

Rinforzo strutturale con materiali compositi CFRP

Il caso della Tribuna Est superiore dello Stadio Comunale di Lecce

Gabriele LOZUPONE¹

¹ Libero professionista - Progetto e Direzione dei Lavori

In questo manoscritto si illustrano gli interventi di rinforzo strutturale della Tribuna Est superiore dello stadio Comunale di via del Mare a Lecce, partendo dal rilievo delle patologie ricorrenti fino alla messa in opera dei sistemi di rinforzo progettati come intervento di riparazione o intervento locale ai sensi delle disposizioni tecniche vigenti. Progettista, D.L. e C.S.P. Ing. G. Lozupone; supporto alla progettazione Ing. PHD F. Longo; Impresa esecutrice ALMAT srl.

1. INTRODUZIONE

L'immobile oggetto dell'intervento proposto è lo *stadio Ettore Gardiniero di Via del Mare*, un impianto sportivo situato nella città di Lecce. Il caso di studio riguarderà la sola Tribuna Est superiore, di seguito "CRESCENT".



Lo stadio fu inaugurato l'11 settembre 1966 con una capienza iniziale di 16 000 posti, in occasione di un'amichevole tra Lecce e Spartak Mosca. La Tribuna Est, è costituita dal *crescent*, oggetto di intervento, caratterizzata da gradinate singole prefabbricate in calcestruzzo armato appoggiate a costoloni in c.a. gettato in opera; dall'anello inferiore, non coinvolta nell'intervento. Geometricamente, il Crescent è composto da 24 telai distanziati con interasse di 5,50 m e dimensioni complessive in pianta pari a ca. 113 m di lunghezza, 27 m di larghezza e ca. 15,50 m di altezza dal p.c.

2. VISUAL INSPECTION TRIBUNA EST

2.1. Visual Inspection

Prima fase indispensabile è la definizione delle cause che hanno promosso gli effetti macroscopici dell'alterazione, del degrado e/o del dissesto dei singoli elementi in c.a. La ricerca delle cause (diagnosi) è fondamentale nella manutenzione delle strutture esistenti, poiché il fine primario dell'intervento è rappresentato proprio dall'eliminazione delle cause responsabili delle patologie e/o delle carenze di cui l'opera è affetta. Per risalire agevolmente alle cause delle alterazioni rilevate, è stato necessario avvalersi di alcune tecniche di indagine per determinare le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali da costruzione e misurare le prestazioni residue dal punto di vista meccanico ed elastico.

2.2. Analisi critica delle indagini visive

In tutte le parti in calcestruzzo esposte, sono stati osservati i tipici fenomeni di ossidazione delle armature. In particolare, sono evidenti i tipici fenomeni di ossidazione delle armature e rigonfiamento dello strato corticale di calcestruzzo con successiva espulsione del copriferro. La prima causa del degrado è da imputarsi al ridotto copriferro (minore di 10 ÷15 mm); la mancanza di manutenzione ordinaria e l'assenza di protezione (cls facciavista) hanno sicuramente aggravato le condizioni di degrado osservate (carbonatazione/corrosione).



2.3 Indagini sperimentali

Per poter definire una diagnosi vera e propria e stabilire quali interventi di manutenzione e restauro attuare (terapia), si è reso necessario progettare una campagna di indagine dettagliata. Nello specifico, sono state effettuate:

Prove Sclerometriche

La prova consiste nello scagliare da una molla (di costante elastica nota) una massa, la quale colpisce un pistone a contatto con la superficie del calcestruzzo che rimbalza in funzione della durezza della superficie stessa.

Prove Ultrasoniche

La prova ultrasonica fornisce indicazioni sull'omogeneità del materiale indagato tramite la misurazione della velocità di attraversamento di un impulso ultrasonico.

Metodo SonReb

L'utilizzo di metodi combinati nasce dall'esigenza di ridurre le incertezze e gli errori di misura che si verificano quando si utilizza un singolo metodo. Il più diffuso metodo combinato a due parametri, noto con il nome SonReb, è quello che utilizza i risultati ottenuti combinando insieme le prove sclerometriche con le indagini ultrasoniche.

Ulteriori prove

A completamento delle prove sopra illustrate, sono state eseguite prove di carico con serbatoi rigidi sui gradoni e estrazione di carote di calcestruzzo da sottoporre a prova di compressione.

4. ANALISI NUMERICA

4.1. Materiali e Analisi dei Carichi

Dallo studio della documentazione presente negli archivi Comunali, grazie alle indagini eseguite in situ, sono stati determinati i carichi agenti sulle strutture interessate e le caratteristiche dei materiali esistenti.

Calcestruzzo Rbk 350 - C28/35		
Classe di resistenza	C28/35	[-]
Resistenza caratteristica cubica a compressione R_{ck}	35	[MPa]
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione ($f_{ck} = 0,83 R_{ck}$)	28	[MPa]
Resistenza media cilindrica a compressione ($f_{cm} = f_{ck} + 8$)	36	[MPa]
Resistenza media a trazione semplice ($\leq C50/60$) ($f_{ctm} = 0,30 f_{ck}^{2/3}$)	2,77	[MPa]
Modulo elastico medio $E_{cm} = 22.000[f_{cm}/10]^{0,3}$	32308,25	[MPa]
Coefficiente parziale di sicurezza CLS (γ_c)	1,5	[-]
Coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata (α_{cc})	0,85	[-]
Resistenza di progetto a compressione ($f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$)	15,87	[MPa]
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione (f_{ck})	1,94	[MPa]
Resistenza di progetto a trazione ($f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c$)	1,29	[MPa]

calcestruzzo

Acciaio FeB 38k		
Acciaio per cemento armato	FeB38k	[-]
Tensione nominale caratteristica di snervamento $f_{y, nom}$	375	[MPa]
Tensione nominale caratteristica a rottura $f_{t, nom}$	450	[MPa]
Tensione caratteristica di snervamento f_{yk}	375	[MPa]
Tensione caratteristica di rottura f_{tk}	540	[MPa]
Rapporto di sovrarresistenza $k = (f_t/f_y)$	1,44	[-]
Rapporto medio tra il valore effettivo e nominale della tensione di snervamento	1	[-]
Modulo elastico E_s	206000	[MPa]
Coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio γ_s	1,15	[-]
Resistenza di calcolo di snervamento $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$	326,09	[MPa]
Deformazione al limite elastico $\epsilon_{yd} = f_{yd} / E_s$	0,001583	[-]

acciaio d'armatura

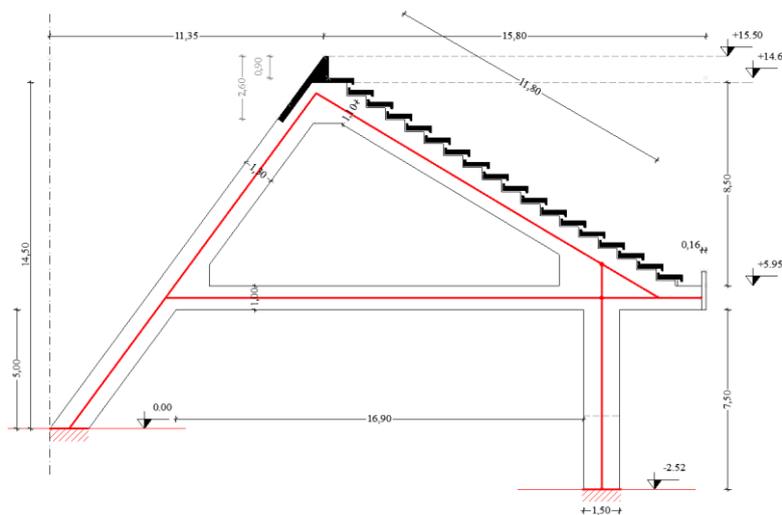
Attraverso le prescrizioni contenute nelle norme tecniche (tab. 3.1.II – NTC-2018) sono stati definiti i carichi antropici Q_k . Nello specifico si è fatto riferimento alla categoria **CAT. C** “Ambienti suscettibili di affollamento” della suddetta tabella, assegnando:

- La sottocategoria **Cat. C2** “Tribune con posti fissi” all’area formata dai gradoni prefabbricati;
- La sottocategoria **Cat. C3** “Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, palazzetti per lo sport e relative tribune” al solaio intermedio.

Per considerare la non contemporaneità del pieno carico sulle gradinate e sul solaio di deflusso, si sono considerate le gradinate a pieno carico (100% Q_{ki}) e un carico antropico ridotto del 50% sul solaio sottostante. Allo stesso modo è stato considerato un incremento del 50% del valore delle azioni antropiche per assimilare l’incremento delle sollecitazioni dovute all’effetto dinamico (in seguito ad un atteggiamento emotivo dei tifosi), ad un’azione equivalente statica.

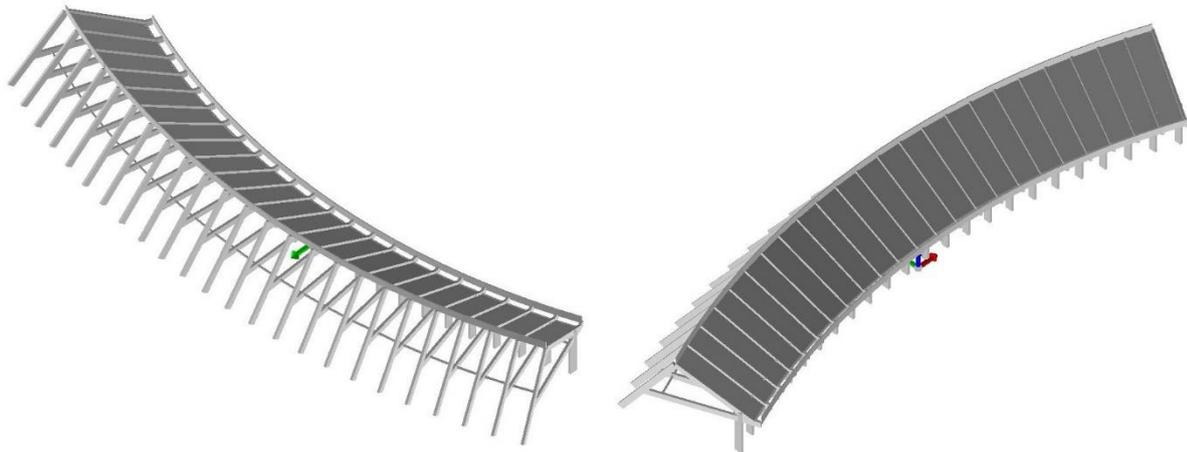
4.2. Modellazione

Una volta effettuata la valutazione delle azioni rilevanti è necessario individuare lo schema generale della struttura con i relativi vincoli, creare un modello numerico (discretizzazione in elementi finiti) e definire i legami sforzi-deformazioni dei materiali impiegati, al fine di coinvolgere la struttura nella sua tridimensionalità. L’insieme di queste approssimazioni e ipotesi, che vengono assunte alla base del processo di modellazione, costituiscono nel complesso il modello di calcolo della struttura. Lo schema statico utilizzato è il seguente:



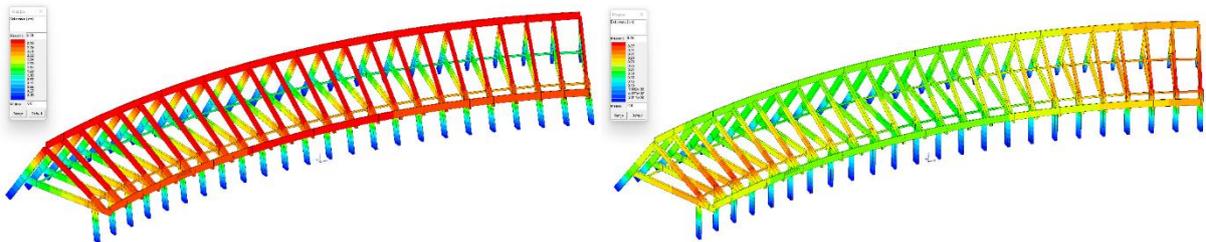
Schema statico

Una volta effettuata la schematizzazione del Crescent individuando tutti gli elementi beam che lo compongono si è realizzato lo scheletro dell'intera Tribuna. Si riportano di seguito gli schemi tridimensionali del modello e alcuni risultati dell'analisi.

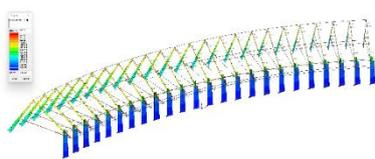


modello di calcolo – 2Si PROSAP

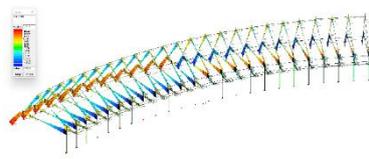
4.3. Risultati dell'analisi



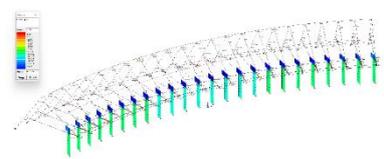
Deformata Ed dinamico SLU ($\alpha = 0,00/90,00 - ecc. +$)



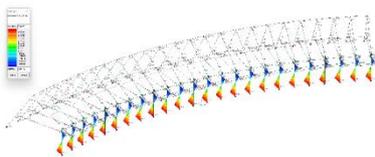
Sforzo Normale



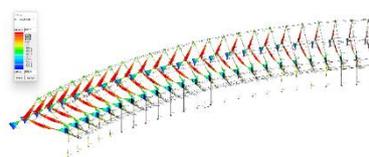
T 2



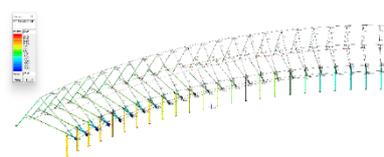
T 3



M 2-2



M 3-3



Mom. Torc.

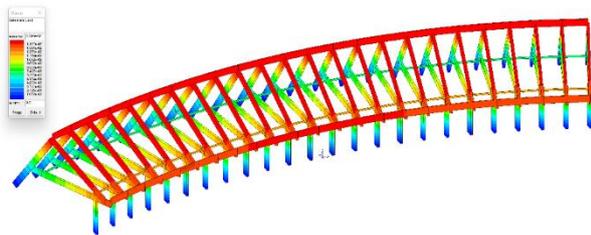
4.3. Analisi Dinamica Lineare (Modale)

Successivamente sono stati valutati i modi di vibrare della struttura con massa partecipante superiore al 5% per un totale pari all'85%. Inoltre la struttura è stata considerata non dissipativa e in accordo con le normative tecniche è stato utilizzato un fattore di comportamento $q = 1,5$.

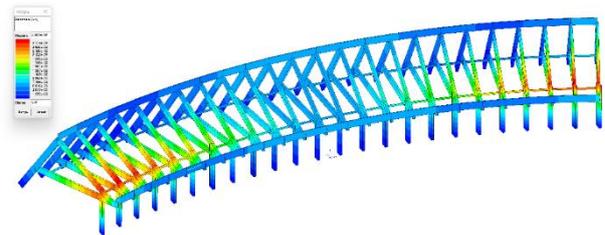
Modo	Frequenza Hz	Periodo sec	Acc. Spettrale g	Massa X %	Massa Y %	Massa Z %
1	1.032	0.969	0.110	89.3	1.34e-05	0.0
2	3.209	0.312	0.161	6.69e-05	8.3	0.2
3	3.781	0.265	0.161	1.5	3.29e-03	2.93e-04
4	3.956	0.253	0.161	6.40e-05	70.4	8.7
5	4.196	0.238	0.161	2.4	1.36e-04	1.06e-05
				96.05 %	9.35 %	

Risultati significativi analisi modale

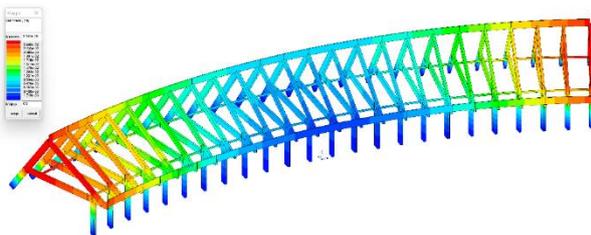
Come si può notare dalla tabella risulta impossibile raggiungere l'85% di massa partecipante in direzione Y. Il motivo è racchiuso nella forte irregolarità geometrica della Tribuna, con forma molto allungata e telai portanti ruotati a formare un arco ellittico in pianta. Infatti, non ci sono travi secondarie di collegamento tra i telai per fornire sufficiente rigidità nelle due direzioni principali e i portali risultano collegati dal solo solaio di interpiano e dai cordoli di chiusura. Per poter procedere ad una valutazione della vulnerabilità sismica della tribuna sarebbe necessario inserire dei controventi opportunamente dimensionati per conferire adeguata rigidità anche nella direzione Y.



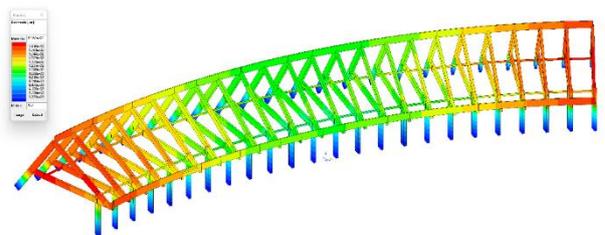
1° modo di vibrare



2° modo di vibrare



3° modo di vibrare



4° modo di vibrare

6. VERIFICHE

Risulta a questo punto evidente che le sollecitazioni allo SLU per carichi verticali risultano maggiori di quelle calcolate in combinazione sismica SLV, con fattore di comp. $q=1.5$. Si è proceduto, quindi, a effettuare le verifiche strutturali considerando l'involuppo delle sollecitazioni, constatando che a governare la verifica sia lo Stato Limite Ultimo (cap. 4 NTC-2018).

Portale n° 17						
Pilastro verticale	Sezione	Sforzo Normale N_{sd}	M_{sx} (M3)	M_{sy} (M2)	Taglio (T_2)	Taglio (T_3)
		Involuppo	Involuppo	Involuppo	Involuppo	Involuppo
	ID.	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kN]
	Sez. A-A p	2875	-1922,92	-112	464	45,87
	Sez. A-A t	2676	-1499	-202	464	45,87
Trave porta solaio	Sezione	Sforzo Normale N_{sd}	M_{sx} (M3)	M_{sy} (M2)	Taglio (T_2)	Taglio (T_3)
		Involuppo	Involuppo	Involuppo	Involuppo	Involuppo
	ID.	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kN]
	Sez. C-C	0	1440	-5,44	0	3,52
	Sez. H-H	0	-1389	-1,81	772	3,52
Sez. M-M	0	1908	20,07	772	3,52	
Pilastro Inclinato	Sezione	Sforzo Normale N_{sd}	M_{sx} (M3)	M_{sy} (M2)	Taglio (T_2)	Taglio (T_3)
		Involuppo	Involuppo	Involuppo	Involuppo	Involuppo
	ID.	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kN]
	Sez. E-E	1267	-1623	14,5	343	2,82
	Sez. F-F	lin	1514	-6,46	259	0,62
Sez. G-G	370	-1398	-0,01	316	0,62	
Trave porta gradoni	Sezione	Sforzo Normale N_{sd}	M_{sx} (M3)	M_{sy} (M2)	Taglio (T_2)	Taglio (T_3)
		Involuppo	Involuppo	Involuppo	Involuppo	Involuppo
	ID.	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kN]
	Sez. D-D	0	975	0,8	0	1,49
	Sez. I-I	432,55	-1285	9,6	805	1,49
Sez. L-L	1096	-2015	-4,97	805	1,49	

Portale maggiormente sollecitato - n° 17

6.1. Livello di Conoscenza raggiunto e resistenze dei materiali

Visti i risultati delle prove sperimentali effettuate sia in situ che in laboratorio e l'ampia disponibilità di tavole esecutive con dettagli costruttivi accurati, si è scelto un Livello di Conoscenza "LC2 – Conoscenza Adeguata", al quale è associato un **Fattore di confidenza FC = 1,20**.

Verifiche SLU - Stato di Progetto						
Livello di Conoscenza		LC2		Fattore di Confidenza		1,20
Materiali	Cls - Rbk 350			Acciaio - FeB 38k		
	$f_{cm} / (FC \times \gamma)$	γ	E_m	$f_{ym} / (FC \times \gamma)$	γ	E_m
	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[Mpa]	[-]	[Mpa]
	13,22	1,5	32308,25	271,74	1,15	206000

Resistenze di calcolo

6.2. Verifiche

Le verifiche eseguite sono: resistenza a taglio, resistenza flessionale in presenza e in assenza di sforzo assiale, resistenza a compressione della sezione di solo calcestruzzo.

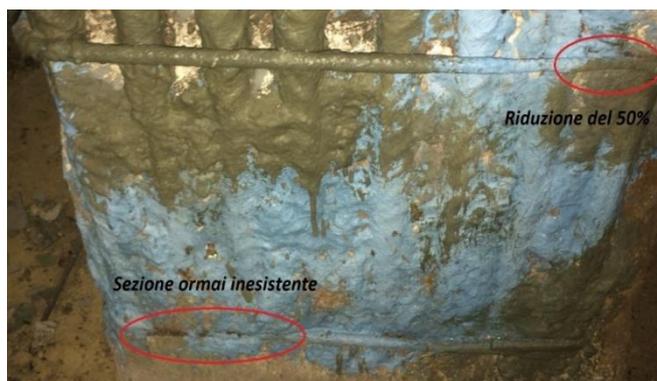
Verifiche delle sezioni integre

Le sezioni indagate sono quelle maggiormente sollecitate del portale tipo e in questa fase sono considerate integre, senza riduzione della capacità resistente dovuta al degrado dei materiali. Si è notato che:

1. I pilastri verticali sono verificati a pressoflessione ($23\Phi 30$ per lato su 3 registri da 8+8+7).
2. I pilastri presentano un passo delle staffe a taglio elevato. Tuttavia, le verifiche di sicurezza risultano soddisfatte.
3. Le travi porta solaio e porta gradoni risultano verificate.

Verifiche delle sezioni ridotte

Successivamente, è stato valutato il livello di corrosione tale da aver ridotto sia il diametro delle staffe sia il diametro delle armature longitudinali.



armature nel Pilastro verticale



staffe trave

Le **ipotesi adottate** sono:

- Per tutte le staffe è stato ridotto il diametro delle barre da $\Phi 10$ originali al diametro residuo $\Phi 8$.
- Per gli elementi resistenti dotati di più registri di armatura a flessione è stato eliminato il registro più esterno (ipotesi molto cautelativa).
- Per gli elementi resistenti a flessione dotati di un solo registro di armatura in zona tesa è stato ridotto di circa il 50% il numero di barre presenti.
- Per le sezioni superiori delle travi non è stata prevista riduzione di armatura.
- Sui pilastri inclinati è stato rimosso il registro più esterno di armature, ossia 4 $\Phi 24$ per lato.

Si nota che i margini iniziali di sicurezza sono sensibilmente ridotti e, vista l'incertezza con la quale in alcune regioni si sia potuta sottostimare la gravità dell'attacco ossidativo sull'acciaio di armatura, è necessario prevedere un intervento di rafforzamento locale di quasi tutti gli elementi strutturali dei telai principali, per ripristinare la capacità portante degli elementi deteriorati.

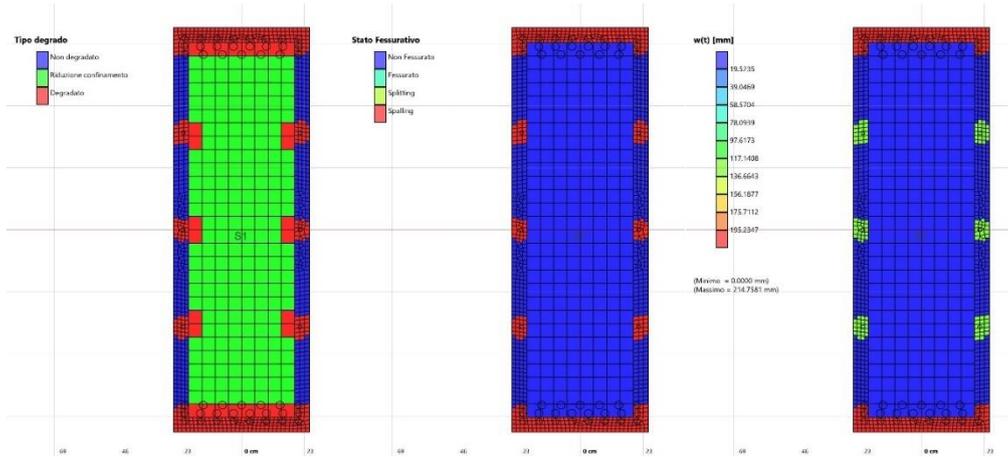
6.2.5. Analisi del degrado

Qualunque sia la causa, la prima manifestazione del degrado è spesso rappresentata da una fessurazione nel calcestruzzo; essa ha effetti sulla resistenza meccanica della struttura e sulla penetrazione dell'anidride carbonica: è evidente, infatti, che in presenza di fessurazioni il tempo di innesco della corrosione diminuisce drasticamente.

6.2.6. Decadimento delle proprietà

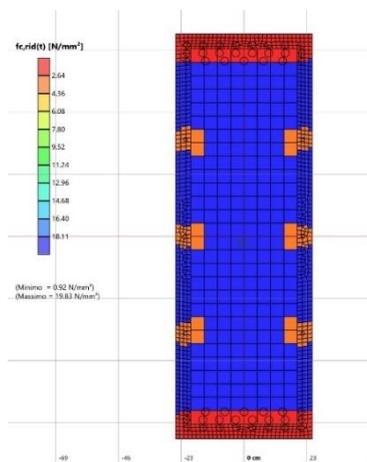
Le modalità con cui la corrosione può avvenire sono diverse in presenza di carbonatazione o in presenza di cloruri: nel primo caso si potrà ipotizzare una riduzione uniforme della sezione in funzione della profondità raggiunta, nel secondo caso la corrosione sarà di tipo localizzato e la profondità massima raggiunta sarà maggiore.

Grazie ad un supporto numerico teorico (software commerciale *DegradoNext di STACEC*), il degrado è stato modellato in modo tale da riuscire a cogliere in modo abbastanza semplice le conseguenze principali sul comportamento globale della sezione. In particolare è stato considerato il danneggiamento del materiale nella zona circostante le barre di armatura, individuando gli elementi di calcestruzzo in prossimità delle armature e che risentono del danneggiamento. Riprendendo la sezione inferiore del pilastro verticale del telaio 17, applicando un degrado diffuso alle barre più esterne (sia long. sia trasversali) con una penetrazione (x) pari a 3 mm per le barre longitudinali dei registri più esterni e pari a 2 mm per le staffe, si nota come il momento abbia subito un forte abbattimento nonostante le verifiche per i pilastri verticali siano ancora soddisfatte. Questo a maggiore conferma di come, in questi elementi, la sollecitazione più gravosa risieda proprio nel taglio (meccanismo fragile). Si riportano i risultati considerando il danno diffuso sulle barre maggiormente esposte.

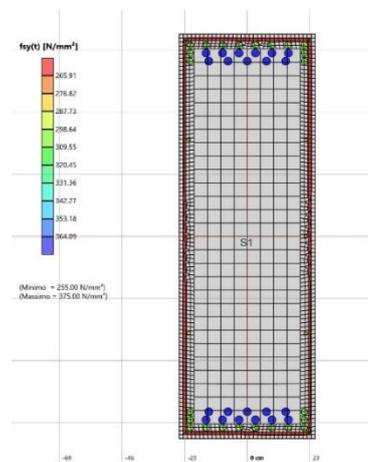


Stato fessurativo

Ampiezza fessure



Resistenza a compressione del cls degradato



Resistenza a snervamento degradata delle barre.

Il comportamento della sezione con danno inglobato, risulta in linea con le ipotesi semplificate fatte all'inizio di questo capitolo riguardo la rimozione di un intero registro di armatura (sebbene molto cautelative). Infatti, analizzando la deformazione e la riduzione delle proprietà meccaniche dei materiali, si può osservare una penetrazione dei fenomeni degradanti fino ad una profondità prossima al secondo registro di armatura, con il coinvolgimento dell'intero spessore armato, in termini di decadimento delle proprietà meccaniche.

7. RINFORZO PROGETTATO

Sulla base dei risultati ottenuti nei paragrafi precedenti, si è scelto il [sistema BETONTEX di Fibre Net S.p.A.](#), ovvero placcaggio con nastri unidirezionali in fibra di carbonio, ad alta resistenza e modulo elastico standard per il rinforzo a flessione e taglio degli elementi trave e pilastro. L'intervento potrà essere classificato come miglioramento mediante opere di rinforzo locale, così come definite ai sensi del § 8.4.1 del D.M. 17/01/2018.

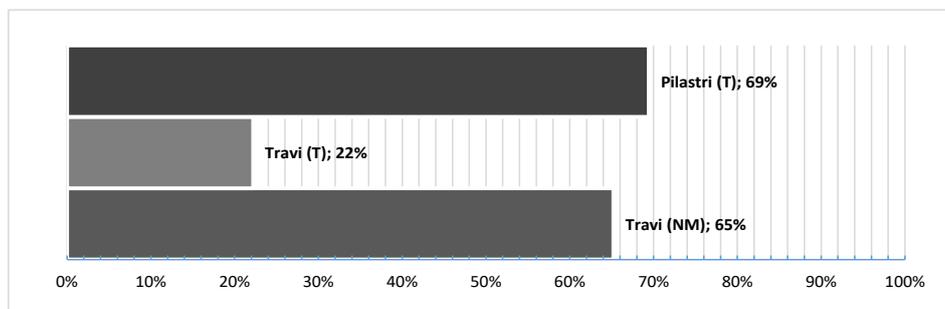
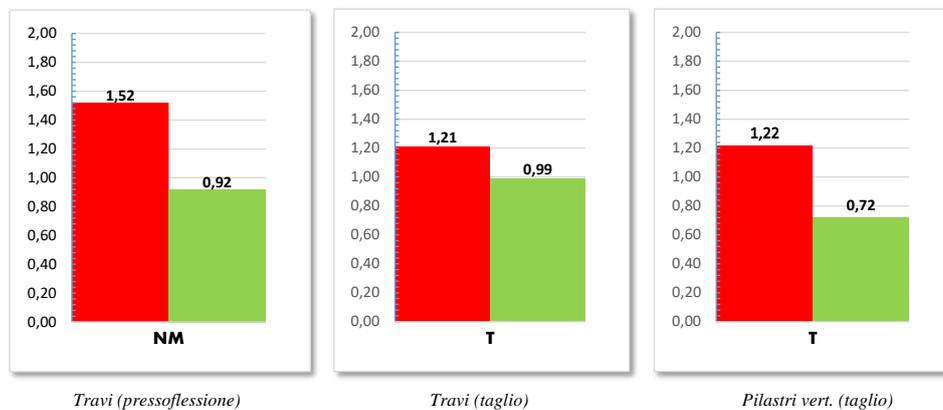
Nella seguente tabella, si riassumono gli interventi da eseguire:

Elemento	Tipo di rinforzo
Pilastri verticali	Rinforzo a taglio mediante confinamento in completo avvolgimento.
Travi	Placcaggio flessionale all'estradosso e confinamento a U nelle zone critiche.
Nodi	Rinforzo a taglio con placcaggio del pannello nodale e fasciatura a X.

7.1. Tabulati di calcolo post intervento (PROSAP)

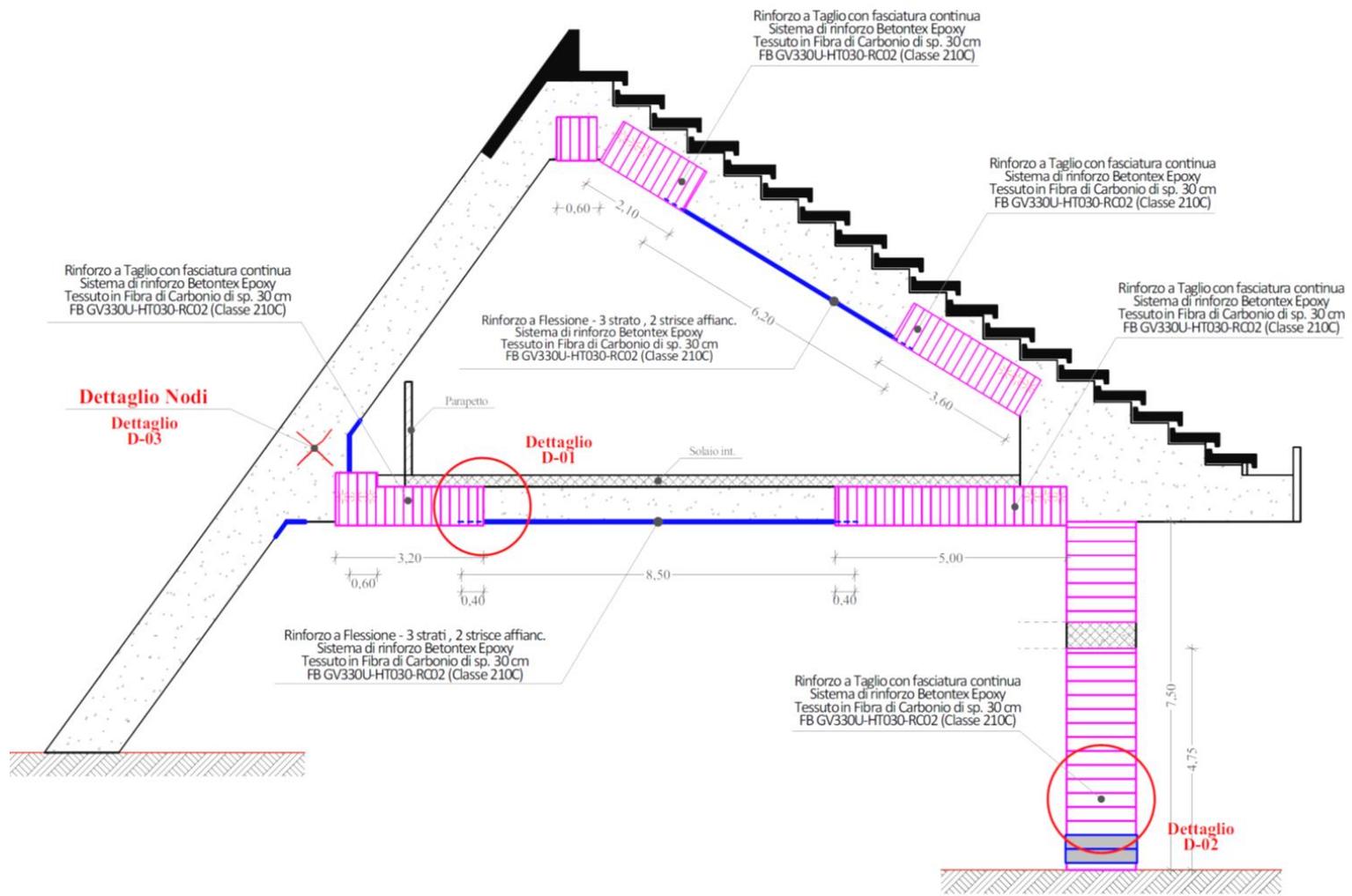
Tralasciando le fasi teoriche di miglioramento delle verifiche, si riportano i risultati delle verifiche POST-intervento, facendo un confronto diretto con le condizioni ANTE-intervento. Si può osservare come in tutti i casi analizzati, l'intervento proposto consente di raggiungere un miglioramento percentuale molto alto, rientrando nei valori normativi.

	Condizione ANTE operam		Condizione POST operam		Miglioramento %	
	$i_{s,max}$		$i_{s,max}$			
	NM	T	NM	T	NM	T
Travi (generico)	1,52	1,21	0,92	0,99	65%	22%
Pilastri verticali	--	1,22	--	0,72	--	69%



Miglioramento % dell'intervento proposto.

A completamento dei risultati sopra richiamati, si riportano alcuni ritagli significativi delle tavole progettuali.



7.2. In Cantiere

In questo paragrafo si riportano alcuni scatti significativi delle fasi di cantiere.

Demolizioni e preparazione delle superfici



Pulizia e Ripristini



Il sistema di Rinforzo



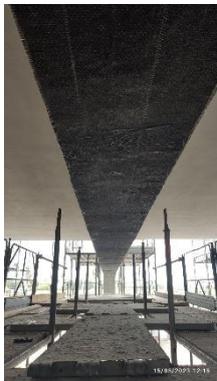
Materiali impiegati



Preparazione dei fiocchi



Placcaggio pilastri



Placcaggio travi





Placcaggio nodi

Opere di finitura



Controllo delle superfici per passaggio alle fasi successive



Primi settori ultimati