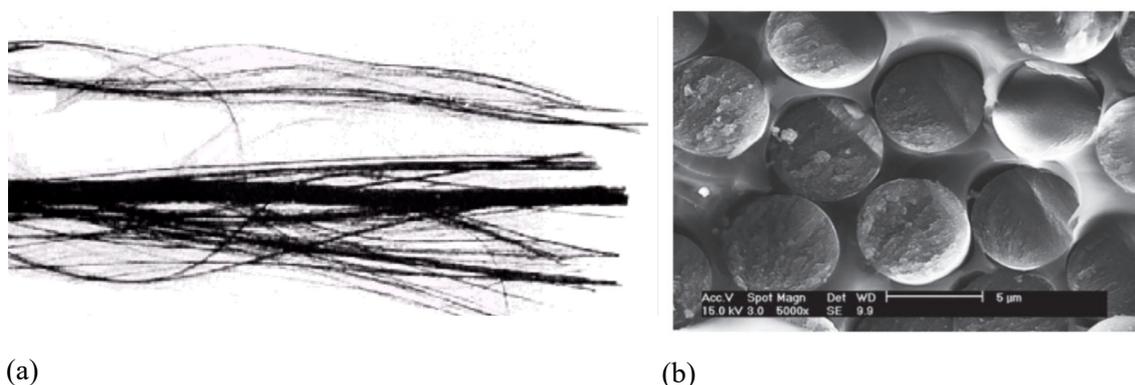


Figura 1.8. (a) fibre di carbonio; (b) vista al microscopio di un FRP.

➤ *Fibra di vetro*: Il composito è conosciuto come GFRP, e le fibre possono essere:

- Tipo E:  $f_{fib} = 3445 \text{ MPa}$

$$E_{fib} = 72 \text{ GPa}$$

- Tipo S :  $f_{fib} = 4890 \text{ MPa}$

$$E_{fib} = 87 \text{ GPa}$$

Sono fibre molto usate in campo navale e industriale per la realizzazione di compositi con resistenze medio-alte. Come possiamo notare sono caratterizzate da un'elevatissima resistenza a trazione, e da un basso modulo elastico; ciò le rende, almeno nel campo dell'edilizia, particolarmente adatte a anche a strutture più elastiche, come la muratura.

Il vetro è composto principalmente da silice ( $\text{SiO}_2$ ) in struttura tetraedrica ( $\text{SiO}_4$ ), quindi appartenente al gruppo dei silicati. Sono aggiunti anche altri tipi di elementi in diverse proporzioni come ossidi di alluminio e ioni metallici, per modificarne le proprietà [1].

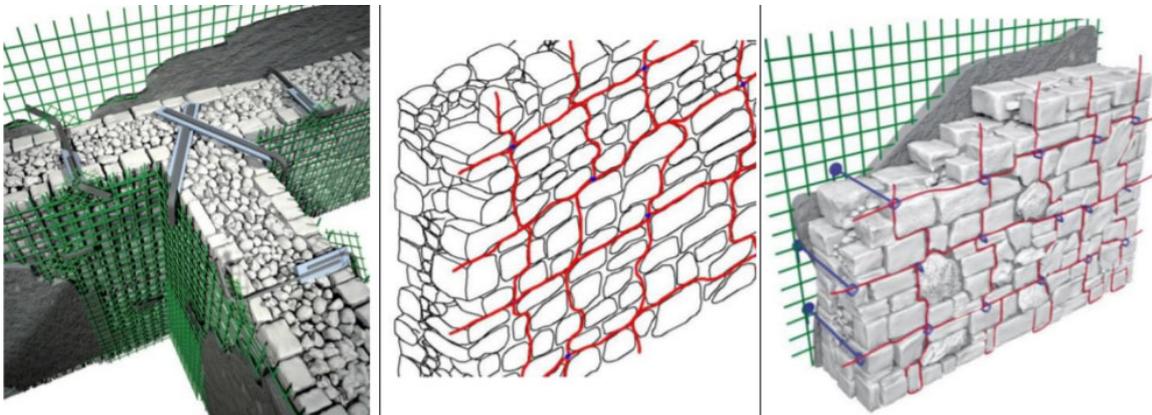


Figura 1.9. Esempi di applicazione di rinforzi GFRP su muratura.

Le fibre di vetro pur avendo una ottima resistenza a trazione, sono particolarmente soggette a problemi di creep e fatica sotto carichi ciclici. Hanno una buona resistenza al fuoco, tale da essere parzialmente o totalmente ignifughe, ed anche il decadimento delle prestazioni in seguito all' aumento della temperatura è molto contenuto, oltretutto anche il prezzo di queste fibre è contenuto rispetto alle altre tipologie.

Per garantire una maggiore durabilità in termini di compatibilità con l' eventuale matrice alla quale verranno accoppiate, le fibre di vetro vengono sottoposte ad un ensimaggio con olio e apretto, trattamento che le rende alcali-resistenti. Ciò è indispensabile nel caso in cui la matrice del FRP sia di natura inorganica, come può essere una malta cementizia. Una fibra non resistente agli alcali in una matrice inorganica subisce un processo corrosivo, in ambiente umido, che porta alla distruzione della struttura del materiale, e la rete tende letteralmente a scogliersi all' interno della matrice, rendendo il rinforzo totalmente inefficace.

Inoltre l' apretto in specifici casi tende ad aumentare la resistenza della fibra anche di un 20%, ed in generale favorisce un interazione chimica tra la fibra e la matrice , ovvero si instaura un legame strutturale che migliora le proprietà dell' intero sistema resistente.



(a)



(b)

Figura 2.0. (a) Fibra di vetro al microscopio; (b) Dettaglio della produzione GFRP.

➤ *Fibra di aramide*: Il composito è conosciuto come AFRP, e tali fibre hanno:

$$f_{\text{fib}} = 3600-3800 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{fib}} = 60-180 \text{ GPa}$$

Sono fibre di natura organica, che si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio. La principale carenza della fibra è la resistenza a compressione, circa 1/8 a trazione, causa della forte anisotropia del materiale, il quale tende a snervarsi localmente all'aumentare degli sforzi di compressione. Possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione fino al 50%. Inoltre possono risultare sensibili all'umidità. Il comportamento viscoso (creep) è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura è molto più elevata. La resistenza sotto carico a lungo termine è simile a quella delle fibre di vetro, ma la resistenza a trazione è più elevata, mentre la deformazione a lungo termine è molto più marcata e progressiva nel tempo. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre vetro.

Di seguito viene riportato un confronto tra le caratteristiche delle fibre sovraccitate e un classico acciaio da costruzione.

|                                     | Modulo di elasticità normale<br>$E$ | Resistenza a trazione<br>$\sigma_r$        | Deformazione a rottura<br>$\epsilon_r$ | Coefficiente di dilatazione termica<br>$\alpha$ | Densità<br>$\rho$    |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|---|----------------------|
|                                     | [GPa]                               | [MPa]                                      | [%]                                    | [ $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ]       | [g/cm <sup>3</sup> ] |
| Fibre di vetro E                    | 70-80                               | 2000-3500                                  | 3.5-4.5                                | 5-5.4   | 2.5-2.6              |
| Fibre di vetro S                    | 85-90                               | 3500-4800                                  | 4.5-5.5                                | 1.6-2.9   | 2.46-2.49            |
| Fibre di carbonio (alto modulo)     | 300-760                             | 2400-3400                                  | 0.5-0.8                                | -1.45   | 1.85-1.9             |
| Fibre di carbonio (alta resistenza) | 240-280                             | 4100-5100                                  | 1.6-1.73                               | -0.6-0.9  | 1.75                 |
| Fibre aramidiche                    | 62-180                              | 3600-3800                                  | 1.9-5.5                                | -2  | 1.44-1.47            |
| Matrice polimerica                  | 2.7-3.6                             | 40-82                                      | 1.4-5.2                                | 30-54   | 1.10-1.25            |
| Acciaio da costruzione              | 206                                 | 250-400 (snervamento)<br>450-600 (rottura) | 20-30                                  | 10.4  | 7.8                  |

Figura 2.1. Confronto tra i vari materiali.

#### 1.4 Installazione e particolari costruttivi su c.a. e c.a.p.

*Controllo e preparazione preventiva del substrato:*

L'applicazione di un sistema di rinforzo FRP prevede il controllo preventivo del substrato, e i provvedimenti necessari a migliorarne lo stato, fino a rimuovere o a ricostruire le zone deteriorate. Anche per quanto riguarda le armature ammalorate presenti deve essere prevista una pulizia con eventuale passivazione. In ogni caso la resistenza media a compressione del calcestruzzo non deve essere inferiore a  $15 \text{ N/mm}^2$ , in caso contrario bisogna prendere ulteriori provvedimenti, non potendo applicare il rinforzo in modo tradizionale.

Il substrato di calcestruzzo può risultare danneggiato a causa di un deterioramento fisico-chimico, fisico-meccanico o in conseguenza di un eventuale impatto. Il calcestruzzo ammalorato va rimosso da tutta la zona danneggiata.

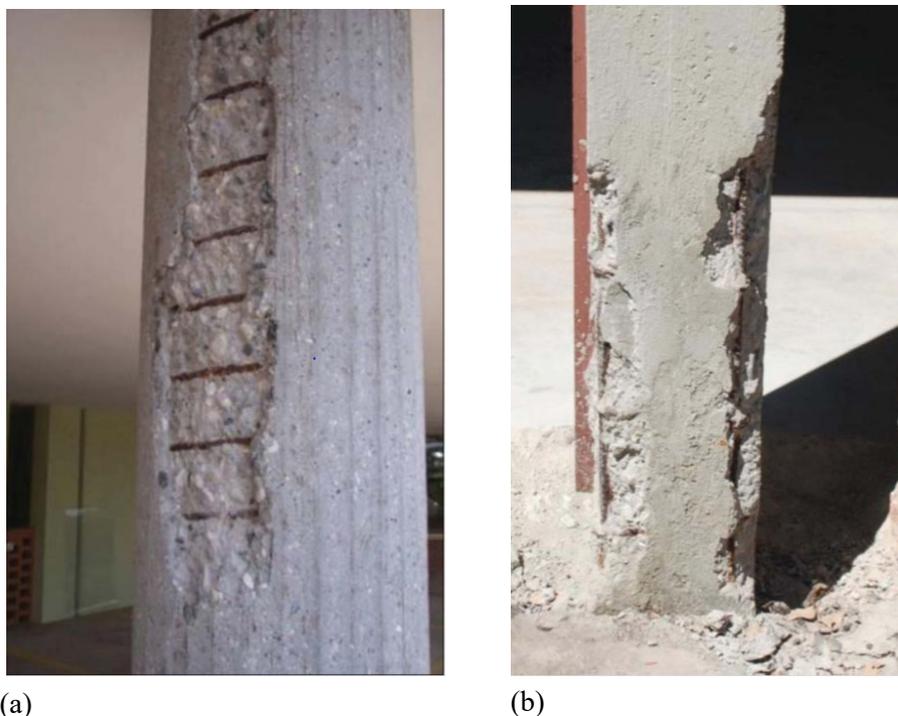


Figura 2.2. (a) Substrato ammalorato con espulsione del copriferro; (b) espulsione del cls. agli spigoli.

La rimozione del calcestruzzo ammalorato e/o danneggiato consente di accertare lo stato delle armature metalliche e quindi di eseguire gli eventuali interventi atti ad eliminare le cause responsabili del deterioramento. Se è in corso un processo corrosivo a carico delle armature metalliche, è necessario rimuovere lo strato deteriorato mediante spazzolatura o sabbiatura e poi trattare la superficie con idonei inibitori di corrosione.

Rimosso il calcestruzzo ammalorato si provvede a reintegrare le parti mancanti, associando inoltre un livellamento del substrato, da effettuarsi con un apposito stucco epossidico compatibile.



Figura 2.3. Esempio di posa in opera di CFRP ancora a “grezzo”.

*Condizioni di umidità e temperatura dell' ambiente e del substrato:*

Si sconsiglia di non installare rinforzi di composito se l'ambiente è molto umido in quanto un elevato grado di umidità può ritardare la stagionatura delle resine nonché inficiare la perfetta realizzazione del composito nel caso di sistemi con polimerizzazione in situ. In generale i compositi devono essere applicati nelle condizioni igrometriche e termiche definite nelle schede tecniche[4].

*Protezione del sistema di rinforzo:*

Nel caso di applicazioni in ambiente esterno è opportuno proteggere il sistema di rinforzo dall'azione diretta dell'irraggiamento solare, che può produrre alterazioni chimico-fisiche nella matrice epossidica. Ciò può essere ottenuto mediante l'impiego di vernici acriliche protettive. In alternativa, una protezione più elevata può essere garantita con l'applicazione sul composito di intonaci o malte. Ai fini della protezione al fuoco possono essere adottate due tecniche differenti: l'uso di pannelli intumescenti o l'applicazione di intonaci protettivi.

# Capitolo 2

## Concetti del progetto di rinforzo di strutture in c.a.

### 2.1 Requisiti fondamentali

Requisiti fondamentali riguardanti la progettazione dei sistemi di rinforzo con FRP sono:

- individuazione, eliminazione o attenuazione dei rischi ai quali la struttura potrebbe essere soggetta;
- scelta di una configurazione del sistema di rinforzo poco sensibile ai suddetti rischi ed in grado di sopportare all'occorrenza danneggiamenti localizzati;
- eliminazione o posticipazione dei fenomeni di collasso fragile preesistenti all'intervento di rinforzo.

Questi punti possono ritenersi soddisfatti se la scelta dei materiali, la progettazione, l'esecuzione ed il controllo dell'intervento siano conformi alla normativa prescritta.

### 2.2 Requisiti di durabilità

Per assicurare durabilità all'intervento di rinforzo vanno tenuti in debito conto:

- la destinazione d'uso della struttura rinforzata;
- le condizioni ambientali attese e le modalità di applicazione dei carichi;
- la composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali preesistenti e degli FRP, nonché dei prodotti utilizzati per la messa in opera di questi

ultimi;

- la scelta della configurazione del rinforzo, delle modalità di applicazione e dei particolari costruttivi;
- la qualità delle maestranze ed il livello di controllo;
- l'adozione di particolari misure protettive, ad esempio nei confronti di temperature elevate ed umidità;
- la manutenzione attesa durante la vita utile.

## **2.3 Principi generali della progettazione**

### **2.3.1 Generalità**

Le verifiche degli elementi rinforzati devono essere condotte nei confronti degli Stati Limite Ultimi (SLU) e, dove richiesto, nei confronti degli Stati Limite di Esercizio (SLE). Per ciascun stato limite deve risultare [1]:

$$E_d \leq R_d \quad (2.1)$$

Con  $E_d$  e  $R_d$  rispettivamente, i valori di progetto della sollecitazione agente e della resistenza offerta dal materiale

### **2.3.2 Vita utile ed azioni di calcolo**

Si assume che la vita utile di una struttura rinforzata sia la stessa dell'analoga struttura di nuova realizzazione. Conseguentemente, i coefficienti parziali da adottare per le azioni di calcolo sono i medesimi di quelli previsti dalla Normativa vigente per le nuove costruzioni.

### **2.3.3 Proprietà dei materiali e relativi valori di calcolo**

I valori da utilizzare per quantificare la resistenza e la deformazione ultima dei materiali FRP sono quelli caratteristici (frattile 5%). In accordo con la Normativa vigente, i valori da utilizzare per quantificare le analoghe proprietà dei materiali preesistenti sono invece i valori medi. I valori da attribuire ai moduli elastici dei materiali FRP e di quelli preesistenti sono i valori medi.[3] In generale resistenze e deformazioni di un materiale FRP va espresso con una relazione del tipo [1]:

$$X_d = \eta \cdot X_k / \gamma_m \quad (2.2)$$

Con  $\eta$  fattore di conversione, che tiene conto dei problemi legati alla progettazione con FRP,  $X_k$  è il valore caratteristico della proprietà in questione e  $\gamma_m$  è infine il coefficiente parziale del materiale.

Nei casi in cui debba essere considerata sia l'influenza dei fattori ambientali che quella dei carichi di lunga durata, il fattore di conversione  $\eta$  si ottiene come prodotto del fattore di conversione ambientale  $\eta_a$ , per il fattore di conversione relativo agli effetti di lunga durata  $\eta_l$ . Nei casi in cui debba essere considerata considerata l'influenza dei soli fattori ambientali, il fattore di conversione  $\eta$  coincide con  $\eta_a$ .

### **2.3.4 Capacità di calcolo**

La generica capacità di calcolo  $R_d$  è espressa come [1]:

$$R_d = R(X_{d,i}) / \gamma_{rd} \quad (2.3)$$

Con  $R(X_{d,i})$  un' opportuna funzione che riconduce al modello specifico, come per la flessione o il taglio.  $\gamma_{rd}$  è un coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze del metodo.

Di regola, l'incremento della capacità di calcolo dell'elemento rinforzato con FRP non può risultare superiore del 50% rispetto a quella dell'elemento non rinforzato. La limitazione non si applica per azioni eccezionali e sismiche.

### **2.3.5 Coefficienti parziali**

Nei riguardi degli SLU per  $\gamma_m = 1,10$

Solo per lo SLU di distacco dal supporto  $\gamma_m = 1,20/ 1,50$

Per SLE  $\gamma_m = 1,00$

Nei riguardi degli SLU considerando il modello di resistenza per flessione,  $\gamma_{rd} = 1,00$

Nei riguardi degli SLU considerando il modello di resistenza per taglio/ torsione,  $\gamma_{rd} = 1,20$

Nei riguardi degli SLU considerando il modello di resistenza per confinamento,  $\gamma_{rd} = 1,10$

## **2.4 Problematiche del progetto**

Sono di seguito riportati alcuni valori di riferimento da attribuire al fattore di conversione  $\eta$ , in funzione delle problematiche principali attribuite agli FRP.

### **2.4.1 Azioni ambientali**

Le proprietà meccaniche di alcuni materiali FRP degradano in determinate situazioni quali:

- *Effetti da ambiente alcalino:* l' ambiente alcalino ricreato dal calcestruzzo, può provocare un degrado della resina, e/o delle zone d' interfaccia. La resina epossidica, generalmente ha un eccellente resistenza all' ambiente alcalino, a differenza ad esempio di quelle in poliestere.
- *Effetti dell' umidità:* Gli effetti riguardano principalmente la resina, e sono: plasticizzazione, riduzione della temperatura di cristallizzazione vetrosa e riduzione di rigidezze e resistenze.

- *Effetti di temperature estreme e di cicli termici:* Gli effetti primari della temperatura riguardano la risposta viscosa della resina e quindi del composito. Al crescere della temperatura si manifesta una diminuzione del modulo di elasticità della resina. Se la temperatura supera quella di transizione vetrosa, il livello di prestazione del composito si riduce in maniera significativa. I cicli termici, possono favorire la formazione di microfratture nei sistemi che utilizzano resina ad alto modulo. Per gli intervalli di temperatura tipici delle infrastrutture civili è possibile evitare indesiderati decadimenti delle prestazioni scegliendo la matrice in modo che la temperatura di transizione vetrosa sia sempre più elevata della massima temperatura di esercizio di almeno 15° C.
- *Effetti di cicli di gelo e disgelo:* l'esposizione a cicli di gelo e disgelo riduce la resistenza della resina e dell'interfaccia tra fibre e resina a causa del verificarsi di reciproci distacchi. Per temperature al di sotto di 0 °C, i sistemi a base di resine polimeriche possono migliorare le proprie prestazioni sviluppando valori più elevati di resistenza e rigidità. Gli effetti del degrado prodotto da cicli termici possono essere amplificati dalla presenza di umidità.
- *Effetti di radiazioni ultraviolette:* Raramente le radiazioni UV degradano le prestazioni meccaniche dei sistemi di rinforzo con materiali FRP, nonostante che alcune resine possano accusare, per effetto delle radiazioni, fragilizzazioni ed erosioni superficiali.

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

Figura 2.4. Valori consigliati del fattore di conversione in funzione dei fattori ambientali.

## 2.4.2 Modalità di carico

Le proprietà meccaniche di alcuni materiali FRP degradano per effetto di fenomeni di *creep* e di fatica.

- *Effetti di carichi e deformazioni a lungo termine:* In genere le resine termoindurenti come le epossidiche sono meno viscosi di quelle termoplastiche. Poiché la presenza di fibre contrasta la viscosità delle resine, i suddetti fenomeni sono più pronunciati in presenza di carichi applicati trasversalmente alle fibre. L'entità delle deformazioni differite per carichi a lungo termine può essere ridotta limitando opportunamente le tensioni di esercizio nel composito. I materiali CFRP sono meno suscettibili di rotture per carichi di lunga durata.
- *Effetti di fatica:* Le prestazioni dei materiali FRP in condizioni di fatica sono generalmente soddisfacenti. Esse dipendono dalla composizione della matrice e, marginalmente, dal tipo di fibre. Queste ultime contrastano infatti in modo efficace la formazione di fessure e ne ostacolano la propagazione.

| Modalità di carico      | Tipo di fibra / resina  | $\eta_1$ |
|-------------------------|-------------------------|----------|
| Carico di lungo termine | Vetro / Epossidica      | 0.30     |
|                         | Arammidica / Epossidica | 0.50     |
|                         | Carbonio / Epossidica   | 0.80     |
| Ciclico                 | Tutte                   | 0.50     |

Figura 2.5. Valori consigliati del fattore di conversione in funzione degli effetti di lunga durata.

## 2.4.3 Resistenza alle azioni causate da impatti e esplosioni

Prove sperimentali, sia in laboratorio che in situ, hanno dimostrato che i rinforzi AFRP, hanno una maggiore resistenza agli impatti ed a esplosioni. Degli studi hanno inoltre dimostrato come alternare strati di AFRP impregnati con matrici epossidiche a elevatissima deformazione, riesca a dissipare in maniera ottimale l'energia provocata da impatti o esplosioni, contenendone gli effetti.

#### **2.4.4 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco**

I materiali FRP realizzati con matrici polimeriche sono particolarmente sensibili all'esposizione alle alte temperature. Quando la temperatura di esercizio supera quella di transizione vetrosa della resina la resistenza e la rigidità dei materiali FRP diminuiscono drasticamente. Inoltre, se i materiali FRP sono applicati esternamente agli elementi rinforzati, l'esposizione ad elevate temperature produce un rapido deterioramento dell'aderenza FRP/supporto, con conseguente distacco del composito. In condizioni di incendio le proprietà meccaniche dei materiali FRP applicati all'esterno possono essere notevolmente migliorate adottando adeguati spessori di rivestimento protettivo.

# Capitolo 3

## Rinforzo a flessione

### 3.1 Generalità

Il rinforzo a flessione è necessario in tutti quei casi in cui abbiamo un momento flettente sollecitante di progetto maggiore del momento resistente offerto dall' elemento strutturale.

Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare una o più lamine preformate, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati in situ [3].

### 3.2 Analisi del comportamento allo Stato Limite Ultimo

Il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP in modo che il momento resistente di progetto della sezione rinforzata,  $M_{Rd}$ , maggiore di quello sollecitante di progetto [1],  $M_{sd}$ :

$$M_{sd} \leq M_{Rd} \quad (3.1)$$

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni di c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- perfetta aderenza tra i materiali componenti;
- resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente;
- legame costitutivo del composito fibrorinforzato elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza che la rottura per flessione si manifesti in concomitanza con una delle seguenti Condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP,  $\varepsilon_{fd}$ ;

Con  $\varepsilon_{fd}$  calcolata come:

$$\varepsilon_{fd} = \min ( \eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_m ; \varepsilon_{fdd} ) \quad (3.2)$$

Con  $\varepsilon_{fk}$  deformazione caratteristica a rottura del rinforzo,  $\eta_a$  e  $\gamma_m$  sono i coefficienti sovraccaricati, mentre  $\varepsilon_{fdd}$  è la deformazione massima per distacco intermedio.

È importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si è reso necessario l'intervento di rinforzo a flessione.

Poiché il rinforzo di FRP viene di solito applicato su una struttura già sollecitata, si deve tenere conto dello stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo. Se il momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo,  $M_0$ , è inferiore a quello di fessurazione lo stato deformativo iniziale può essere trascurato.

### 3.2.1 Resistenza di progetto a flessione

In linea con le ipotesi già trattate, tramite le equazioni di equilibrio alla traslazione e alla rotazione si valuta la resistenza flessionale.

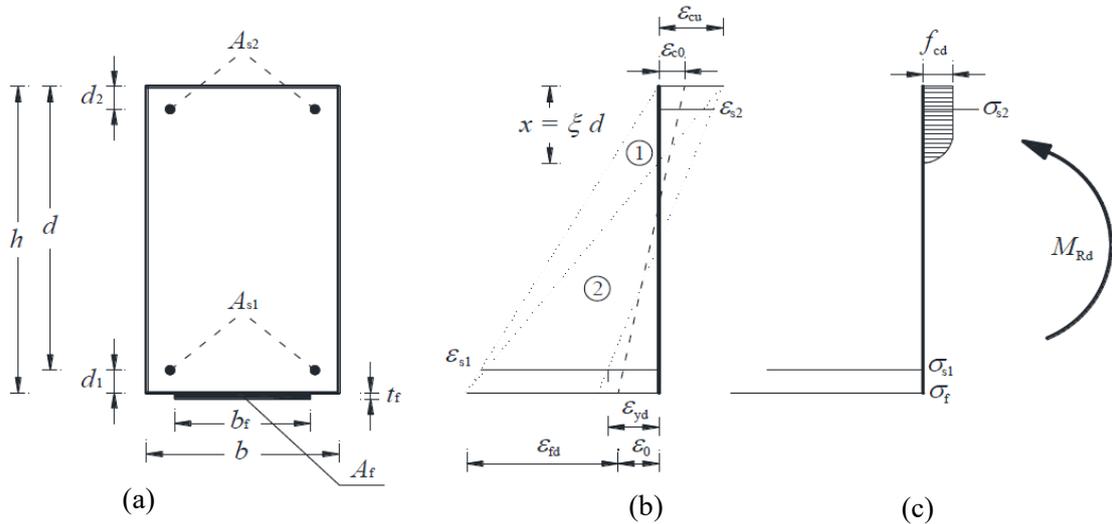


Figura 2.6. (a) Modello di una sezione in c.a. con FRP; (b) Stati deformativi; (c) Stati tensionali [2].

- Nella *zona 1* la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito [2],  $\epsilon_{fd}$ ;

$$\begin{aligned}
 \text{(FRP)} \quad & \epsilon_f = \epsilon_{fd}, \\
 \text{(calcestruzzo al lembo compresso)} \quad & \epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \epsilon_{cu}, \\
 \text{(acciaio in compressione)} \quad & \epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}, \\
 \text{(acciaio in trazione)} \quad & \epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)},
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

- Nella *zona 2* la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione del composito non eccede quella limite: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso,  $\epsilon_{cu}$ , in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le relazioni da utilizzare sono le seguenti con il significato dei simboli già introdotto:

$$\begin{aligned}
(\text{FRP}) & \quad \varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h-x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}, \\
(\text{calcestruzzo al lembo compresso}) & \quad \varepsilon_c = \varepsilon_{cu}, \\
(\text{acciaio in compressione}) & \quad \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x-d_2}{x}, \\
(\text{acciaio in trazione}) & \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x}.
\end{aligned} \tag{3.4}$$

È da notare che la posizione dell'asse neutro in entrambi i casi si trova con l'equazione di equilibrio alla traslazione [2]:

$$0 = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f \tag{3.5}$$

Mentre il momento resistente si trova partendo dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese [2]:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1] \tag{3.6}$$

Con  $\gamma_{Rd} = 1,00$

### 3.2.2 Collasso per distacco di estremità

Il distacco di estremità dipende da una serie di fattori quali l'ubicazione della zona di formazione delle fessure, la tipologia di queste ultime, la presenza di irregolarità sulla superficie di applicazione del rinforzo e la concentrazione tensionale nelle zone di ancoraggio. Nel caso di elementi inflessi di c.a., una volta che sia stata individuata la sezione a partire dalla quale è necessario il rinforzo di FRP per incrementarne il momento resistente, si deve verificare che la tensione cui la suddetta sezione è soggetta allo SLU non superi il massimo valore ammissibile nei riguardi del fenomeno di distacco di estremità. Qualora l'ancoraggio sia realizzato in una zona soggetta a prevalenti sollecitazioni taglianti, che possono indurre fessure inclinate, la forza di trazione mobilitata nel composito, alla distanza  $a^*$ , deve essere calcolata dopo aver operato un'opportuna traslazione del diagramma del momento flettente

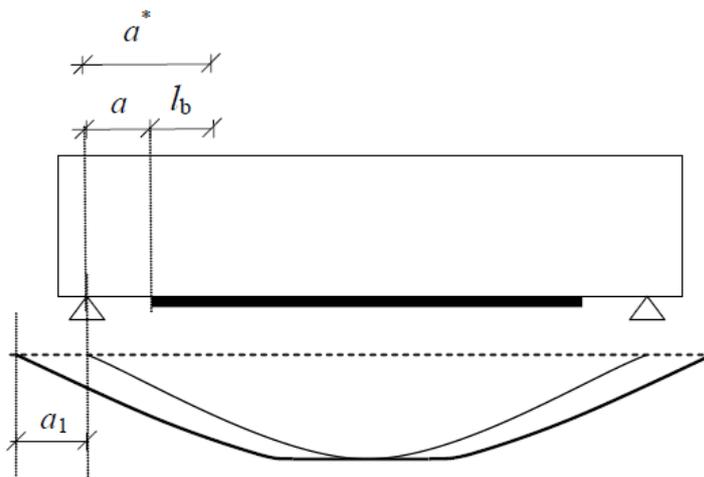


Figura 2.7. Traslazione del momento flettente.

generalmente, la forza di ancoraggio può essere valutata incrementando il momento di calcolo sollecitante della seguente quantità [2]:

$$M = V_{sd} \cdot a_1 \quad (3.7)$$

In presenza di momenti negativi alle estremità dell'elemento rinforzato, a meno di valutazioni più specifiche o di adozione di dispositivi speciali d'ancoraggio, è consigliato di limitare l'applicazione del composito FRP alla sola zona soggetta a momento positivo.

### 3.3 Analisi del comportamento allo Stato Limite di Esercizio

Sotto i carichi di esercizio è necessario verificare che:

- i livelli tensionali nei materiali siano opportunamente limitati allo scopo di evitare lo snervamento dell'acciaio e mitigare i fenomeni di viscosità nel calcestruzzo e nel rinforzo esterno;
- le deformazioni e le frecce non attingano valori eccessivi, tali da inficiare il normale uso della struttura, produrre danni ad elementi non portanti, arrecare disturbo psicologico agli utenti;
- i fenomeni fessurativi risultino opportunamente contenuti, in quanto fessure troppo numero-se e/o aperte potrebbero ridurre notevolmente la durabilità e la funzionalità delle strutture, nonché compromettere il loro aspetto e l'integrità del legame di

aderenza all'interfaccia FRP calcestruzzo.

Le verifiche in condizioni di esercizio devono essere svolte tenendo conto dell'eventuale de-formazione preesistente al momento dell'applicazione del rinforzo. Le ipotesi alla base del calcolo sono:

- conservazione della planarità delle sezioni rette;
- comportamento elastico lineare dell'armatura metallica e del rinforzo;
- comportamento elastico lineare a compressione del calcestruzzo e limitata capacità di quest'ultimo a resistere a sforzi di trazione;
- assenza di scorrimenti tra calcestruzzo ed armatura e tra calcestruzzo e rinforzo di FRP.

### 3.3.1 Verifica delle tensioni

Nel calcolo delle tensioni, è quando necessario considerare, oltre agli effetti dei carichi, anche quelli delle variazioni termiche, della viscosità, del ritiro e di eventuali altre distorsioni. Le tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio vanno limitate in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente:

tensioni nel calcestruzzo:  $\sigma_c = \sigma_{c0} + \sigma_{c1}, \quad \sigma_{c0} = M_0 / W_{0,c}^s, \quad \sigma_{c1} = M_1 / W_{1,c}^s;$

tensioni nell'acciaio teso:  $\sigma_s = \sigma_{s0} + \sigma_{s1}, \quad \sigma_{s0} = n_s \cdot M_0 / W_{0,s}^i, \quad \sigma_{s1} = n_s \cdot M_1 / W_{1,s}^i;$

tensioni nelle fibre:  $\sigma_f = n_f \cdot M_1 / W_{1,f}^i.$

$W_{0,c}^s = I_0 / x_0$  : è il modulo di resistenza della sezione di c.a. relativo al lembo di calcestruzzo più compresso;

$W_{0,s}^i = I_0 / (d - x_0)$  : è il modulo di resistenza della sezione di c.a. relativo all'acciaio in trazione;

$W_{1,c}^s = I_1 / x_1$  : è il modulo di resistenza della sezione di c.a. rinforzata relativo al lembo di calcestruzzo più compresso;

$W_{1,s}^i = I_1 / (d - x_1)$  : è il modulo di resistenza della sezione di c.a. rinforzata relativo all'acciaio in trazione;

$W_{1,f}^i = I_1 / (h - x_1)$  : è il modulo di resistenza della sezione di c.a. rinforzata relativo al composito fibrorinforzato.

Figura 2.8. Estratto da CNR DT 200 riguardante il calcolo delle tensioni e relativi valori

### **3.3.2 Verifica delle frecce**

Il modello meccanico utilizzato per il calcolo delle deformazioni deve essere il più simile a quello reale, e se si ritiene opportuno si può tenere conto di tutti quei effetti del tipo:

- gli effetti della viscosità e del ritiro;
- l'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra le fessure;
- la fessurazione preesistente, provocata da carichi antecedenti all'applicazione del rinforzo;
- l'influenza di distorsioni eventualmente agenti, quali ad esempio quelle di origine termica;
- la modalità di applicazione del carico, sia essa statica o dinamica;
- il valore più appropriato del modulo di elasticità normale del calcestruzzo in funzione anche della maturazione al momento della messa in carico.

Il calcolo della freccia per travi di c.a. rinforzate con FRP può essere effettuato mediante integrazione del diagramma delle curvature. Queste ultime possono essere valutate attraverso un'analisi non lineare che tenga conto della fessurazione e dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso. In caso di calcolo non lineare delle frecce, non vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

### **3.3.3 Verifica dell' apertura delle fessure**

Fondamentale per proteggere l' armatura e garantire l' integrità strutturale; occorre in fase di esercizio limitare opportunamente i valori di apertura delle fessure.

Allo stato attuale non sono disponibili modellazioni accurate e completamente affidabili per il calcolo dell'apertura delle fessure di strutture di c.a. rinforzate con FRP. In letteratura sono reperibili diverse formulazioni a base sperimentale che modificano opportunamente le espressioni in uso per le ordinarie sezioni di c.a. tenendo conto della presenza del rinforzo esterno.

L'evidenza sperimentale dimostra che le membrature di c.a. placcate con FRP presentano, generalmente, fessure di ampiezza inferiore anche se più ravvicinate

### **3.3.4 duttilità**

La duttilità degli elementi inflessi, intesa come capacità di deformazione in campo plastico, dipende sia dal comportamento della sezione che dalle modalità effettive di collasso dell'elemento strutturale nel suo complesso. Si ottiene un comportamento tanto più duttile quanto più l'armatura metallica tesa è snervata e quanto più è elevata la curvatura dell'elemento rinforzato nella condizione di crisi incipiente.

La duttilità può ritenersi del tutto assente nel caso in cui il fenomeno di distacco del rinforzo di FRP dal supporto preceda lo snervamento dell'armatura metallica tesa.

# Capitolo 4

## Rinforzo a taglio

### 4.1 Generalità

Il rinforzo a taglio, si applica in tutti quei casi in cui il taglio sollecitante valutato con la gerarchia delle resistenze, sia maggiore della resistenza al taglio offerta dalle componenti del c.a.[3]

Il rinforzo al taglio si applica in aderenza alla superficie esterna dell' elemento da rinforzare, nelle zone di sollecitazioni di taglio massime, ed esistono diverse tecniche di rinforzo a taglio [2]:

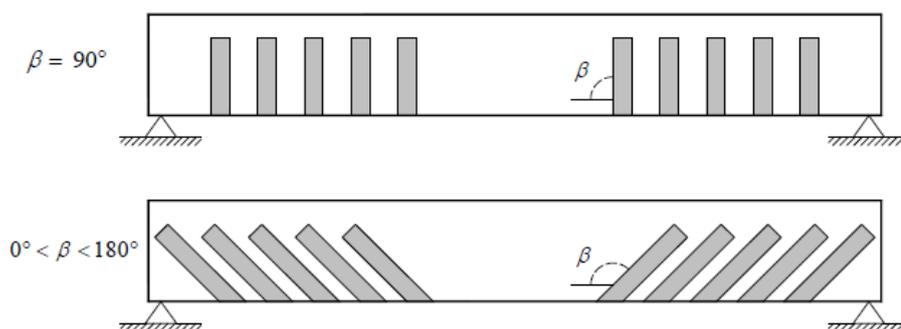


Figura 2.9. Applicazione di rinforzi in FRP a taglio, con 2 diversi versi di applicazione

Elementi distintivi del sistema di rinforzo sono: la geometria delle strisce di composito e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse dell' elemento trave.

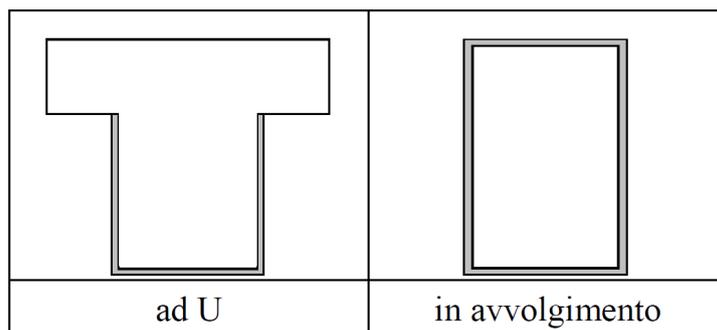


Figura 3.0. Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di sistemi di rinforzo ad U su sezioni rettangolari o a T, è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere dei compositi, ad esempio mediante l'applicazione di barre, lamine o strisce di FRP.

#### 4.2 Resistenza di progetto a taglio

La resistenza di progetto a taglio è espressa come [2]:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c} \} \quad (4.1)$$

dove  $V_{Rd,s}$  e  $V_{Rd,f}$  sono, rispettivamente, la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP;  $V_{Rd,c}$  è la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo.

$V_{Rd,f}$ , può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Mörsch, mediante la seguente formula [2]:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{b_f}{P_f} \quad (4.2)$$

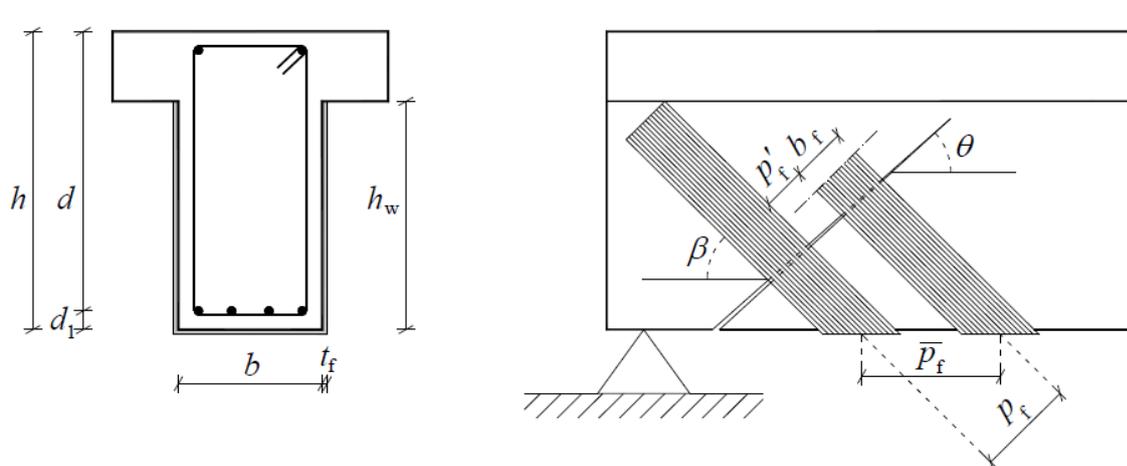


Figura 3.1. Elementi distintivi per il calcolo della resistenza al taglio offerta dal rinforzo

### 4.3 Resistenza efficace

In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto. La resistenza efficace si basa sulla definizione convenzionale di "tensione efficace" del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione attesa in condizioni di incipiente distacco dal supporto.

Nel caso di disposizione ad U, l'espressione della tensione di progetto è espressa come:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad (4.3)$$

Nel caso di disposizione in avvolgimento, l'espressione della tensione di progetto è espressa come [2]:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[ 1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min \{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad (4.4)$$

Un caso particolare al quale bisogna porre particolare attenzione si verifica quando abbiamo zone compresse nel lembo inferiore del cls, come per una mensola: difatti In questi casi la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto, e tende a creare distacchi molto più evidenti tra FRP e calcestruzzo.

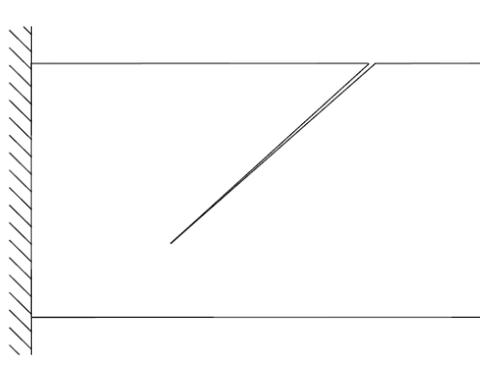


Figura 3.2. Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave.

# Capitolo 5

## Esempio di edificio esistente in cemento armato

### 5.1 Generalità

L'edificio oggetto di intervento è ubicato a Castelraimondo, nelle Marche, cap 62022, in una delle vie principali del paese. Trattasi di un fabbricato colpito dal sisma avvenuto nel 2016, il quale è stato danneggiato a tal punto da necessitare di una demolizione e ricostruzione completa. Il nuovo edificio si sviluppa per quattro piani fuori terra; la distribuzione planimetrica prevede al piano terreno negozi e locali ad essi afferenti, nei piani superiori sono allocati due alloggi per piano dotati di balconi; l'ingresso principale al piano terreno conduce a una scala realizzata con travi a ginocchio che porta ai piani superiori. L'edificio non è cantinato e ha un tetto piano, e la geometria strutturale si ripete discretamente per tutti i piani. La struttura, è composta prevalentemente da elementi in c.a., con una tipologia a Telaio, e un asse di simmetria lungo la direzione X; in seguito verranno esplicitati alcuni particolari dell'edificio per integrare la conoscenza di esso.

Per quanto riguarda l'analisi in funzione delle NTC 2018 si ha:

Classe dell'edificio: 2

Tipo di terreno prevalente: C

Vita nominale della struttura: 50 anni

Classe di duttilità: media

Essendo la problematica principale e fondamentale nel nostro territorio il rischio sismico, è fondamentale una corretta definizione della stratigrafia e di tutti i parametri geo-meccanici del terreno di fondazione. Di conseguenza si è optato per un'analisi specifica del terreno da parte di un geologo, ovvero una "Risposta sismica locale", in modo da garantire una progettazione consapevole, e diminuire la vulnerabilità dell'edificio, con conseguente diminuzione del rischio sismico.

## 5.2 Analisi del fabbricato

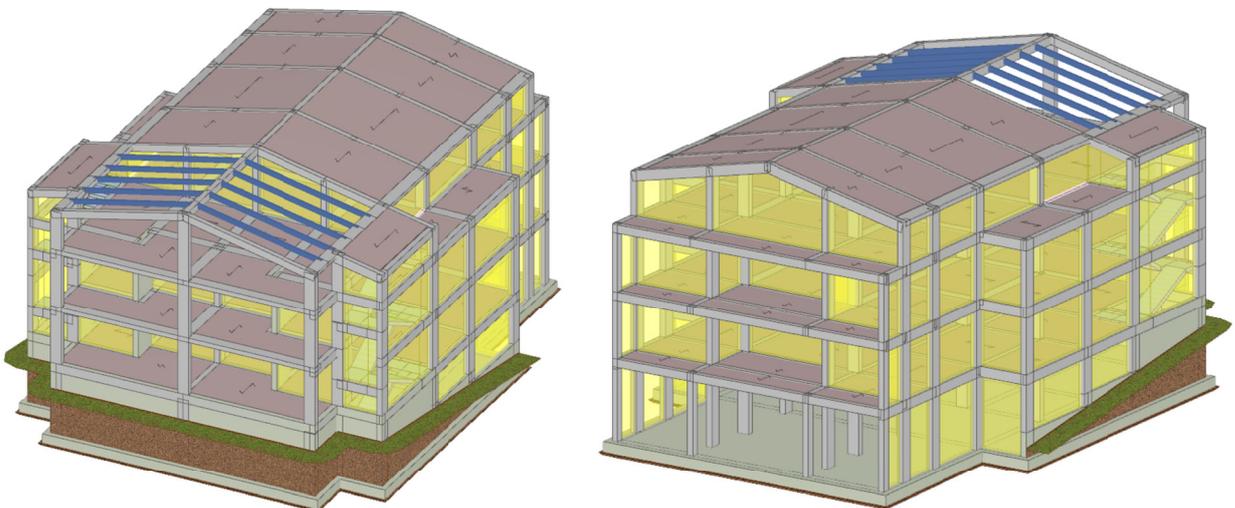
Si tratta di un telaio in cemento armato a travi e pilastri, con platea in c.a. e tutti i solai in c.a., inoltre per la copertura si è provvisto un sistema di travi tubolari rivestite in legno, per una maggior copertura solare del balcone.



(a)

(b)

Figura 3.3. (a) Vista architettonica renderizzata lato nord-est; (b) lato sud ovest.



(a)

(b)

Figura 3.4. (a) Vista strutturale lato nord-est; (b) lato sud-ovest.

### Analisi della fondazione:

Come già si può notare dalle figure [6] sovrastanti, la struttura si estende prevalentemente in una direzione con  $B/L \leq 0,5$ . Inoltre la fondazione è piuttosto estesa con circa 480 mq di superficie. La principale difficoltà riscontrata durante la progettazione del fabbricato riguarda proprio la fondazione: garantire una ipotesi di rigidità per una platea estesa, con un terreno di fondazione di scarsissima qualità, è oneroso. Di conseguenza si è adottata come soluzione per la fondazione una platea con travi irrigidenti in spessore.

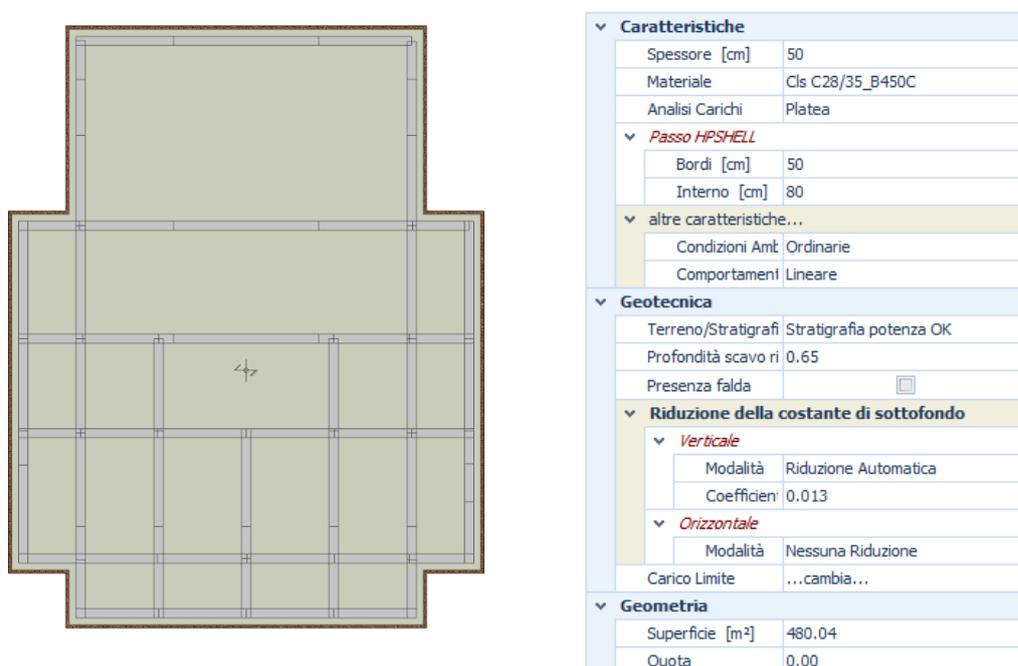


Figura 3.5. Vista planimetrica della platea di fondazione e relative proprietà

Il software di calcolo strutturale utilizzato si basa sul calcolo in analisi lineare iniziale, considerando le sezioni in cls completamente reagenti. Per questo motivo l'inserimento delle travi in spessore non apportava vantaggi per quanto riguarda la rigidità della fondazione. Il parametro fondamentale preso in considerazione è il cedimento differenziale, o ancora più nello specifico la distorsione angolare  $\beta$ , la quale è in funzione proprio della rigidità della fondazione. L'aumento anche se lieve della rigidità della fondazione è stata valutata con un'analisi non lineare, dove la distorsione angolare  $\beta$  non rappresentava un problema per l'integrità della struttura.

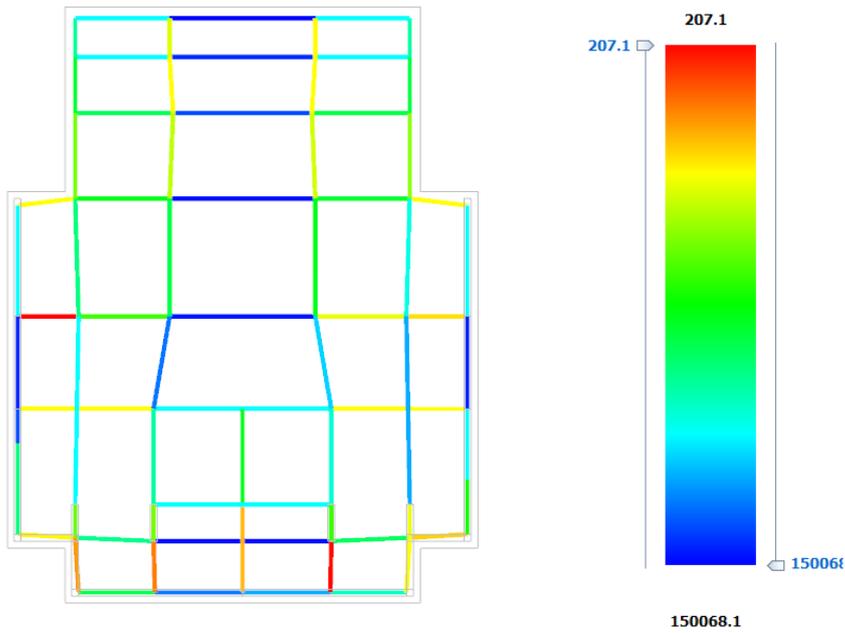


Figura 3.6. Visione delle aree con maggior distorsione angolare, valori espressi in :  $\alpha = 1/\beta$

La causa di questi cedimenti differenziali, è una distribuzione dei carichi non omogenea, oltre alla natura del terreno, come si può osservare dalle immagini sottostanti.

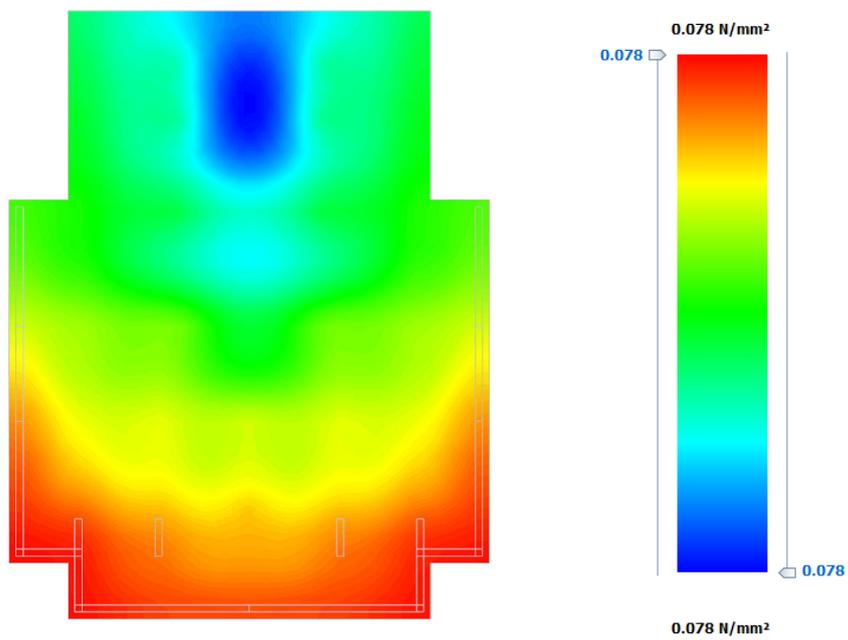


Figura 3.7. Distribuzione delle tensioni massime allo SLU

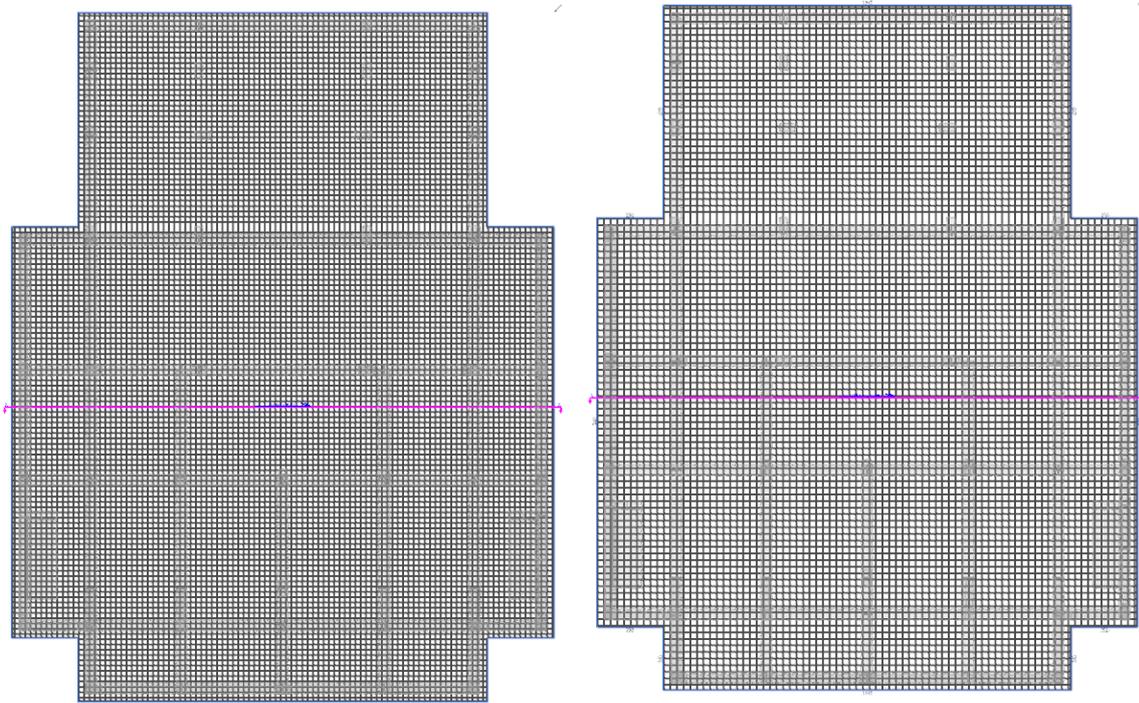


Figura 3.8. Armatura diffusa della platea

L' armatura della platea si compone da una maglia  $\phi$  16 con un passo da 20x20 all' intradosso, e una maglia  $\phi$  16 con un passo da 25x25, inglobate in uno spessore di 50 cm di Cls classe 28/35

*Analisi di una scala generica:*

Altri elementi strutturali sono le scale, travi, pilastri, setti e pareti. Partendo dalle scale abbiamo una classica struttura a “soletta rampante” costituite da un pianerottolo iniziale, una rampa, e un pianerottolo finale. Il vano scala è un elemento a livello planimetrico, il quale non presenta il solaio, ciò implica che una definizione di piano rigido generale non si adatta al meglio per quest' ultimo, di conseguenza si è scelto di definire la rigidezza di ogni singolo solaio.

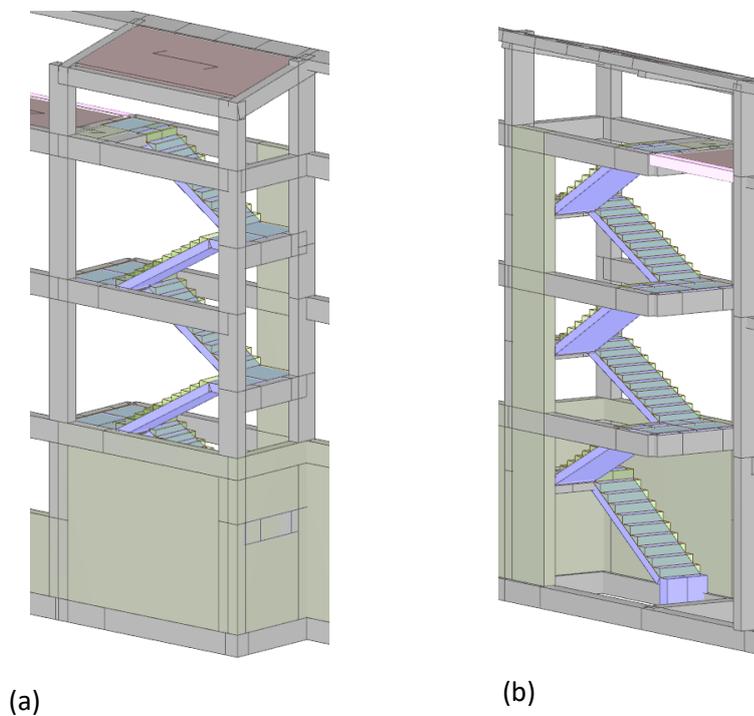


Figura 3.9. (a) Vista tridimensionale esterna del vano scala; (b) vista interna.

Le scale sono realizzate in c.a. con un calcestruzzo classe C 28/35, e un armatura di acciaio B450C. In seguito un esempio di sollecitazioni e armature della scala relativa al piano primo.

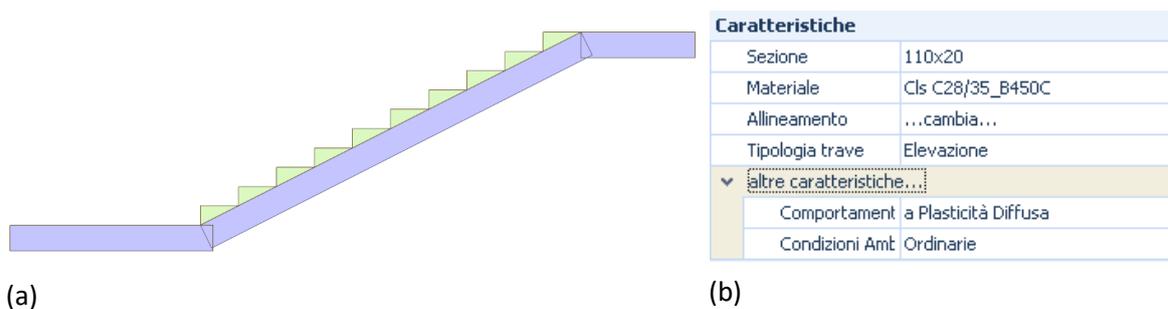


Figura 4.0. (a) Scala a soletta rampante; (b) caratteristiche.

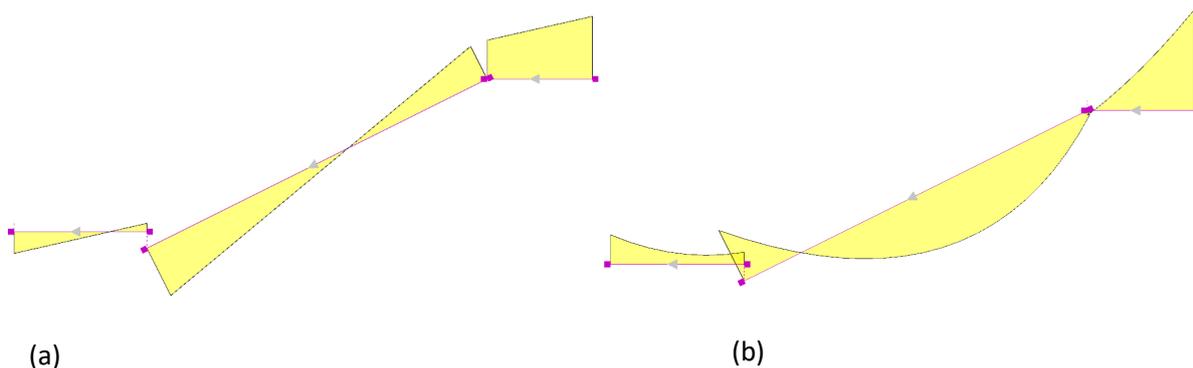


Figura 4.1. (a) diagramma del taglio sollecitante; (b) diagramma del momento sollecitante.

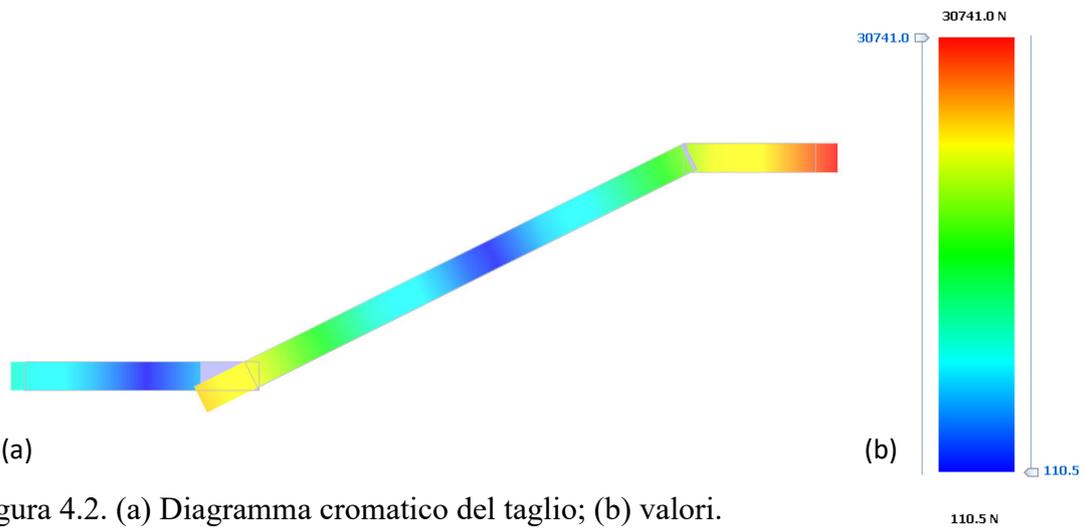


Figura 4.2. (a) Diagramma cromatico del taglio; (b) valori.

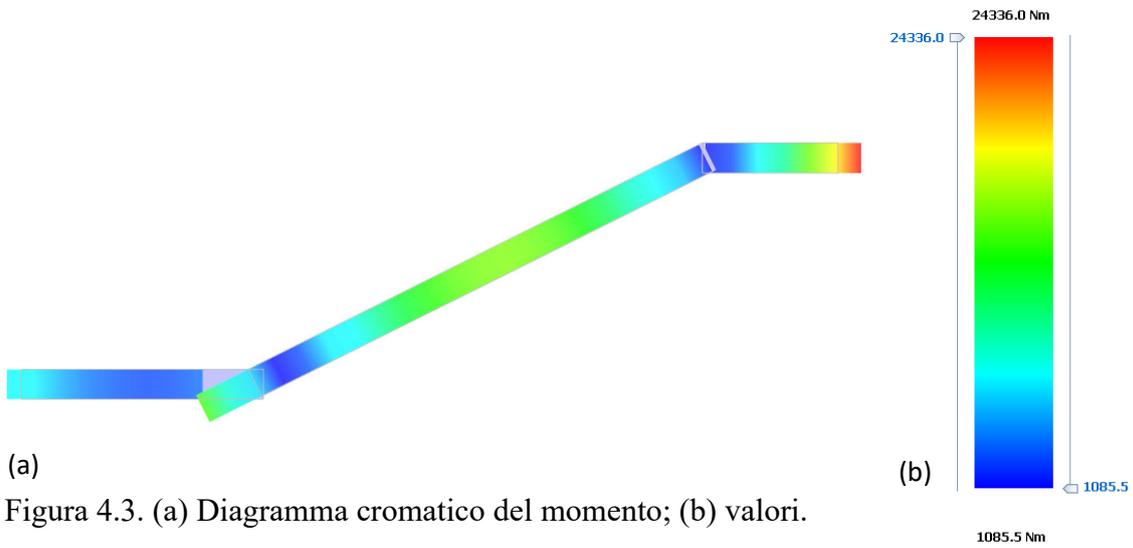


Figura 4.3. (a) Diagramma cromatico del momento; (b) valori.

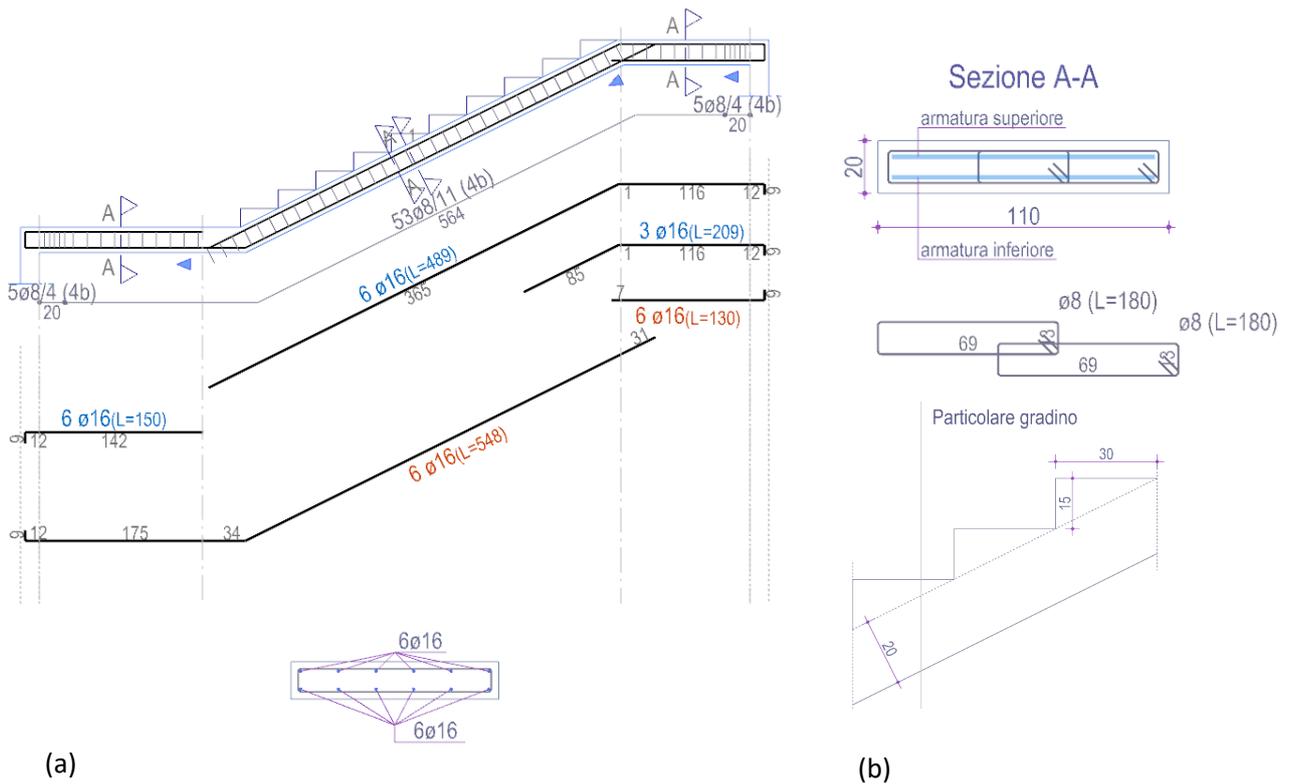


Figura 4.4. (a) Armatura della scala; (b) particolari geometrici.

Le travi, sono di sezione variabile in funzione alla loro posizione strutturale. Abbiamo per travi di bordo l' utilizzo di sezioni 30x50, per posizioni interne al fabbricato dove potrebbero influenzare l' architettura si è deciso di usare travi calate sez. 60x25, mentre ad esempio al piano interrato dove vi sono collocati i garage, e la vista strutturale delle travi calate non crea problemi sono state usate sezioni 30x50 e 30x40. I materiali utilizzati per realizzare gli elementi in c.a. sono il calcestruzzo di classe C28/35 e acciaio B450C.

*Analisi di una trave generica:*

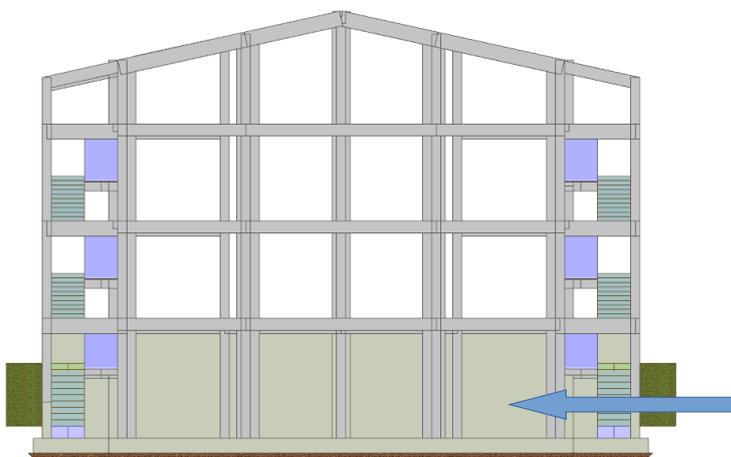


Figura 4.5. Vista prospettica del fabbricato con l' indicazione della trave esaminata.

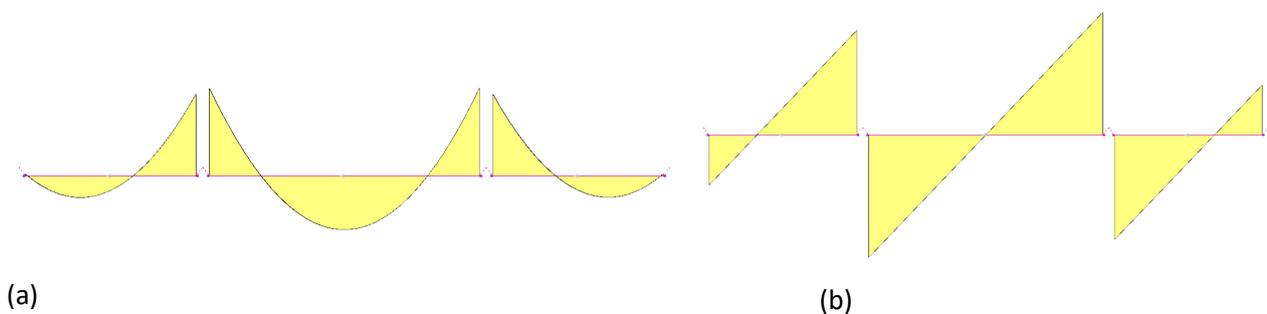


Figura 4.6. (a) diagramma sollecitante del momento; (b) sollecitazione di taglio.

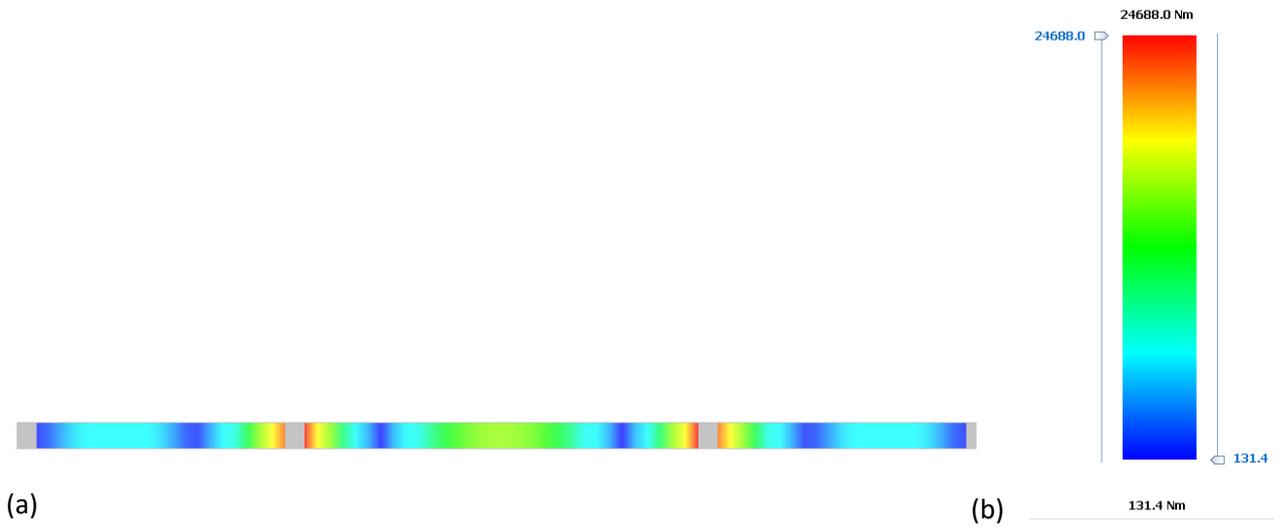


Figura 4.7. (a) Diagramma cromatico del momento; (b) valori.

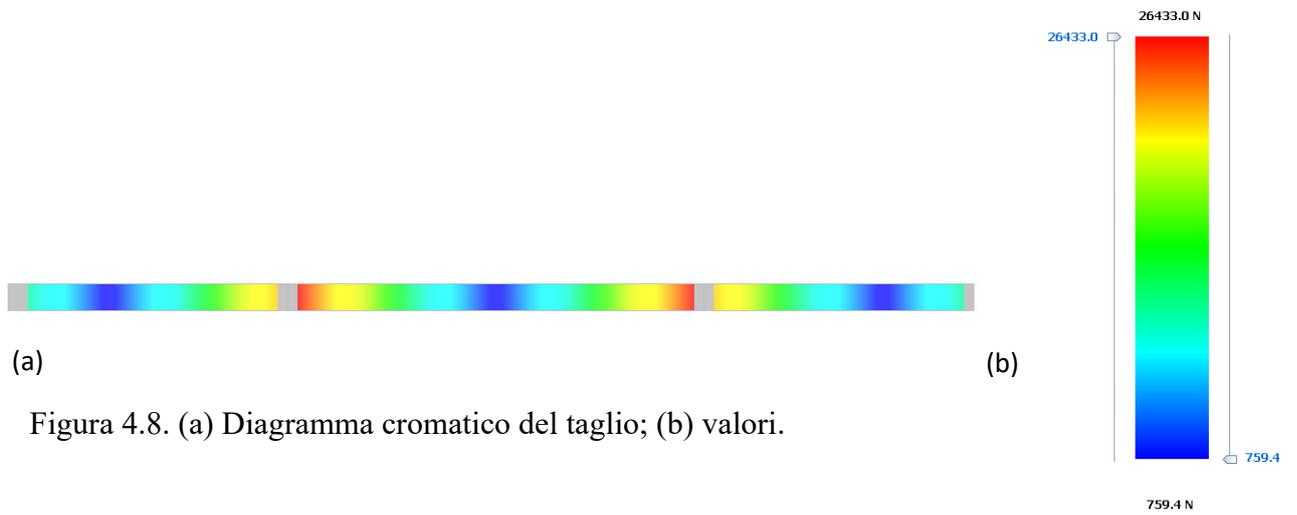


Figura 4.8. (a) Diagramma cromatico del taglio; (b) valori.

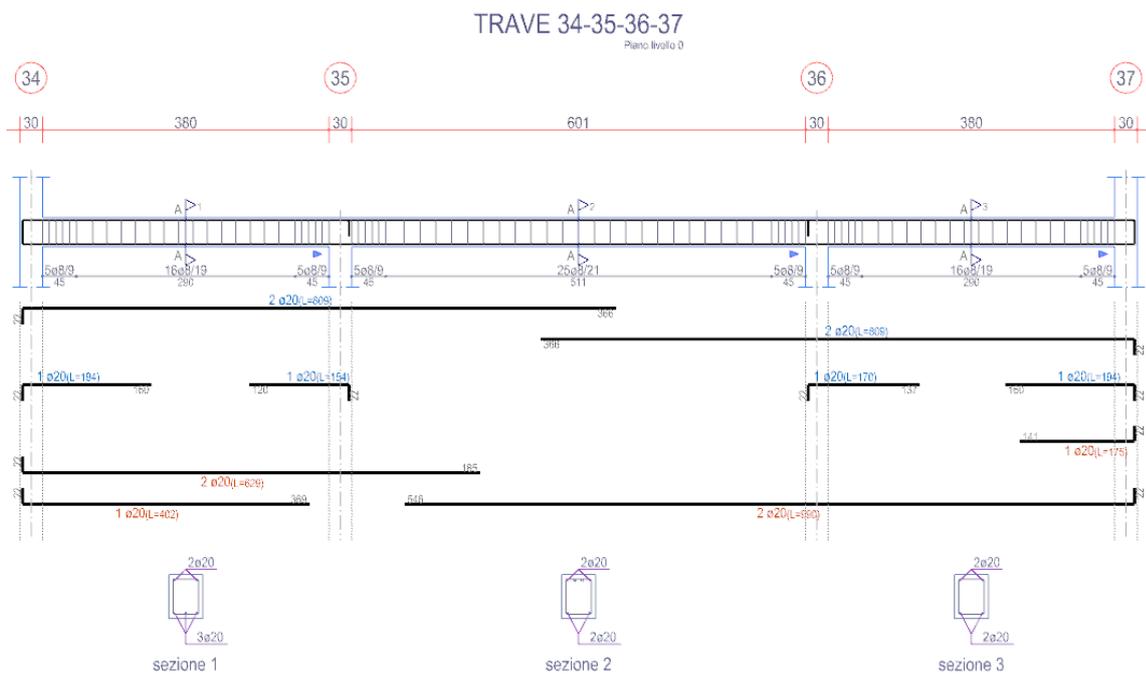


Figura 4.9. Armatura della trave in esame.

Esaminando i diagrammi sollecitanti in forma classica possiamo notare che ai nodi della nostra trave vi siano presenti dei “braccetti” i quali fanno variare i diagrammi delle sollecitazioni. Parliamo dell’ ipotesi implementata dal software di “conci rigidi per elementi di calcolo Beam” : essa consiste nel simulare al meglio tutti quei disassamenti e disallineamenti fra tutti gli elementi “trave”. Per cui avremmo una risposta più veritiera per quanto riguarda le irregolarità del fabbricato, ma per il calcolo delle sollecitazioni verrà considerata solo la zona libera di inflessione della trave, ovvero la luce netta [5].

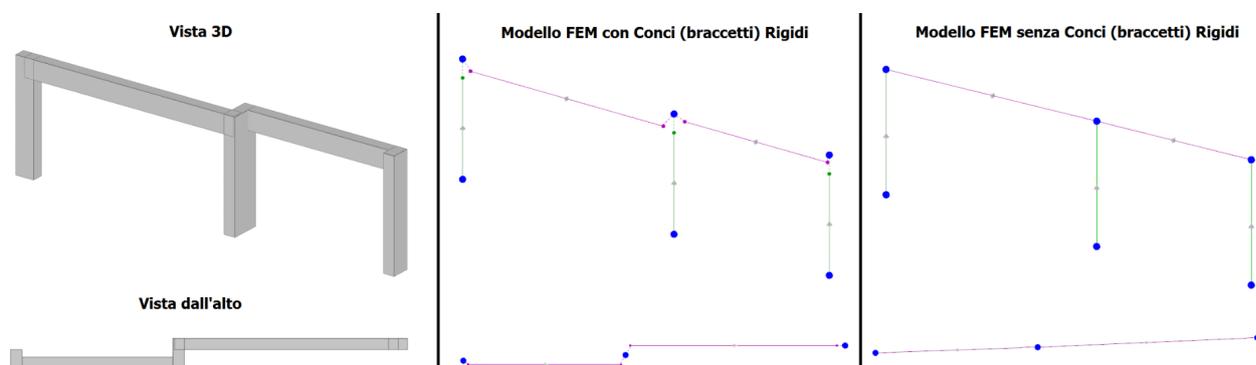


Figura 5.0. Esempio di un modello con e senza ipotesi di braccetti rigidi

I pilastri, sono stati realizzati con una sezione 30x60, e sono tutti nascenti dal piano di fondazione, come anche i setti e le pareti in cls.

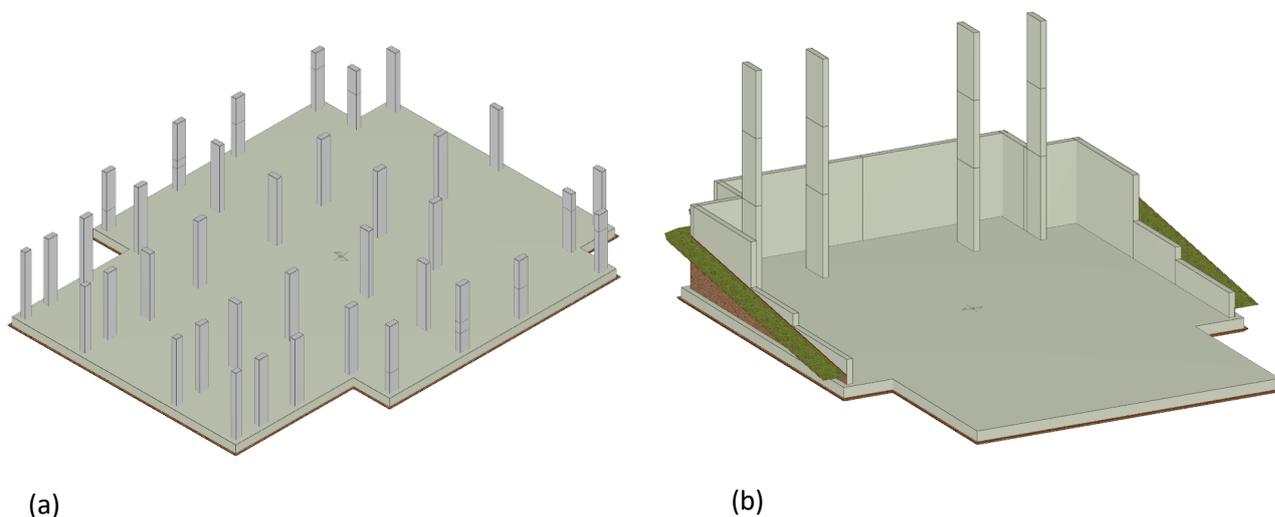


Figura 5.1. (a) Vista dei pilastri nascenti dalla fondazione; (b) vista di pareti e setti in c.a.

Le pareti in c.a. sono necessarie per contrastare la spinta del terreno, quindi sono state sviluppate in funzione dell'andamento del terreno, a tre livelli di altezza. I setti in c.a. sono utilizzati in parte per irrigidire il vano scala, e in parte come sostegno per le travi.

*Analisi di un pilastro generico:*

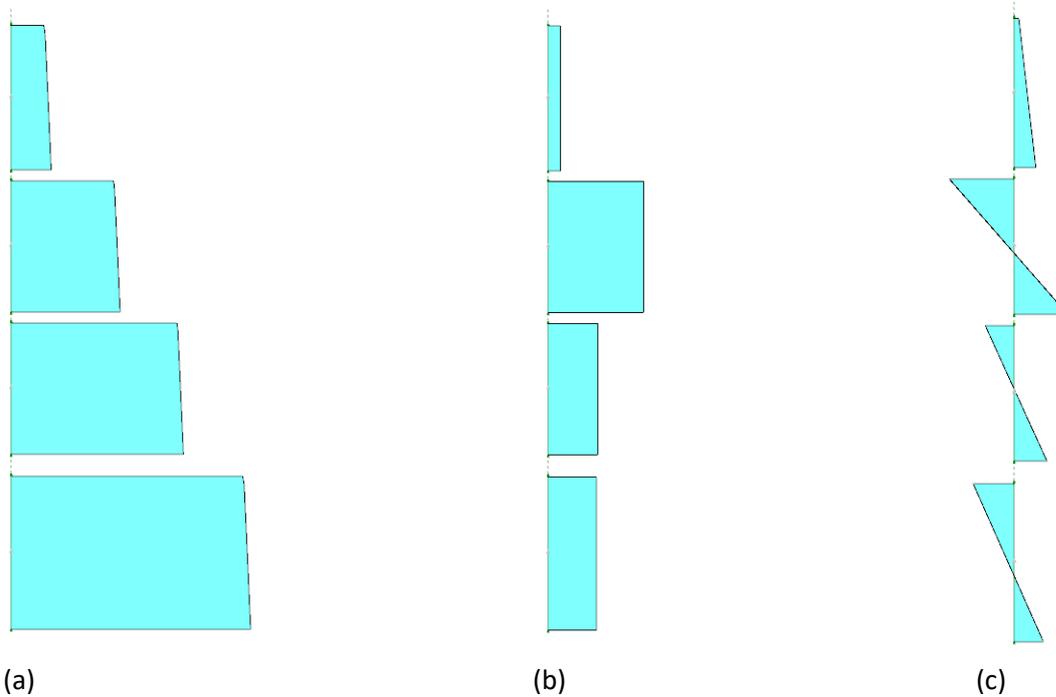


Figura 5.2. (a) diagramma della normale sollecitante; (b) taglio; (c) momento.

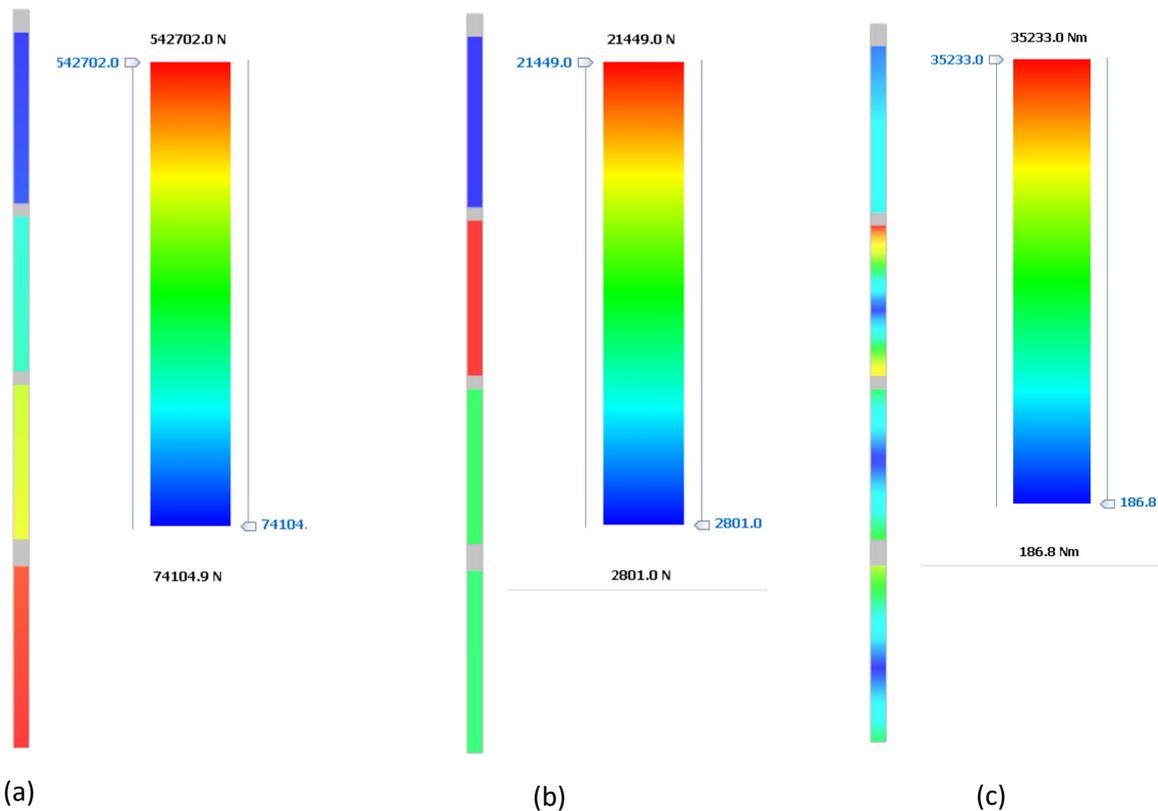


Figura 5.3. (a) diagramma cromatico della normale; (b) taglio; (c) momento.

## PILASTRATA 8

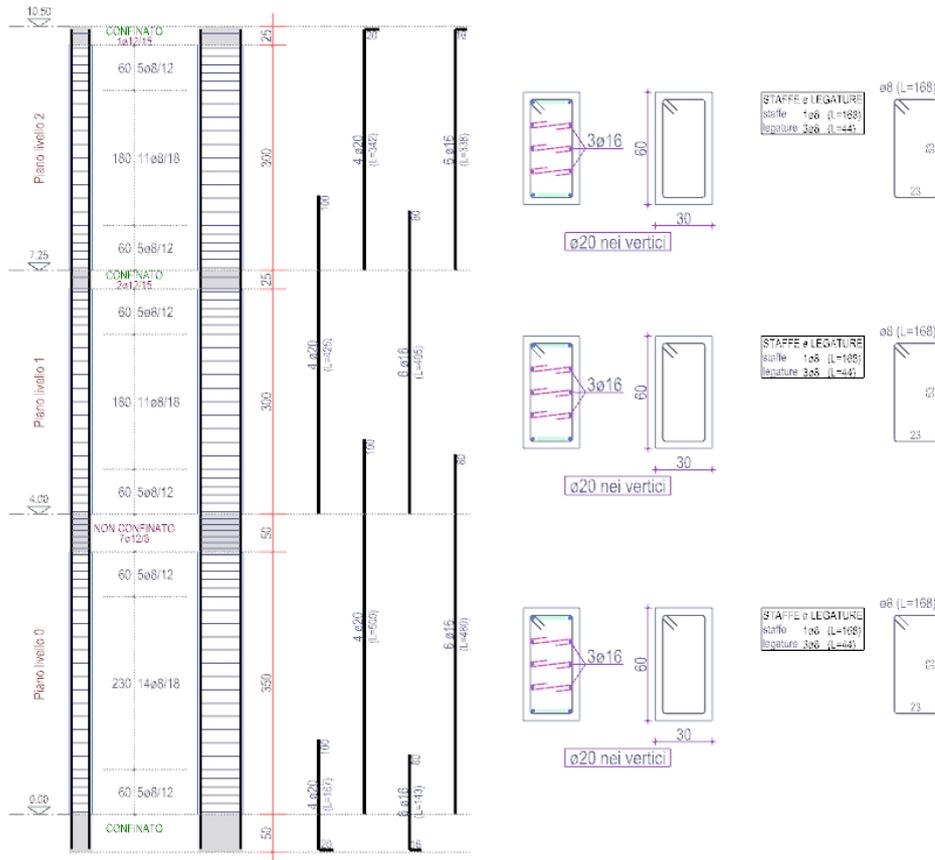


Figura 5.4. Armatura del pilastro, con relative sezioni esplicative.

### 5.3 Definizione del terreno di fondazione

L'Appennino umbro-marchigiano è inglobato in un complesso sistema di strutture sismogenetiche, gran parte dell'area marchigiana, caratterizzata da discreta sismicità, è interposta fra due fasce sismiche. Alla luce dei danni al vecchio fabbricato oggetto di demolizione, si è deciso di effettuare una risposta sismica locale per la definizione corretta dei parametri geotecnici del terreno.

| DESCIZIONE LITOSTRATIGRAFICA           |                |                    |   |
|--|----------------|--------------------|---|
| LITOLOGIA                              | PROF.T<br>A' m | SPES<br>SOR<br>E m | ETA'  |
| Terreno riporto<br>Tipo RI             | P.C.           | 2.7m               | <b>Terreno di riporto/vegetale:</b><br>costituisce il terreno di copertura nell'area ove insiste l'opera.<br><br><i>LIMO CON GHIAIA SPARSA E LATERIZI.</i>  |
|  | 2.7 m          |                    |   |
| *Depositi alluvionali<br>Tipo GC SM CL | 19.0 -         | 17.1 -             | <b>DEPOSITI ALLUVIONALI</b><br>costituiscono la copertura di tutta la zona. Si mostrano lateralmente discontinui e dalla geometria lenticolare.<br><br><b>SM:</b> <i>SABBIA LIMOSA E LIMO SABBIOSO CON CLASTI SPARSI, SCREZIATURE OCRACEE DI COLORE MARRONE CHIARO. LITOLOGIA PREDOMINANTE</i>                    |
|  |                |                    | <b>GW:</b> <i>GHIAIA FINE IN MATRICE LIMOSA MARRONE O ARGILLOSA GRIGIA</i>  |
|  |                |                    | <b>CL:</b> <i>ARGILLA GRIGIA PLASTICA CON SABBIA E LIVELLI RICCHI DI RESIDUI CARBONIOSI.</i>  |
| Substrato<br>Tipo SFCOS COS            |                |                    | <b>SUBSTRATO</b><br>Rappresenta la litologia predominante dell'area, non affiorante rinvenuto soltanto nei sondaggi, si caratterizza di:<br><br><i>LIVELLI SOTTILMENTE STRATIFICATI DI ARIGILLE SILTOSE DI COLORE GRIGIO AZZURRE, ALTERNATE A LIVELLI ARENACEI DI COLORE BEIGE. ALTERATO NEI PRIMI DECIMETRI.</i> |

Figura 5.5. stratigrafia del terreno di fondazione.

A seguito di sondaggi, prove penetrometriche dinamiche e prove sismiche è stato caratterizzato meccanicamente il terreno di fondazione.

Allo SLV abbiamo i seguenti parametri:

| Ag<br>[m/s <sup>2</sup> ] | F0       | Tc* | TB<br>[s] | TC<br>[s] | TD<br>[s] | Se(0)<br>[m/s <sup>2</sup> ] | Se(TB)<br>[m/s <sup>2</sup> ] | S     |
|---------------------------|----------|-----|-----------|-----------|-----------|------------------------------|-------------------------------|-------|
| 2.896                     | 2.982004 | --  | 0.142     | 0.427     | 2.781     | 2.896                        | 8.635                         | 1.604 |

Figura 5.6. Parametri dello spettro di progetto orizzontale.

| Ag<br>[m/s <sup>2</sup> ] | F0    | Tc*   | Fv    | q   | TB<br>[s] | TC<br>[s] | TD<br>[s] | Se(0)<br>[m/s <sup>2</sup> ] | Se(TB)<br>[m/s <sup>2</sup> ] |
|---------------------------|-------|-------|-------|-----|-----------|-----------|-----------|------------------------------|-------------------------------|
| 2.896                     | 2.982 | 0.150 | 2.187 | 1.5 | 0.050     | 0.150     | 1.000     | 2.124                        | 4.222                         |

Figura 5.7. Parametri dello spettro di progetto verticale.

In seguito alla campagna geologica, possiamo notare che il terreno negli strati più superficiali, è di natura scadente, di conseguenza abbiamo dei parametri di calcolo amplificati rispetto alla normativa. Alla luce di ciò è stata adottata come fondazione una platea, per soddisfare la capacità portante limite, con delle travi in spessore per ridurre in parte i cedimenti differenziali.

#### **5.4 Analisi dei carichi pre e post cambio di destinazione:**

➤ *Solaio in latero-cemento abitazione:*

- Peso proprio: Solaio di tipo tradizionale latero-cementizio di spessore 25 cm (20+5) : 3530 [N/m<sup>2</sup>]
- Sovraccarico permanente: Pavimento, sottofondo, incidenza dei tramezzi e intonaco inferiore: 2360 [N/m<sup>2</sup>]
- Sovraccarico accidentale: Civile abitazione (Cat. A – Tab. 3.1.II - DM 17.01.2018) : 2000 [N/m<sup>2</sup>]

➤ *Solaio latero-cemento con copertura accessibile:*

- Peso proprio: Solaio di tipo tradizionale latero-cementizio di spessore 20cm (16+4) : 2800 [N/m<sup>2</sup>]
- Sovraccarico permanente: Manto di copertura, impermeabilizzazione e intonaco inferiore: 1360 [N/m<sup>2</sup>]
- Sovraccarico accidentale: Coperture praticabili di locali di abitazione (Cat. I – Tab. 3.1.II - DM 17.01.2018) : 2000 [N/m<sup>2</sup>]

➤ *Solaio latero-cemento ad uso commerciale:*

- Peso proprio: Solaio di tipo tradizionale latero-cementizio di spessore 25cm (20+5) : 3530 [N/m<sup>2</sup>]

- Sovraccarico permanente: Pavimento, sottofondo, incidenza dei tramezzi e intonaco inferiore: 2360 [N/m<sup>2</sup>]
- Sovraccarico accidentale: Aree per immagazzinamento e uso commerciale (Cat. E – Tab. 3.1.II - DM 17.01.2018) : 6000 [N/m<sup>2</sup>]

Possiamo notare la differenza di carico pre e post cambio di destinazione d' uso:

- *Solaio in latero-cemento abitazione* : 7890 [N/m<sup>2</sup>]
- *Solaio latero-cemento ad uso commerciale*: 11890 [N/m<sup>2</sup>]

Si ha un incremento del carico distribuito sul solaio di circa 4000 [N/m<sup>2</sup>], il quale necessita assieme alle travi su cui poggiano i travetti, di un rinforzo strutturale per compensare l' eventuale mancanza di resistenza.

### **5.5 Rinforzo degli elementi in c.a. con la tecnica NSM**

L' edificio preso in considerazione è stato progettato per un utilizzo di Civile – Abitazione; Per quanto riguarda i piani fuoriterra, si ha due piani adibiti ad abitazioni, mentre il piano terra ha una destinazione d' uso commerciale. Una volta conclusa la posa in opera del fabbricato, al piano primo è stato deciso da parte dei proprietari di utilizzare una parte dell' unità immobiliare come magazzino per i negozi, quindi variando destinazione d' uso si sono variati i carichi di esercizio di alcuni elementi strutturali. Alla luce dell' aumento del carico, per garantire una certa durabilità della struttura si è deciso di applicare una tecnica di rinforzo strutturale per aumentare le resistenze flessionali e taglianti delle travi. Il sistema preso in considerazione si basa sugli FRP, materiali fibrorinforzati con elevatissime capacità di resistenza, più nello specifico si userà la tecnica NSM di seguito descritta.

Gli FRP (Fibre Reinforced Polymers) sono frequentemente utilizzati per il rinforzo delle strutture di cemento armato, in genere applicati con adesivi epossidici. Tuttavia, il degrado delle proprietà meccaniche dell'adesivo polimerico e del composito stesso a causa di effetti ambientali, quali ad esempio le alte temperature, è un aspetto chiave nell'applicazione degli FRP in edifici civili ed industriali. Con la tecnica NSM (Near Surface Mounted) la barra di FRP (tonda, quadrata o rettangolare) viene posizionata in una scanalatura ricavata nel copriferro dell'elemento strutturale ed incollata con resina epossidica o, meno frequentemente, cementizia. In generale FRP applicati con la tecnica NSM hanno un'aderenza migliore di quelli applicati con la tecnica EBR (Externally Bonded Reinforcement). Il sistema NSM è anche meno soggetto a danneggiamenti, in quanto il rinforzo in FRP è inglobato nella scanalatura riempita dall'adesivo. Tuttavia, l'efficacia dell'adesivo epossidico è molto bassa a temperature elevate, perché gli adesivi epossidici sono caratterizzati da temperature di transizione vetrosa ( $T_g$ ) relativamente bassa, sebbene i prodotti pultrusi possano raggiungere valori di  $T_g$  superiori. Nelle applicazioni NSM, l'uso di un FRP con elevata  $T_g$  accoppiato ad una malta di tipo cementizio può migliorare le prestazioni meccaniche del sistema di rinforzo in condizioni di incendio. Infatti gli adesivi cementizi si comportano di per sé meglio degli epossidici alle alte temperature, e possono anche proteggere l'FRP da un punto di vista meccanico, ma soprattutto termico, evitando la necessità di applicare costosi materiali isolanti.



Figura 5.8. Esempio di applicazioni di rinforzi FRP con tecnologia NSM.

Come sopracitato i Sistemi NSM FRP sono costituiti da barre o piastre installate in scanalature sulla parte superficiale dell' opera in calcestruzzo armato, ovvero nel copriferro. Le tipologie più comuni di rinforzo li possiamo trovare sotto forma di:

- Barre tonde solitamente prodotte mediante un processo di pultrusione, tipicamente consegnati in sito sotto forma di singoli barre o in rotolo, a seconda del diametro della barra
- Barre e lamine rettangolari prodotte prevalentemente mediante un processo di pultrusione.

È una tipologia di rinforzo sviluppato in tempi recenti, il quale è molto efficace su elementi in c.a. , dove è importante che il rinforzo in acciaio esistente non venga danneggiato mentre si fresa il solco per il rinforzo.

Inanzitutto è fondamentale effettuare un controllo della superficie del calcestruzzo, la quale all' aumentare degli anni di esercizio passati tende a rovinarsi, creando distacchi e fessure del copriferro [10] .

Una volta controllata la superficie si effettua la scanalatura nel copriferro e la si pulisce, onde evitare di ridurre le tensioni di aderenza tra il supporto e l' elemento da rinforzare. È molto importante anche controllare l' umidità dell' elemento, per poi posare il rinforzo in FRP e riempire la scanalatura con una matrice di tipo adesivo.

Questa tipologia di rinforzo è posata sia nella parte intradossale degli elementi di c.a. , che nelle parti estradossali, ma a seconda dei casi anche nelle facce laterali.

Per prevenire una rottura per distacco dell' elemento in FRP dal calcestruzzo è necessario limitare la tensione effettiva nell' elemento FRP , quindi andare a limitare la deformazione del Rinforzo previo distacco  $\epsilon_{fd}$ . Per applicazioni “ Near Surface Mounted” il valore di  $\epsilon_{fd}$  deve ricadere tra  $0,6 \epsilon_{fu}$  e  $0,9 \epsilon_{fu}$  con  $\epsilon_{fu}$  deformazione limite del rinforzo in FRP.

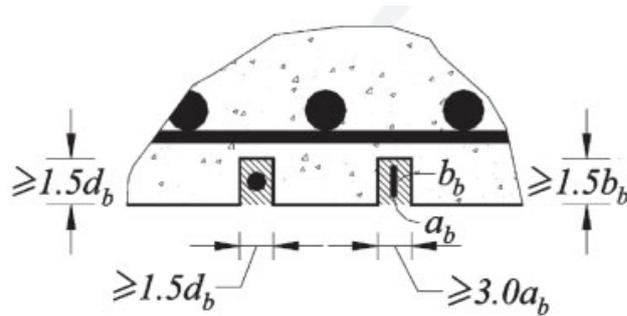


Figura 5.9. Dimensione minima delle scanalature.

Per i sistemi NSM le dimensioni minime delle scanalature devono essere maggiori di 1,5 volte il diametro della barra tonda, mentre per barre rettangolari abbiamo dimensioni minime dettate dalla base e dall' altezza dell' elemento in FRP. Inoltre è molto importante avere consapevolezza delle dimensioni del copriferro, al fine di evitare la riduzione delle sezioni delle staffe e conseguenti riduzioni di resistenze.

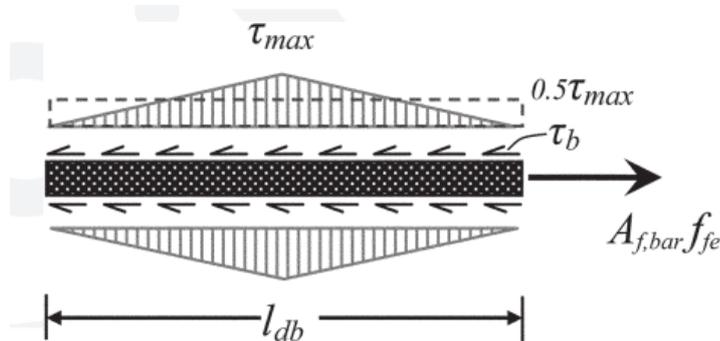


Figura 6.0. Distribuzione delle tensioni di aderenza di barre FRP in sistema NSM.

Le proprietà di legame tra il rinforzo e il cls sono influenzate da numerosi fattori quali tipologia del cemento, ruvidità dell' interfaccia, tipologia di matrice adesiva. Considerando una distribuzione delle tensioni triangolare possiamo definire la lunghezza di sviluppo della barra in FRP. Esprimendo la tensione media della distribuzione come  $0,5\tau_{max}$  con valori compresi tra 500/ 3000 PSI (3,45/20,7 Mpa), possiamo ricavare la lunghezza di sviluppo del rinforzo [2]:

- Per barre tonde:

$$\ell_{db} = \frac{d_b}{4\tau_b} f_{fd} \quad (5.1)$$

- Per barre rettangolari:

$$\ell_{db} = \frac{a_b b_b}{2(a_b + b_b)(\tau_b)} f_{fd} \quad (5.2)$$

Il sistema NSM di nuova generazione è adattabile alla maggior parte dei casi esistenti, con ottimi risultati. Uno dei problemi da studiare è la perdita di adesione in funzione della fessurazione del calcestruzzo.

Esempi di NSM che utilizzano barre di acciaio per strutture in ca risalgono ai primi anni '50. I vantaggi delle barre in FRP NSM rispetto all'acciaio come rinforzo sono che sono più facili e veloci da assemblare grazie alla leggerezza dei materiali di rinforzo, alla sottigliezza delle scanalature attribuibile alla maggiore resistenza alla trazione e alla migliore resistenza alla corrosione degli FRP [8] .

La tecnica NSM appare in grado di risolvere una serie di aspetti; la suscettibilità delle lastre FRP o dei rinforzi FRP incollati esternamente ai danni derivanti da urti, alte temperature e fuoco.

Le barre in FRP NSM sono inclini a mostrare scorrimenti maggiori rispetto al rinforzo in acciaio a causa della resistenza di taglio potenzialmente inferiore dei materiali FRP. Inoltre lo scorrimento del rinforzo può essere influenzato dalla fessurazione del calcestruzzo.

Per una data profondità della scanalatura, il carico massimo di un giunto aumenta all'aumentare della lunghezza del rinforzo. La forza di adesione media, tuttavia, diminuisce a causa della mancanza di uniformità nella distribuzione della tensione di adesione lungo la lunghezza di adesione. In termini di sollecitazione del legame e scorrimento, la meccanica del legame è collegata alla rottura lungo le interfacce del materiale. Lo slittamento sperimentale è sempre lo spostamento relativo tra l'asta di FRP e il calcestruzzo come somma degli slittamenti tra asta e resina epossidica e tra resina e calcestruzzo.

- Quando la rottura è all'interfaccia epossidica-calcestruzzo, la tensione di adesione media è calcolata come [2]:

$$\tau_{av,1} = \frac{P_{max}}{l_g \cdot l_b} \quad (5.3)$$

Con  $l_b$  e  $l_g$  rispettivamente la lunghezza dell'adesione e il perimetro della scanalatura, mentre  $P_{max}$  è il carico di picco.

- Quando il meccanismo di rottura è dovuto all'interfaccia tra l'asta e il materiale adesivo, la tensione di adesione media può essere calcolata come [2]:

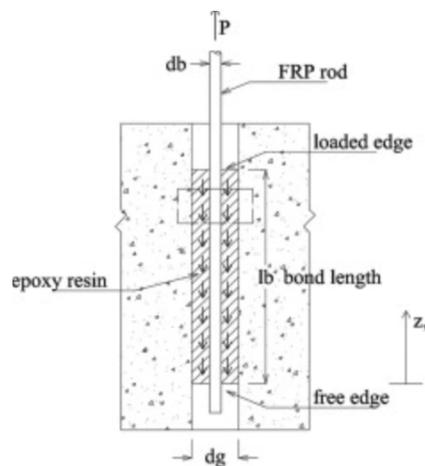
$$\tau_{av,2} = \frac{P_{max}}{\pi \cdot d_b \cdot l_b} \quad (5.4)$$

$$\tau_{av,2} = \frac{P_{max}}{(a_b + 2b_b) \cdot l_b} \quad (5.5)$$

Con  $d_b$  il diametro nominale della barra in FRP tonda,  $a_b$  e  $b_b$  rispettivamente lo spessore e la larghezza della barra in FRP rettangolare. In generale, il meccanismo di guasto più pericoloso è la perdita di adesione all'interfaccia asta-epossidico.



(a)



(b)

Figura 3.2 (a) Preparazione provino con tecnica NSM; (b) Modello teorico [5].

In generale un sistema di rinforzo FRP NSM ha diversi vantaggi rispetto al rinforzo con tessuto applicato sulla superficie esterna dell' elemento trave in c.a. , tra cui, possiamo notare da prove in laboratorio [8] , che il NSM offre un incremento maggiore di rigidità, ha meno problemi di resistenza alle temperature e al fuoco, ed ha una maggiorazione dei momenti resistenti a livello fessurativo e di snervamento.

#### *Considerazioni finali*

Alla luce della tipologia strutturale del fabbricato in esame, ovvero un telaio in c.a. , si è ritenuta opportuna la posa di un rinforzo strutturale in materiale fibrorinforzato, per far fronte al cambio di destinazione dell' unità abitativa al piano primo. Più nello specifico si è scelta la tecnica recente di “Near Surface Mounted” per la posa del FRP, la quale apporta una serie di vantaggi rispetto al classico approccio all' FRP quali: facilità dell' intervento, quindi svincolamento, o almeno in parte, dell' intervento dalla variabile “operatore”; maggior protezione del sistema di rinforzo, principalmente alla temperatura e al fuoco; l' ottimo incremento di rigidità, resistenza a flessione ed anche a taglio. Da questi ultimi si può dedurre che essendo anche il NSM in una zona più protetta rispetto ai classici rinforzi, mantenendo dei buoni coefficienti di sicurezza si può garantire il soddisfacimento del cambio di destinazione, facendo fede anche alla vita utile rimanente del fabbricato. Difatti l' intervento risulta, anche se solo da un' analisi generica e preliminare, un buon connubio tra facilità della posa, qualità dell' intervento e risultati attesi.

# Bibliografia

[1] 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*, versione del 15 maggio 2014.

[2] ACI 440 2R-17, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, maggio 2017.

[3] Capozucca R. *Static and dynamic response of damaged RC beams strengthened with NSM CFRP rods*, *Composite Structures*, 2009, 91(3):237-248.

[4] Capozucca R, *On the strengthening of RC beams with near surface mounted GFRP rods*, In *Composite Structures*, November 2014, 117:143-155.

[5] Capozucca R, *Analysis of bond-slip effects in RC beams strengthened with NSM CFRP rods*, In *Composite Structures*, August 2013, 102:110-123.

[6] Chen W.F. *Plasticity in reinforced concrete*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1982.

[7] R. Troli - F. Simonelli, *Restauro delle strutture in calcestruzzo degradato*, *Enco Journal* n. 58/2013”

[8] NTC 2018, *Norme tecniche per le costruzioni*, D.M. 17 gennaio 2018.