



# COMUNE DI PAVIA



## PROGETTO DEFINITIVO ESECUTIVO

### MANUTENZIONE STRAORDINARIA STADIO FORTUNATI PAVIA

COMMITTENTE: COMUNE DI PAVIA

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: ING. ADRIANO SORA

OGGETTO: **RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA STRUTTURALE**

PROGETTISTA:



STUDIO DI INGEGNERIA  
CLAUDIO G. MARABELLI

P.zza Regisole n.12 - 27100 Pavia  
Tel. 0382 35968

Luglio 2020

## PREMESSA

Le infiltrazioni d'acqua e gli agenti atmosferici in generale, hanno determinato alcuni fenomeni di disgregazione e perdita di copri ferro in alcune porzioni delle strutture delle coperture delle tribune.

Sulla copertura della Tribuna Ovest il fenomeno di disgregazione del calcestruzzo è particolarmente evidente all'intradosso delle travi che costituiscono i due giunti laterali in prossimità dell'ampliamento della tribuna avvenuto negli anni '50.



In questo caso è stata eseguita una verifica sulla capacità portante delle due travi in condizioni statiche e si è constatata la necessità di intervenire dapprima con la ricostruzione della struttura e successivamente con un rinforzo intradossale con fibre di carbonio il tutto come meglio di seguito descritto:

### **1. Preparazione del supporto:**

Procedere alla idrodemolizione selettiva delle superfici con calcestruzzo ammalorato. Un irruvidimento ideale del sottofondo corrisponde a una superficie con asperità di almeno 5 mm. La rimozione dovrà essere estesa anche alle zone in cui non sono evidenti segni di corrosione sulle armature.

Le superfici delle armature dovranno essere trattate con idrosabbatura a metallo bianco, al fine di rimuovere tutti i prodotti di corrosione, che, se dovessero rimanere a contatto con l'armatura, potrebbero determinare l'attacco corrosivo, anche in seguito al ripristino. La pulizia accurata delle armature dovrà essere estesa a tutta la superficie, anche a quella interna. Ovviamente si dovrà valutare la sezione residua delle armature e, qualora l'analisi strutturale lo richiedesse, si dovrà prevedere la sostituzione o l'integrazione con nuove armature.

## **2. Ciclo di ripristino del calcestruzzo ammalorato:**

Protezione anticorrosiva delle armature con malta cementizia anticorrosiva monocomponente tipo MAPEFER 1K, da applicare a pennello sulle armature.

Saturazione del sottofondo bagnando con acqua in pressione, al fine di evitare la sottrazione di acqua alla malta da applicare, con conseguente perdita delle caratteristiche espansive. Prima di applicare la malta si dovrà attendere l'evaporazione dell'acqua in eccesso. Per facilitare quest'operazione, si potrà, se necessario, utilizzare aria compressa.

Ricostruzione della sezione in calcestruzzo con malta monocomponente a consistenza plastica (tissotropica), fibrorinforzata TIPO MAPEGROUT T60, per il ripristino del calcestruzzo con spessori da 20 a 50 mm. Al momento del confezionamento la malta dovrà essere miscelata con l'aggiunta di 0,25% di additivo liquido stagionante tipo MAPECURE SRA, in grado di ridurre il ritiro idraulico e l'insorgere di microfessurazioni. Il prodotto è applicabile su superfici verticali con spessore massimo consentito di 30-35 mm per strato e a soffitto con spessori di 20-25 mm per strato, sia a mano sia con pompe intonacatrici del tipo a pistoncini o a vite senza fine (Putzmeister, Turbosol, ecc.).

Qualora si renda necessario applicare un secondo strato di malta tipo MAPEGROUT T60, si dovrà lavorare la prima mano con la spatola dentata da 10 mm, in modo da creare una scabrosità uniforme, che consenta una perfetta adesione tra il primo e il secondo strato, anche quando il primo strato è già perfettamente indurito. Prima di applicare il secondo strato, è necessario eseguire un lavaggio a pressione del supporto.

## **3. Rinforzo con fibre di carbonio:**

Procedere alla stesura dei tessuti in fibra di carbonio tipo MAPEWRAP all'intradosso della trave. Primerizzazione delle superfici precedentemente rinforzate mediante applicazione a rullo o pennello di materiale tipo MAPEWRAP PRIMER 1.

Rasatura di regolarizzazione delle superfici primerizzate in precedenza con materiale tipo MAPEWRAP 11.

Realizzazione del rinforzo longitudinale della trave mediante l'applicazione di fogli di tessuto monodirezionale tipo MAPEWRAP C UNI-AX 300/40 W disposti lungo l'intera luce della mensola a partire dal pilastro.

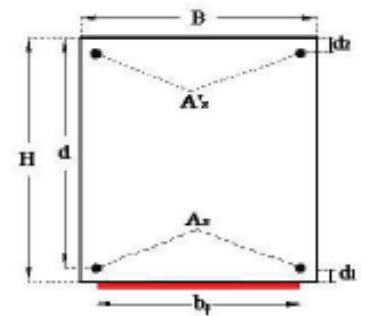
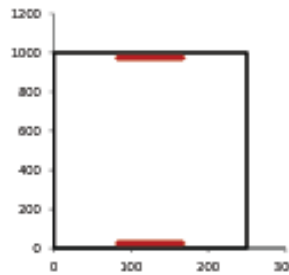
Tutti i tessuti dovranno essere impregnati con la resina tipo MAPEWRAP 31.

Applicazione di sabbia di QUARZO 1,2 asciutta sulla resina fresca (tipo MAPEWRAP 31), in modo da ottenere un'adeguata superficie di adesione per il successivo strato di finitura.

Di seguito si riporta la verifica strutturale in condizioni statiche della trave in oggetto sulla quale viene dapprima calcolato il Mrd che la trave dovrebbe avere pari a 243,20 KNm successivamente considerando i fenomeni di carbonatazione dei materiali si è ricalcolato il valore di Mrd nello stato di fatto pari a 174,38 KNm, infine si è ricalcolato il Mrd della sezione della trave tenendo conto dell'applicazione di fibre di carbonio che hanno determinato un incremento del valore di Mrd portandolo fino a 260,57 KNm > 243,20 KNm.

# CALCOLO MOMENTO RESISTENTE

| Dati di Input Sezione                           |      |                 |
|---|------|-----------------|
| Altezza (H)                                     | 1000 | mm              |
| Base (B)  | 250  | mm              |
| Area di acciaio in trazione A <sub>s</sub>      | 924  | mm <sup>2</sup> |
| Area di acciaio in compressione A' <sub>s</sub> | 100  | mm <sup>2</sup> |
| Copriferro (d <sub>1</sub> -d <sub>2</sub> )    | 25   | mm              |
| Altezza utile (d)                               | 975  | mm              |
| Area di lamina A <sub>f</sub>                   | 0,0  | mm <sup>2</sup> |



| Materiali                          |            |         |                 |                 |           |
|------------------------------------|------------|---------|-----------------|-----------------|-----------|
|                                    | Resistenze |         | Moduli elastici |                 |           |
|                                    | Medie      | Calcolo |                 |                 |           |
| Calcestruzzo f <sub>cm</sub> [MPa] | 24         | 17,78   | 28608           | f <sub>td</sub> | 16,00 MPa |
|                                    |            |         |                 | f <sub>td</sub> | 1,90 MPa  |
| Acciaio f <sub>yk</sub> [MPa]      | 374        | 277,0   | 210000          | ε <sub>yk</sub> | 0,00132   |
| Fattore di confidenza FC           | 1,35       |         |                 |                 |           |

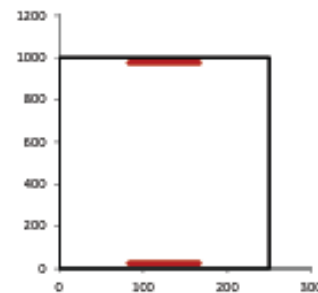
|   |    |
|---|----|
| Momento iniziale agente in sezione prima dell'applicazione delle fibre M <sub>0</sub> [kNm] | 10 |
|---|----|

| Materiale | Tipo di fibra | Esposizione |
|-----------|---------------|-------------|
|           | Carbonio      |             |

| CARATTERISTICHE FRP  |            |
|--|------------|
| σ caratteristica di rottura                                    | 5340 MPa   |
| ε caratteristica di rottura, ε <sub>rk</sub>                   | 0,021      |
| Modulo elastico  | 256000 MPa |
| Spessore equivalente tessuto secco (t <sub>e</sub> )           | 0,164 mm   |
| Coefficiente di sicurezza per distacco FRP (γ <sub>f,d</sub> ) | 1,2        |
| Coefficiente parziale del materiale (γ <sub>f</sub> )          | 1,10       |
| Fattore di conversione ambientale (η <sub>1</sub> )            | 0,95       |
| σ calcolo, f <sub>td</sub>                                     | 4228 MPa   |

|   |                    |
|---|--------------------|
| Larghezza rinforzo (b <sub>f</sub> )                    | 0 mm               |
| N° strati rinforzo (n)                                  | 1                  |
| Coefficiente per condizione di carico (k <sub>f</sub> ) | Carico distribuito |

|   |           |
|---|-----------|
| k <sub>1</sub>  | 1,18      |
| k <sub>2</sub>  | 0,037     |
| b <sub>f</sub> /b   | 0,25      |
| f <sub>td,2</sub> Resist. di prog al distacco FRP (mod 2) | 1417 MPa  |
| ε <sub>f,d</sub> Deformazione max di distacco FRP         | 0,00553   |
| ε <sub>s</sub> lembo teso CLS all'applicazione dell'FRP   | 0,00003   |
| ε <sub>yk</sub> - ε <sub>s</sub>                          | 0,00129   |
| Γ <sub>f1</sub> Energia specifica di frattura             | 0,219 MPa |
| f <sub>td</sub> Resist. di prog. adesione FRP-CLS         | 1,75 MPa  |
| l <sub>ad</sub> Lunghezza ottimale di ancoraggio          | 97,2 mm   |
| f <sub>td</sub> Resist. di prog. al distacco FRP (mod 1)  | 689 MPa   |
| ε calcolo, ε <sub>yk</sub>                                | 0,00553   |



$$\epsilon_{max} = \frac{f_{td,1}}{E_f} \geq \epsilon_{yk} - \epsilon_s$$

NO distacco intermedio

$$\epsilon_{yk} = \min \left\{ \eta_1 \cdot \frac{f_{td,1}}{E_f}, \epsilon_{max} \right\}$$

## Output: calcolo dell'asse neutro a rottura e del momento ultimo (y<sub>c</sub>, M<sub>u</sub>)

E' una procedura iterativa in cui si ipotizza un valore per y<sub>c</sub> e si verifica che corrisponda. No=0 (rottura in flessione semplice)

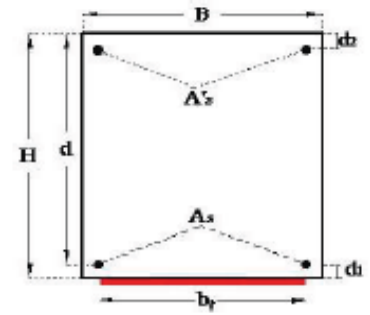
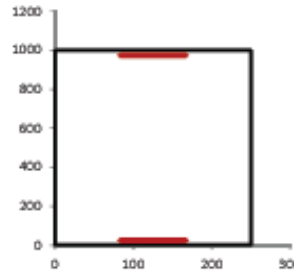
| y <sub>c</sub><br>mm | regione | ψ<br>ad. | λ<br>ad. | σ' <sub>s</sub><br>MPa | σ <sub>s</sub><br>MPa | σ <sub>f</sub><br>MPa | Risolvi | eq. Traslazione | M <sub>u,d</sub><br>kNm |
|----------------------|---------|----------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------|-----------------|-------------------------|
| 70,40                | 1       | 0,80     | 0,416    | 56,76                  | 277,04                | 1416,86               |         |                 | 0,00                    |

| Sezione non Rinforzata |                        |                       |                         |
|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| y <sub>c</sub><br>mm   | σ' <sub>s</sub><br>MPa | σ <sub>s</sub><br>MPa | M <sub>u,d</sub><br>kNm |
| 59,944                 | 428,67                 | 277,0                 | 243,20                  |

|                 |         |
|-----------------|---------|
| ε <sub>c</sub>  | 0,00043 |
| ε' <sub>s</sub> | 0,00028 |
| ε <sub>s</sub>  | 0,00541 |
| ε <sub>f</sub>  | 0,00553 |

# CALCOLO MOMENTO RESISTENTE DOPO INTERVENTO CON FIBRE DI CARBONIO

| Dati di Input Sezione                  |      |                 |
|--|------|-----------------|
| Altezza (H)                            | 1000 | mm              |
| Base (B)                               | 250  | mm              |
| Area di acciaio in trazione $A_s$      | 680  | mm <sup>2</sup> |
| Area di acciaio in compressione $A'_s$ | 100  | mm <sup>2</sup> |
| Copriferro ( $d_1=d_2$ )               | 25   | mm              |
| Altezza utile (d)                      | 975  | mm              |
| Area di lamina $A_f$                   | 65,6 | mm <sup>2</sup> |

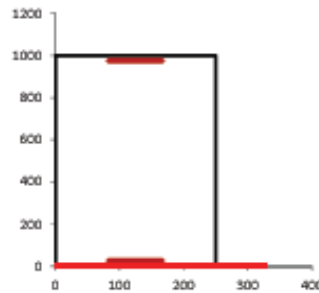


| Materiali                   |            |         |                 |                 |           |
|-----------------------------|------------|---------|-----------------|-----------------|-----------|
|                             | Resistenze |         | Moduli elastici |                 |           |
|                             | Medie      | Calcolo |                 |                 |           |
| Calcestruzzo $f_{cm}$ [MPa] | 24         | 17,78   | 28608           | $\epsilon_{cb}$ | 16,00 MPa |
|                             |            |         |                 | $\epsilon_{cm}$ | 1,90 MPa  |
| Acciaio $f_{yk}$ [MPa]      | 374        | 277,0   | 210000          | $\epsilon_{sy}$ | 0,00132   |
| Fattore di confidenza FC    | 1,35       |         |                 |                 |           |

|  |    |
|--|----|
| Momento iniziale agente in sezione prima dell'applicazione delle fibre $M_0$ [kNm] | 10 |
|--|----|

| Materiale    | Tipo di fibra | Esposizione |
|--------------|---------------|-------------|
| Calcestruzzo | Carbonio      | Normale     |

| CARATTERISTICHE FRP  |            |
|--|------------|
| $\sigma$ caratteristica di rottura                           | 5340 MPa   |
| $\epsilon$ caratteristica di rottura, $\epsilon_{Rk}$        | 0,021      |
| Modulo elastico  | 256000 MPa |
| Spessore equivalente tessuto secco ( $t_f$ )                 | 0,164 mm   |
| Coefficiente di sicurezza per distacco FRP ( $\gamma_{fd}$ ) | 1,2        |
| Coefficiente parziale del materiale ( $\gamma_f$ )           | 1,10       |
| Fattore di conversione ambientale ( $\eta_a$ )               | 0,95       |
| $\sigma$ calcolo, $\sigma_{fd}$                              | 4228 MPa   |



|   |                    |
|---|--------------------|
| Larghezza rinforzo ( $b_f$ )                    | 400 mm             |
| N° strati rinforzo (n)                          | 1                  |
| Coefficiente per condizione di carico ( $k_q$ ) | Carico distribuito |

|   |           |
|---|-----------|
| $k_b$   | 1,00      |
| $k_G$   | 0,037     |
| $b_f/b$   | 1,60      |
| $f_{FRP,2}$ Resist. di prog al distacco FRP (mod 2)   | 1303 MPa  |
| $\epsilon_{Rk,d}$ Deformazione max di distacco FRP    | 0,00509   |
| $\epsilon_a$ lembo teso CLS all'applicazione dell'FRP | 0,00004   |
| $\epsilon_{sy} - \epsilon_a$                          | 0,00128   |
| $\Gamma_{fd}$ Energia specifica di frattura           | 0,185 MPa |
| $f_{FRP}$ Resist. di prog. adesione FRP-CLS           | 1,48 MPa  |
| $l_{opt}$ Lunghezza ottimale di ancoraggio            | 105,7 mm  |
| $f_{FRP}$ Resist. di prog. al distacco FRP (mod 1)    | 634 MPa   |
| $\epsilon$ calcolo, $\epsilon_{fd}$                   | 0,00509   |

$$\epsilon_{Rk,d} = \frac{f_{FRP,2}}{E_f} \geq \epsilon_{sy} - \epsilon_a$$

NO distacco intermedio

$$\epsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{f_{FRP}}{E_f}, \epsilon_{Rk,d} \right\}$$

## Output: calcolo dell'asse neutro a rottura e del momento ultimo ( $y_c, M_{Rd}$ )

E' una procedura iterativa in cui si ipotizza un valore per  $y_c$  e si verifica che corrisponda  $Nu=0$  (rottura in flessione semplice)

| $y_c$<br>mm | regione | $\psi$<br>ad. | $\lambda$<br>ad. | $\sigma'_s$<br>MPa | $\sigma_s$<br>MPa | $\sigma_f$<br>MPa | Risolvi | eq. Traslazione | $M_{Rd}$<br>kN m |
|-------------|---------|---------------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------|-----------------|------------------|
| 75,38       | 1       | 0,80          | 0,416            | 58,22              | 277,04            | 1302,55           |         |                 | 0,00             |

| Sezione non Rinforzata |                    |                   |                  |
|------------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| $y_c$<br>mm            | $\sigma'_s$<br>MPa | $\sigma_s$<br>MPa | $M_{Rd}$<br>kN m |
| 49,818                 | 56,33              | 277,0             | 174,38           |

|                  |         |
|------------------|---------|
| $\epsilon_s$     | 0,00043 |
| $\epsilon'_s$    | 0,00029 |
| $\epsilon_s$     | 0,00499 |
| $\epsilon_{s,c}$ | 0,00509 |